ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ МОЛЛЮСКОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ОБЪЕМА СТОКА ДУНАЯ

В.Н. Золотарев, Н.М. Шурова, С.В. Стадниченко

Одесский филиал Института биологии южных морей НАН Украины
г. Одесса, ул. Пушкинская, 37
E-mail: zolotarev@paco.net

Приведены уравнения регрессий для соотношений биомассы и численности морских двустворчатых моллюсков Anadara inaequivalvis, Mya arenaria и Mytilus galloprovincialis с объемом годового стока Дуная. Эти соотношения могут быть использованы для прогнозных оценок состояния популяций моллюсков при мониторинге прибрежных экосистем Черного моря.

Введение. Двустворчатые моллюски широко распространены в донных биоценозах Черного моря и вариации их популяционных характеристик могут быть использованы в мониторинге биологических последствий изменений условий среды [1]. Особого внимания требуют поселения моллюсков около устьев рек. Колебания речного стока являются существенным фактором изменений гидрохимического и гидрологического режимов прибрежных морских вод, оказывающих влияние на состояние и функционирование гидробионтов.

В связи с этим для анализа соотношений между гидрологическими данными и популяционными характеристиками моллюсков на взморье украинской части дельты Дуная [2] при 14-ти гидробиологических съемках в 2005–2013 гг. были определены численность и биомасса трех наиболее массовых видов моллюсков, *Mya arenaria* (L.), *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, и *Anadara inaequivalvis* (Bruguière), а также рассчитан объем годового стока Дуная за 1, 6 и 12 месяцев до сбора моллюсков. Сведения о ежемесячном стоке Дуная были любезно предоставлены Дунайской гидрометеорологической обсерваторией (г. Измаил).

Для сравнений была определена биомасса *A. inaequivalvis* также в Одесском морском регионе в разные месяцы 2005–2011 гг.

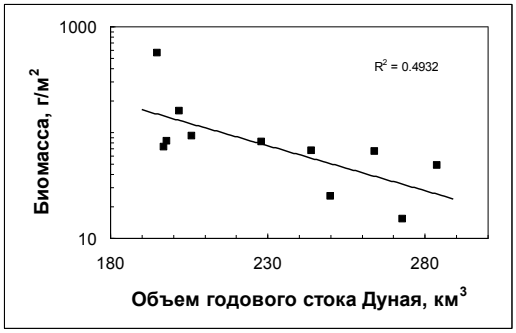
Годовой учетный интервал стока Дуная, не зависимо от времени начала его отсчета, включает все основные сезонные этапы развития поселений моллюсков – пополнение их молодью, увеличение биомассы в процессе роста животных, уменьшение их численности и биомассы в результате стрессовых и повреждающих воздействий среды.

Поселения рассматриваемых моллюсков высоко агрегированы, поэтому для численности и биомассы были рассчитаны их средние геометрические значения [3]. Популяционные характеристики определены для исследуемого района в целом и для его частей – прибрежной (глубина до 13 м) и более глубоководной.

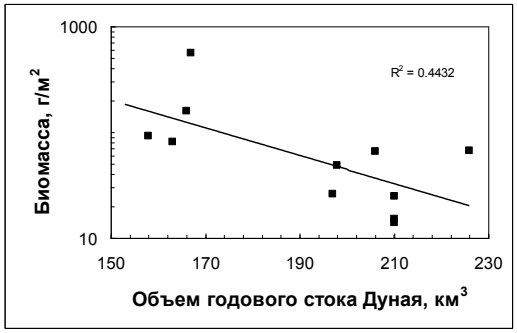
Соотношения гидрологических и биологических показателей описывали уравнениями линейной регрессии и параболы после трансформации значений биомассы и частично численности логарифмированием для уменьшения коэффициентов асимметрии и эксцесса исходных данных. При расчетах параметров регрессий зависимые переменные, стьюдентизированные остатки которых были больше 3, рассматривались как аномальные.

