

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ ПО НЕКРОЗООПЛАНКТОНУ, V И W-СТАТИСТИКАМ

О.А. Черепанов, Е.В. Павлова,
Л.В. Кузьменко

Институт биологии южных морей
НАН Украины
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2,
e-mail: fme@ibss.iuf.net

По данным сборов планктона в 2003-2004 гг. показаны пределы допустимости применения V и W – статистик для оценки степени загрязненности севастопольских бухт. Количество в планктоне нежизнеспособных особей (некрозоопланктона) может служить объективной оценкой состояния пелагической экосистемы.

Введение. В настоящее время получил широкое распространение пакет программ «Primer-5», предназначенный для анализа состояния экосистем. Привлекает простота его использования и широкий спектр реализованных алгоритмов, в частности, имеются программы для оценки степени влияния загрязнений на экосистему только по численности и биомассе видов отдельного звена экосистемы. Результат расчетов по этим программам - оценка влияния комплекса всех загрязнений на рассматриваемое биологическое звено. Таким образом, не требуется проводить анализ спектра, концентраций и токсичности загрязнений. Случай успешного применения V и W- статистик, описанные в теоретическом обосновании алгоритмов [3], относятся к сообществам макробентоса, в достаточной мере стабильных по количественным показателям в течение года. В отличие от них, исследуемое нами зоопланктонное сообщество бухт обладает ярко выраженной сезонной динамикой, на фоне которой необходимо выявить влияние загрязнений.

В данной работе приводятся результаты применения двух алгоритмов пакета «Primer-5» для оценки влияния загрязнений на зоопланктон Севастопольской и Южной бухт и верификация этих результатов по численности некрозоопланктона.

В первом из них рассчитывается расхождение между реальным видовым разнообра-

зией с предсказываемым моделью «нейтрального» сообщества (V-статистика Касвелла). При $V = 0$ видовое разнообразие совпадает с предсказываемым моделью. Если $V > 0$, то видовое разнообразие больше и наоборот. Показателем значительного отклонения сообщества от «нейтрального» служит выход значений V за границу ± 2 , что является сигналом о неблагоприятном состоянии экосистемы.

Второй алгоритм (ABC-метод) основан на ранжировании видов по их процентному вкладу в суммарную биомассу или численность и расчете W-статистики [3]. Значения W лежат в интервале $[-1, +1]$ и стремятся к «-1» при увеличении стресса (загрязнений) и к «+1» – при его полном отсутствии.

Для верификации оценок загрязненности бухт, полученных по V и W – статистикам, использовались данные по зоопланктону, дифференцированного при обработке на живые и мертвые (некрозоопланктон) организмы на момент лова¹ [1]. Численность мертвых организмов в слое лова определяется балансом между их притоком и убылью. При несущественном горизонтальном адвективном переносе или слабой пространственной неоднородности, убыль некрозоопланктона из слоя лова в основном обусловлена его погружением. Это подразумевает зависимость убыли некрозоопланктона от плотности воды (температуры и солености), вертикального адвективного переноса, турбулентности и плотности, размера и формы организмов. Приток некрозоопланктона увеличивают: естественная гибель, конкуренция за пищу, хищничество и загрязнения. Если исследуемые точки акватории выбраны таким образом, что различия в параметрах, определяющих убыль некрозоопланктона, незначимы, тогда, относительная (к сумме живых и мертвых) его численность/биомасса некрозоопланктона может служить мерой сравнения местообитаний по смертности зоопланктона и, соответственно, по уровням загрязнения. В данном случае мы использовали равно-

¹ При стандартной обработке учитываются все организмы, которые можно классифицировать. Так что традиционные данные о зоопланктоне характеризуют суммарную биомассу и численность живых особей и умерших за какой-то период до момента лова.

ценный показатель – жизнеспособность или выживаемость организмов, равный отношению численности живых особей к суммарной численности живых и мертвых организмов.

Численность хищников рассчитывается по данным о численном и видовом составе живого зоопланктона и априорной информации о типе питания. Уровень конкуренции в первом приближении можно оценить по отношению биомассы живого зоопланктона к биомассе всего фитопланктона. Обратная величина этого показателя равна удельному притоку пищи/энергии в сообщество зоопланктона. При влиянии хищничества и конкуренции на жизнеспособность зоопланктона *a priori* должна существовать отрицательная корреляционная связь между жизнеспособностью и показателями хищничества и конкуренции. Тогда, положительная корреляция свидетельствует о зависимости анализируемых параметров от какого-то другого фактора.

