

ПРИДОННОЕ ЭВТРОФИРОВАНИЕ ЭСТУАРИЕВ ПРИМОРСКОГО КРАЯ (РОССИЯ)

© 2018 г. В. В. Богатов^а, *, Т. В. Никулина^а

^аФедеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Россия, 690022, Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159

*e-mail: vibogатов@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2017 г.

Ключевые слова: солоноватые воды, эстуарий, эвтрофикация, альгобактериальные маты, обрастания, бентос, корбикулы.

DOI: 10.1134/S0367059718050025

Известно, что в различные по водности сезоны наблюдается значительная эвтрофикация в загрязненных и слабозагрязненных солоноватоводных экосистемах [1–3], в то время как в незагрязненных проточных водоемах эвтрофирование возможно лишь в условиях длительного маловодья при хорошей освещенности водного зеркала (т.е. отсутствия лесного полога) [1]. Сведения по динамике эвтрофирования в незагрязненных эстуариях в условиях длительного межлетнего периода до последнего времени отсутствовали. Актуальность подобных исследований объясняется тем, что на территории России, в том числе в Приморском крае, в последние примерно два десятилетия отмечается заметное увеличение аномально многоводных и маловодных сезонов редкой частоты повторяемости, что, по-видимому, связано с глобальным потеплением климата [4].

Цель наших исследований заключалась в оценке особенностей эвтрофирования эталонных (незагрязненных) эстуариев в условиях длительной межени (не менее 3.5 мес.) и его влияния на бентосные сообщества.

Работа основана на результатах обследования эстуарного участка р. Гладкая в конце аномально маловодного сезона 2017 г. Эта река берет начало на склоне Сухановского перевала на высоте 180 м (отроги Черных гор, юг Приморского края) и впадает в бухту Экспедиции залива Посыет Японского моря. Длина реки – 44 км, площадь бассейна – 458 км². В низовьях течение равнинное, ширина русла – 80–100 м, максимальные глубины – до 1.5–2 м. Грунт на стрежне реки – крупнозернистые пески, которые в прибрежной полосе могут быть покрыты наилком или травянистым детритом. Река практически не испытывает антропогенного загрязнения, поскольку в пределах ее водосбора нет крупных поселков, промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий.

В низовьях р. Гладкой в массе обитает промысловый двусторчатый моллюск *Corbicula japonica* Prime, 1984. Исследованиями 1980-х гг. показано, что популяция корбикулы здесь встречается во всех зонах эстуария с плотными грунтами и заметным течением, проникая до 3 км вверх по течению [5] и образуя скопления с плотностью до 800–2600 экз/м² и биомассой до 5–13 кг/м² [6].

Мы исследовали 5 и 7 сентября 2017 г. эстуарный участок р. Гладкой напротив с. Зайсановка (Хасанский район, Приморский край; 42.706° с.ш. и 130.84° в.д.) в диапазоне глубин 0.1–1.3 м. При качественных сборах водорослей и моллюсков использовали специальные грабли с узкими частыми зубьями. Количественный учет корбикул проводили вручную с использованием рамки 25 × 25 см. Моллюсков измеряли штангенциркулем и взвешивали после обсушивания на электронных весах Pocket Scale TH-211 (300 г/0.05 г). Взвешивание водорослевых матов с площади 1 × 1 см в пятикратной повторности проводили после предварительного обсушивания на фильтровальной бумаге на торсионных весах с точностью до 0.1 мг. Моллюсков фиксировали 70%-ным этанолом, водоросли и водорослевые обрастания – 3–4%-ным раствором формалина.

Видовую принадлежность Cyanobacteria и водорослей отд. Bacillariophyta, Xanthophyta и Chlorophyta определяли по [7] с помощью световых микроскопов “Axioskop 40” (Zeiss, объективы 40×/0.65 и 100×/1.25 oil) и “Alphaphot-2 YS-2” (Nikon, объективы 40×/0.65 и 100×/1.25 oil). Постоянные препараты для диатомового анализа приготовили методом прокалывания створок в перекиси водорода [8] с заключением в кедровый бальзам. Для исследуемого участка р. Гладкой проведена оценка качества вод по методу Пантле-Бук в модификации Сладчека [9, 10], основан-



Рис. 1. Альгобактериальный мат на глубине 0.7–0.8 м. Фото В. Богатова.



Рис. 2. Корбикулы с обрастаниями, поднятые с глубины 1.2–1.3 м. Фото В. Богатова.

ного на присутствии водорослей-индикаторов органического загрязнения.

В период отбора проб температура воды в реке была около $+22^{\circ}\text{C}$; течение практически отсутствовало; среднесуточное колебание уровня воды, вызванное приливно-отливными явлениями, составляло 18 см; вода была пресной. По информации от местных жителей и состоянию недеформированной прибрежной растительности можно с уверенностью утверждать, что уровеньный режим реки в предшествовавший сборам весенне-летний сезон не испытывал заметных колебаний. Весеннее половодье практически отсутствовало, и лишь 15–16 мая на реке наблюдался небольшой паводок.