Годовой сток Дуная. Ежемесячный сток Дуная в 2005–2013 гг. был весьма неравномерным – от 7,9 до 36,7 км$^{3.}$, что обусловило значительные вариации объема годового стока – от 168 до 299 км^3. Наиболее полноводным, свыше 250 км^3, сток был в 2005, 2006 и 2010 гг., когда при весеннее-летних паводках его ежемесячный объем превышал 30 км^3. При этом после полноводного 2006 г. (260 км^3) объем стока Дуная в 2007 г. стал 180 км^3, а в 2011 г. он уменьшился до 168 км^3 после 299 км^3 в 2010 г.Такая высокая межгодовая изменчивость стока Дуная отразилась и в значительных вариациях популяционных характеристик массовых видов двустворчатых моллюсков в прибрежных морских водах

Anadara inaequivalvis. Средняя биомасса моллюска (*B*) для всего региона уменьшалась с 563 до 14 г·м$^{-2}$ при увеличении объема стока Дуная (*Q*) за год до летне-осенних сборов моллюсков в 2005–2013 гг. от 195 до 290 км^3 (рис.1).



Р и с. 1. Соотношение между биомассой *Anadara inaequivalvis* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в придунайском морском регионе



Р и с. 2. Соотношение между биомассой *Anadara inaequivalvis* в 2005–2013 гг. и объемом годового стока Дуная за 12 месяцев до сборов моллюска в придунайском морском регионе

Соотношение между этими показателями описывается уравнением линейной регрессии:

$$\ln B = 8{,}817 - 0{,}0196\, Q \qquad (1)$$

(r = –0,70; SEE = 0,700; p = 0,016), где r – коэффициент корреляции, SEE – стандартная ошибка регрессии, значение которой может быть использовано для расчетов лимитов предсказуемых значений биомассы; p – доверительная вероятность. В расчетах параметров этого уравнения не использована аномально низкая биомасса в ноябре 2011 г. – всего 1,9 г·м$^{-2}$ при крайне малом предшествующем годовом стоке в 161 км^3.

Линейной регрессией определяется также зависимость биомассы *A. inaequivalvis* от более раннего годового стока Дуная, завершенного за 6 месяцев до сборов моллюска (Q_6), но только в области умеренных значений Q_6 от 165 до 260 км^3:

$$\ln B = 13{,}447 - 0{,}0472\, Q_6 \qquad (2)$$

(r = –0,725; SEE = 0,835; p = 0,018),. В этом же диапазоне объема поступивших пресных вод сохраняется линейный характер зависимости биомассы от еще более раннего годового стока Дуная, который был за 12 месяцев до сборов моллюска (рис. 2):

$$\ln B = 9{,}855 - 0{,}0303\, Q_{12} \qquad (3)$$

(r = –0,666; SEE = 0,854; p = 0,025).

Соотношения (1) – (3) статистически значимы на 95 %-ном доверительном уровне ($p < 0{,}05$) и могут быть использованы для расчетов ожидаемой биомассы *A. inaequivalvis* по объему годового стока Дуная, который был завершен, соответственно, за 1, 6 и 12 месяцев до даты, для которой необходима прогнозная оценка популяционных характеристик.

Существенно, что соотношение между средними значениями биомассы *A. inaequivalvis* для Дунайского ($B_Д$) и Одесского ($B_О$) морских регионов в разные месяцы 2005–2011 гг. статистически значимо на 95 %-ном доверительном уровне и определяется выражением

$$B_О = 13{,}447 - 0{,}0472\, B_Д \qquad (4)$$

(r = –0,83; p = 0,039). Высокий коэффициент корреляции свидетельствует о значительной синхронности изменений биомассы в поселениях моллюска двух регионов, что предполагает возможность использования уравнений (1) – (3) с учетом зависимости (4) для прогнозных оценок биомассы *A. inaequivalvis* также в Одесском морском регионе.