Теоретически связь между показателями жизнеспособности и конкуренции в зависимости от уровня загрязнения вскрывается при качественном анализе удельных (на ед. биомассы) потоков энергии через сообщество. Пусть биомасса фитопланктона постоянна, а уровень загрязнения медленно повышается. В этом случае, увеличивается смертность организмов и, как следствие, биомасса зоопланктона снижается до момента достижения равновесного состояния. Процесс адаптации сообщества к повышению уровня загрязнения возможен до тех пор, пока стационарное значение притока энергии не достигнет верхнего предела удельного притока энергии. Этот момент является началом гибели сообщества, а загрязнение достигает критического уровня.

В реальных условиях, уровень загрязнения флуктуирует, что позволяет при помощи корреляционного анализа по натурным данным определить степень влияния загрязнения на сообщество. Если эти колебания не выходят за критическое значение, то смертность зоопланктона и стационарный удельный приток пищи в сообщество должны положительно коррелировать с коэффициентом корреляции равном 1. Превышение в какие-то моменты времени загрязнением критическо-

го уровня отражается на стационарном удельном притоке энергии в сообщество, а именно в эти моменты он равен верхнему пределу притока энергии. Вследствие этого коэффициент корреляции между гибелью зоопланктона и стационарным удельным притоком пищи в сообщество снижается. Если уровень загрязнения всегда выше критического значения, коэффициент корреляции становится равным нулю. Естественно, из-за временной задержки в адаптации сообщества к новым уровням загрязнения значения коэффициентов корреляции будут искажаться. Таким образом, между показателями жизнеспособности и конкуренции должна существовать положительная корреляционная связь, снижение уровня корреляции отражает степень превышения флуктуаций загрязнения критического уровня. А отсутствие корреляции сигнализирует о критическом состоянии зоопланктонного сообщества.

Результаты и обсуждение. Оценка уровня загрязнения бухт проводилась на материале сетных ловов в 2003 - 2004 гг на трех станциях. Станции 7 и 2 находятся в Севастопольской бухте вблизи берега северной стороны, первая на входе в бухту, вторая – в ее конце, перед акваторией прилегающей к Инкерману, ст. 6 расположена ближе к концу Южной бухты. По данным, любезно представленным нам Е. И. Овсяным (МГИ), на этих станциях были практически одинаковы сезонные изменения поверхностной и придонной температуры ($R > 0.9$). По модельным расчетам Н. Б. Шапиро [2], районы исследований характеризовались незначительными вертикальными и горизонтальными течениями. Отрицательного влияния хищников и конкуренции на показатель жизнеспособности не обнаружено, поэтому показатель жизнеспособности зоопланктонных организмов отражал в основном влияние локальных изменений уровня загрязнения. Коэффициент корреляции между показателями конкуренции и жизнеспособности, рассчитанный по всем данным, равен 0.3 с уровнем значимости 0.05. Это означает, что примерно 70 % флуктуаций уровня загрязнения выше критического значения для сообщества зоопланктона (табл. 1).

Таблица 1 – Средние значения и их доверительные интервалы для показателя жизнеспособности зоопланктона и корреляция между жизнеспособностью и конкуренцией

Год	Жизнеспособность, %			Корреляция между жизнеспособностью и конкуренцией		
	Ст. 7	Ст. 6	Ст. 2	Ст. 7	Ст. 6	Ст. 2
2003	78.3 ± 10.3	66.3 ± 19.4	72.8 ± 8.2	0.48	0.48	0.42
2004	68.4 ± 17.8	41.6 ± 13.6	52.4 ± 19	0.25	-0.14	0.24

Согласно данным, приведенным в таблице 1, наибольший уровень загрязнения наблюдался в Южной бухте (ст. 6), наименьший на входе (ст. 7), а промежуточный – в конце Севастопольской бухты (ст. 2). Рассмотрение значений коэффициентов корреляции убеждает в том, что уровень загрязнения в 2004 г был выше, чем в предыдущий год, а в Южной бухте находился вблизи критического значения. Статистический анализ различий средних величин жизнеспособности по t-критерию Стьюдента подтверждает этот вывод. С уровнем значимости 5 % различаются средние значения жизнеспособности на ст. 6 и 7. Уровни значимости отличия ст. 2 от ст. 6 и 7 в 2003 г. составляют 15 и 43 %, соответственно, а в 2004 г. – 25 %.