Для прибрежных *A. inaequivalvis* прогнозные зависимости их биомассы ($B_П$) от объема стока Дуная статистически достоверны ($p < 0{,}01$) при оценке годового стока, завершенного за 6 месяцев до сбора моллюсков:

$$\ln B_П = 8{,}971 - 0{,}0233\, Q_6 \qquad (5)$$

(r = –0,917; SEE = 0,459; p = 0,0013); а также за 12 месяцев до этого события:

$$\ln B_{П} = 7{,}992 - 0{,}0201\ Q_{12} \qquad (6)$$

(r = –0,86; SEE = 0,587; p = 0,0061).

Для более глубоководных поселений *A. inaequivalvis* зависимость биомассы ($B_Г$) от годового стока перед сборами моллюска (Q) определяет выражение

$$\ln B_{Г} = 8{,}444 - 0{,}0168\ Q \qquad (7)$$

(r = –0,60; SEE = 0,784; p = 0,05), статистически значимое на 95 %–ном уровне. Доверительный уровень для соотношения $B_Г$ с Q_6 лишь 90 %-ный (r = –0,565; SEE = 1,087; p = 0,089):

$$\ln B_{Г} = 12{,}014 - 0{,}04\ Q_6\ , \qquad (8)$$

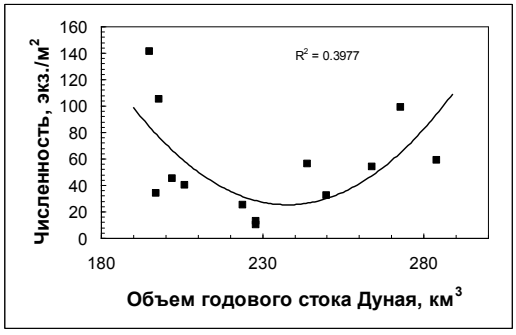
и только в диапазона годового стока Q_6 от 165 до 260 км^3.

Соотношения численности *A. inaequivalvis* (N) с объемом годового стока перед сборами моллюска (Q) имеют иной характер и описываются уравнением параболы как для всего придунайского региона, R^2 = 0,3977 (рис. 3):

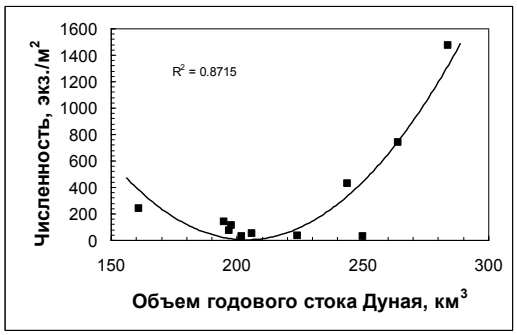
$$N = 0{,}0321Q^2 - 15{,}29Q + 1843, \qquad (9)$$

так и для его отдельных районов – прибрежного, R^2 = 0,8715 (рис. 4):

$$N_{П} = 0{,}205Q^2 - 83{,}72\ Q + 8538\ , \qquad (10)$$



Р и с. 3. Соотношение между численностью *Anadara inaequivalvis* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в придунайском морском регионе



Р и с. 4. Соотношение между численностью *Anadara inaequivalvis* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в прибрежной части придунайского морского региона

и более глубоководного, R^2 = 0,302:

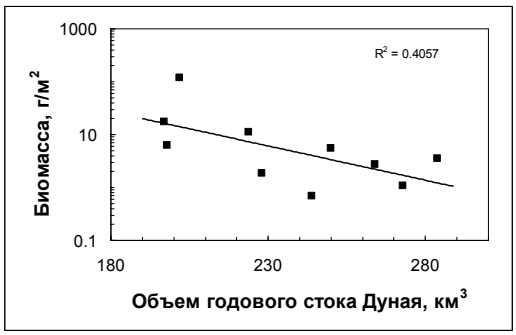
$$N_{Г} = 0{,}04Q^2 - 18{,}48Q + 2142\ . \qquad (11)$$

Наиболее высокая численность моллюска, превышающая 400 экз./м^2, была обнаружена в прибрежной части региона в августе и ноябре 2010 г., а также в июне 2011 г. Основную часть поселений в это время составляла молодь, у которых средняя масса одной особи не превышала 0,03 г. Такому массовому пополнению популяции моллюска предшествовал интенсивный весеннее-летний паводок 2010 г., в течение которого ежемесячный сток Дуная в марте, июне и июле превышал 30 км^3. Увеличение плотности прибрежных поселений в июне 2007 г. до 110 экз./м^2 также следовало после экстремального весеннее-летнего половодья 2006 г., в результате которого годовой сток достиг 260 км^3.

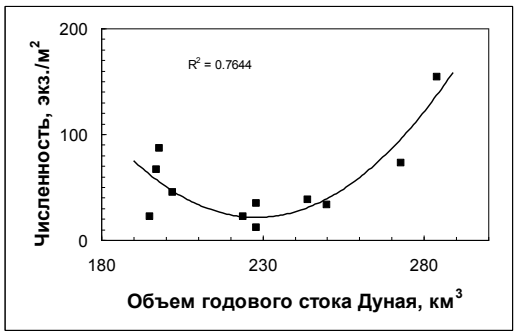
Mya arenaria. Средняя биомасса поселений этого моллюска в придунайском регионе в 2005–2013 гг. варьировала от 2,4 до 152,8 г·м$^{-2}$, уменьшаясь при повышении стока Дуная (r = –0,43). Однако соотношение этих показателей статистически не достоверно на 90 %-ном доверительном уровне (p = 0,14). Более значима связь пресноводного стока с биомассой моллюска лишь из прибрежных вод (рис. 5):

$$\ln B_{П} = 8{,}662 - 0{,}03\ Q \qquad (12)$$

(r = –0,637; SEE = 1,215; p = 0,048).



Р и с. 5. Соотношение между биомассой *Mya arenaria* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в прибрежной части придунайского морского региона



Р и с. 6. Соотношение между численностью *Mya arenaria* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в придунайском морском регионе

Также значимо соотношение $B_Г$ с Q для *M. arenaria* из более глубоководных частей региона (r = –0,666; SEE = 1,728; p = 0,018):

$$\ln B_Г = 13{,}89 - 0{,}0487\,Q. \qquad (13)$$

Средняя плотность поселений *M.arenaria* в придунайском регионе варьировала в 2005–2013 гг. преимущественно от 12 до 154 экз./м^2. Лишь в октябре 2008 г. она возросла до 185 экз./м^2, а в августе 2010 г. после интенсивного весеннее-летнего паводка она достигла 451 экз./м^2. При исключении этих двух аномально высоких значений плотности поселений соотношение численности моллюска с предшествующим годовым стоком Дуная описывается уравнением параболы (рис. 6) с высоким коэффициентом детерминации – 0,7644:

$$N = 0{,}037Q^2 - 16{,}865Q + 1945\,. \qquad (14)$$

При этом численность моллюска возрастает как при уменьшении, так и при увеличении годового стока от 210–250 км^3.

Для прибрежных *Mya arenaria* зависимость средней численности $N_П$ от годового стока также параболическая. При исключении аномально высокого количества молоди, осевшей к августу 2010 г. (1050 экз./м^2) она определяется выражением

$$N = 0{,}0989Q^2 - 45{,}28Q + 5217 \qquad (15)$$

также с достаточно высоким коэффициентом детерминации – 0,5836.

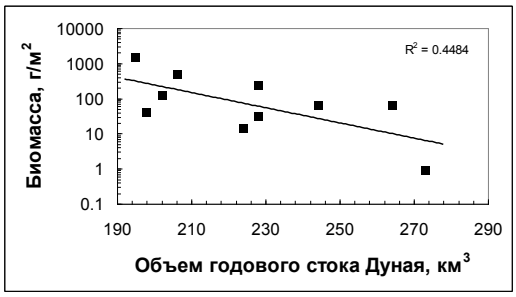
Mytilus galloprovincialis. Этот двустворчатый моллюск широко распространен на шельфе Черного моря и в обрастаниях различных гидротехнических сооружений, образуя самостоятельный биоценоз и входя в состав ряда других сообществ. Он является существенным компонентом морских биологических ресурсов как элемент кормовой базы рыб, а также как объект промысла и марикультуры. Высокий фильтрационный потенциал мидий способствует снижению эвтрофированности и загрязнения прибрежных морских вод.