Значения V-статистик, характеризующие отклонение видового разнообразия

от предсказываемого «нейтральной» моделью, приведены в таблице 2. Они подтверждают выводы, полученные по результатам определения в пробах некрозоопланктона. Так, значение V-статистики, рассчитанное по всем данным меньше в 2 раза критического значения равного -2, что является сигналом о сильном снижении видового разнообразия и неблагоприятном состоянии экосистемы. По степени загрязнения наиболее благополучно сообщество в районе ст. 7, менее – ст. 2, ($V = -2.03$) и в наихудшем состоянии находился зоопланктон в районе ст. 6. При этом, если в 2003 году уровень загрязнения не приводил к критическому снижению видового разнообразия (значения V-статистик лежат в диапазоне ± 2), то в 2004 году ситуация резко ухудшилась из-за загрязнения Южной бухты ($V = -3.2$).

Таблица 2 – Значения V-статистик, рассчитанные по усредненным данным живого зоопланктона

Все данные	-4.062		
Год	Ст. 7	Ст. 6	Ст. 2
2003-2004	-0.898	-3.644	-2.030
2003	-0.792	-1.550	-0.577
2004	-0.022	-3.168	-1.076

Значения W-статистики, показывающие разность кривых k-доминирования по биомассе и численности, для всех данных равно 0.003. Тогда, согласно [3] сообщество Севастопольской и Южной бухт находилось под влиянием умеренного за-

грязнения, а ранжирование станций по степени увеличения уровня загрязнения не совпадает с оценками, сделанными по некрозоопланктону и V – статистикам (табл.3).

Таблица 3 – Значения W-статистик, рассчитанных по данным живого + мертвого зоопланктона

Год	Параметр	Ст.7	Ст.6	Ст.2
2003	Среднее	-0.03	0.00	0.02
	Дисперсия	0.10	0.04	0.07
2004	Среднее	0.17	0.13	0.16
	Дисперсия	0.22	0.08	0.15

Согласно [3] уменьшение величин W-статистики при усилении загрязнения происходит вследствие элиминации малочисленных видов, состоящих из крупных особей и доминирующих по биомассе в сообществе. В исследуемом нами сообществе это условие не выполняется, так как при усилении загрязнения в большей степени гибнут мелкие ранние возрастные стадии. Поэтому можно констатировать, что применение ABC – метода к зоопланктону севастопольских бухт приводит к ошибочным заключениям об уровне их загрязнения. В нашем случае единственно полезной информацией является дисперсия W-статистики, которая уменьшается при увеличении уровня загрязнения и зависит от характера сезонной сукцессии. Поэтому, по дисперсии величин W-статистики можно судить об относительной степени загрязнения различных районов в конкретном году, но не о межгодовых изменениях его уровня. Тогда, согласно значениям дисперсии W, ранжирование станций по степени загрязнения в 2003 - 2004 гг. совпадает с полученным по жизнеспособности организмов и V – статистикам.

Заключение. По данным о некрозоопланктоне можно получить достаточно объективную оценку состояния загрязнения севастопольских бухт. Наибольший уровень загрязнения наблюдался в Южной бухте, наименьший – на входе, а промежуточный – в конце Севастопольской бухты. Уровень загрязнения в 2004 г был

выше, чем в предыдущий год, а в Южной бухте находился вблизи критической величины. Рассчитанные значения V-статистик подтверждают эти выводы, что позволяет использовать метод дифференцированной оценки зоопланктона для оперативного анализа состояния пелагического сообщества. Предпосылки ABC – метода не выполняются в сообществе зоопланктона севастопольских бухт, поэтому значения W – статистик могут привести к ошибочным выводам. Наиболее перспективным является метод оценки степени загрязнения по данным о некрозоопланктоне. При его доработке, т.е. формализации в четком алгоритме, компенсирующем погрешности этого метода, можно будет перейти от качественных оценок степени загрязнения к количественным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.В. Павлова, Е.Б. Мельникова. Изменение количественных показателей жизнеспособного зоопланктона Севастопольской бухты в 1998 - 1999гг. (Крым, Черное море). – Гидробиол. журн. Киев. 2005. – т. 41, № 6. – С. 3 – 12.
2. Н.Б. Шапиро, С.А. Ющенко. Моделирование течений в севастопольских бухтах – Морской гидрофиз. журн. – 1999. – № 1. – С. 42 – 57.
3. K.R.Clarke K.R.,R.M.Warwick. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2nd edition. – Plymouth: Primer – E, 2001. – 168 p.