В условиях краевых частей ареала при солености вод ниже 10 ‰, характерной для ряда прибрежных акваторий Черного моря, у многих мидий *M. galloprovincialis* прекращается фильтрационная активность, что негативно отражается на темпах роста моллюсков и увеличивает их смертность [4]. В результате межгодовых изменений условий среды, в том числе при колебаниях солености вод, в придунайском морском регионе средняя биомасса мидий *M. galloprovincialis* в 2005–2013 гг. варьировала от 1 до 1433 г·м$^{-2}$ с трендом ее уменьшения при увеличении стока Дуная (рис. 7).

Зависимость биомассы мидий от объема годового стока, который предшествовал их сборам, определяется уравнением линейной регрессии:

$$\ln B = 15{,}45 - 0{,}0498\,Q. \qquad (16)$$

(r = –0,67; SEE = 1,599; p = 0,034).



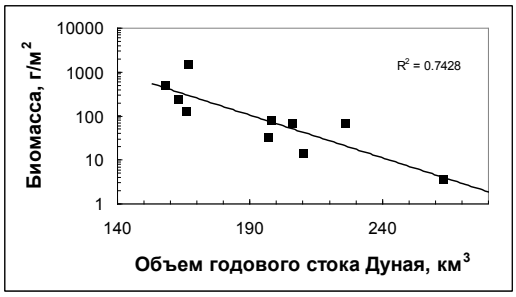
Р и с. 7. Соотношение между биомассой *Mytilus galloprovincialis* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в придунайском морском регионе

Однако прогнозные оценки биомассы *M. galloprovincialis* могут быть получены и по более ранним данным о годовом стоке Дуная. Так, средняя биомасса поселений мидий, ожидаемая через 6 месяцев после годового периода, для которого был определен объем пресноводного стока, может быть рассчитана по соотношению (r = –0,68; SEE = 1,280; p = 0,022):

$$\ln B = 10{,}35 - 0{,}0276\, Q_6. \qquad (17)$$

Еще более ранний прогноз биомассы *M. galloprovincialis* может быть сделан по ее соотношению с данными о годовом стоке Дуная за 12 месяцев до сборов моллюска (рис. 8). Эта зависимость статистически значима на 99 %-ном доверительном уровне и определяется выражением (r = –0,69; SEE = 0,851; p = 0,013):

$$\ln B = 13{,}12 - 0{,}0446\, Q_{12}\,. \qquad (18)$$



Р и с. 8. Соотношение между биомассой *Mytilus galloprovincialis* в 2005–2013 гг. и объемом годового стока Дуная за 12 месяцев до сборов моллюска в придунайском морском регионе

Плотность поселений мидий *M. galloprovincialis*, в отличие от *M. arenaria* и *A. inaequivalvis*, в целом уменьшается при повышении годового стока Дуная. Соотношение этого популяционного показателя с гидрологической характеристикой статистически значимо на 95 %-ном доверительном уровне (r = –0,69; SEE = 0,851; p = 0,013) и определяется уравнением линейной регрессии:

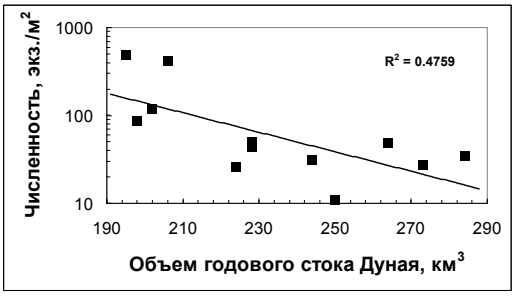
$$\ln N = 10{,}04 - 0{,}0256\, Q\,. \qquad (19)$$

Как и для биомассы, по объему стока Дуная можно судить о количестве мидий, ожидаемом также через 12 месяцев после завершения анализируемого годового стока (рис. 9). Такой прогноз может быть осуществлен по уравнению линейной регрессии

$$\ln N = 11{,}62 - 0{,}04\, Q\,, \qquad (20)$$

которое значимо на 99 %-ном доверительном уровне (r = –0,76; SEE = 0,808; p = 0,0038).

Заключение. Приведенные данные показывают, что плотность поселений и биомасса трех наиболее многочисленных видов двустворчатых моллюсков в придунайском морском регионе, *Anadara inaequivalvis*, *Mya arenaria* и *Mytilus galloprovincialis*, в значительной мере определяются предшествующим стоком Дуная. Соотношения этих популяционных показателей моллюсков с объемом годового стока характеризуют уравнения параболы и линейной регрессии.



Р и с. 9. Соотношение между численностью *Mytilus galloprovincialis* и объемом годового стока Дуная до сборов моллюска в 2005–2013 гг. в придунайском морском регионе

Выбор наиболее простых моделей, как и в многих других исследованиях [5], определялся возможностью их дальнейшего совершенствования с использованием дополнительных переменных, более высокой степенью достоверности прогнозируемых характеристик, указаниями на возможные причинно-следственные связи анализируемых показателей.

Уменьшения биомассы трех видов моллюсков при увеличении стока Дуная аналогичны отрицательной зависимости биомассы зообентоса от речного стока в Азовское море, наиболее выраженной для более опресненного Таганрогского залива [6]. Однако для придунайского морского региона эти соотношения описаны уравнениями линейной регрессии после логарифмирования значений биомассы. Такая трансформация дала возможность более точно оценить структуру массивов этой популяционной характеристики в области наиболее распространенных ее средних и низких значений, а также получить уравнения для оценки биомассы моллюсков, которая ожидается через 1, 6 и 12 месяцев после годового периода, для которого был определен объем стока Дуная. Уровень доверительной вероятности этих соотношений достигает 99 %.

Выявленные вариации численности моллюсков в значительной мере обусловлены сезонностью их размножения, а также значительными межгодовыми различиями в интенсивности пополнения их поселений. В результате более высокой численность *A. inaequivalvis* и *M. arenaria* была как после маловодного, так и после максимального стока Дуная. Такие соотношения плотности поселений моллюсков этих видов с объемом годового стока были описаны уравнениями параболы.

Выявленные зависимости популяционных характеристик трех массовых видов морских моллюсков от единственного гидрологического показателя, несомненно, являются значительным упрощением реальных процессов влияния стока Дуная на прибрежные районы Черного моря. Однако полученные уравнения регрессий могут быть использованы для прогнозных оценок состояния популяций моллюсков, не требующих проведения специальных экспедиционных исследований в регионе. Такие сведения о массовых видах зообентоса могут быть элементом системы мониторинга прибрежных экосистем Черного моря, особенно в связи с необходимостью выявления биологических последствий изменений условий среды, контроля состояния фильтрационного звена экосистемы, кормовой базы промысловых рыб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Золотарев В.Н., Стадниченко С.В., Шурова Н.М.* Рост и продукция моллюсков // Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. – Киев: Наукова думка, 2006. – С. 288 – 304.
2. *Стадниченко С.В., Золотарев В.Н.* Популяционная структура морских двустворчатых моллюсков в районе дельты Дуная в 2007–2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – 20. – С. 248 – 261.
3. *Максимович Н.В., Погребов В.Б.* Анализ количественных гидробиологических материалов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. – 97 с.
4. *Шурова Н.М.* Структурно-функциональная организация популяции мидий *Mytilus galloprovincialis* Черного моря. – Киев: Наукова думка, 2013. – 207 с.
5. *Mac Nally R.* Regression and model-building in conservation biology, biogeography and ecology: The distinction between – and reconciliation of – ‘predictive’ and ‘explanatory’ models // Biodiversity and Conservation. – 2000. – 9 – P. 655 – 671.
6. *Гаргопа Ю.М.* Климатические изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий // Материалы VII Международной конференции “Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона”. – Керчь, 2012. – 1. – С. 219 – 225.