Корбикулы встречались в эстуарии от глубины 0.3–0.4 м и глубже. Максимальная плотность была на глубине свыше 0.9 м: 250–350 экз/м², био-

масса – около 1.1–1.5 кг/м². Средняя длина раковин – 24.3 ± 1.5 мм, максимальная – 32 мм.

В зоне обитания корбикул зафиксирована масштабная придонная эвтрофикация. В прибрежном участке на грунте отмечено развитие плотных альгобактериальных матов (рис. 1), толщина которых составляла 4–8 мм, а сырая масса – 390–510 г/м². Эти обрастания были сформированы цианобактериями *Phormidium autumnale* (Agardh) Trevisan ex Gomont, *Ph. corium* (C. Agardh) Gomont, *Ph. uncinatum* (C. Agardh) Gomont ex Gomont, *Anabaena laxa* (Rabenhorst) A. Braun, *Lyngbya aestuarii* (Mertens) Liebman ex Gomont и водорослями – стерильными зелеными нитчатыми *Vaucheria* sp. ster., *Oedogonium* sp. ster. и более чем 100 видами диатомовых водорослей, из которых преобладали *Nitzschia* aff. *scalpelliformis* (Grunow) Grunow, *N. paleacea* (Grunow) Grunow, *Diploneis parma* Cleve и *Bacillaria paxillifer* (O. Müller) Hende. Выше эстуарного участка придонной эвтрофикации не наблюдалось на всем протяжении водотока. Лишь в некоторых небольших мелководных заводях отмечено развитие прикрепленных форм зеленых и диатомовых водорослей.

Водорослево-бактериальные маты покрывали дно эстуария практически сплошным ковром до глубин 0.8–0.9 м или до 15–25 м от береговой линии в сторону фарватера. Под матами на глубинах свыше 0.4–0.5 м вместе с живыми особями было обнаружено большое количество раковин недавно погибших корбикул. У живых моллюсков сифоны не имели доступа к открытой воде, поэтому фильтрацию воды они осуществляли в придонном пространстве между грунтом и альгобактериальным покрытием.

На глубинах свыше 0.9 м маты не развивались, однако на возвышающейся над грунтом задней части раковины корбикул отмечены плотные обрастания (наросты) в виде “бород” длиной от 0.4–0.5 до 5–6 см (рис. 2). Обрастания были сформированы зернами песка и слизистыми тяжами, имевшими как крепкую, так и расщепленную структуру (предположительно пустых влажных цианобактерий). Обрастания включали цианобактерии *Phormidium corium*, *Ph. autumnale*, талломы зеленых нитчатых *Ulothrix zonata* (Weber et Mohr) Kützing и более 70 видов диатомовых водорослей при преобладании *Nitzschia* aff. *scalpelliformis*, *Diploneis parma*, *D. interrupta* (Kützing) Cleve, *Bacillaria paxillifer*, *Tabularia tabulata* (C. Agardh) Snoeijs и *Amphora coffeaeformis* (C. Agardh) Kützing. Наросты на раковинах полностью закрывали выводные и большую часть вводных сифонов, имели стойкий землисто-дуственный запах, характерный для некоторых видов цианобактерий.

Крупномасштабное развитие обрастаний, отмеченное в р. Гладкой, ранее в местообитаниях японской корбикулы не наблюдалось. Аналогич-

ный феномен придонной эвтрофикации отмечается в прибрежной зоне оз. Байкал. Из-за интенсивного развития водорослей родов *Spirogyra* и *Stigeoclonium* здесь были зафиксированы массовая гибель губок и моллюсков, перестройки и гибель зоопланктона. Возможная причина этого — загрязнение озера недостаточно очищенными бытовыми сточными водами [11, 12]. В то же время причины развития водорослей и цианобактерий на грунте и створках моллюсков в эстуарной части р. Гладкой вряд ли связаны с антропогенным загрязнением, поскольку индекс сапробности воды здесь варьировал от 1.32 до 1.40, что соответствует II классу чистоты и воды классифицируются как чистые.

Отмеченная в р. Гладкой придонная эвтрофикация, по-видимому, связана с особенностями гидрологического состояния водотока в сухой сезон, при этом очевидно, что эстуарные бентосные водоросли и цианобактерии не испытывают в этот период недостатка в биогенных элементах. В 2017 г. на протяжении всего вегетационного сезона в реке был аномально низкий уровень воды. В маловодный период при отсутствии возмущающих факторов, т.е. при отсутствии резких изменений расхода воды, стабилизируются мягкие грунты, что при повышенной температуре воды и достаточном поступлении биогенов обеспечивает благоприятные условия для массового развития водорослево-бактериальных обрастаний [13–17]. В речной системе выше эстуарной зоны подобное явление не наблюдается из-за более высокого скоростного режима воды, усиливающего подвижность песчаных грунтов, и наличия развитого древесного полога. Отсутствие альгобактериальных матов на стрежне эстуарной зоны также объясняется подвижностью песчаного грунта, который периодически взмучивается в результате поступления в глубоководную часть эстуария более плотных соленых вод в периоды приливов. В этом горизонте на возвышающейся над грунтом задней части раковины корбикул, представляющей собой устойчивый субстрат, развиваются специфические клейкие обрастания с примесью песка, ранее в природе не регистрировавшиеся.

Мы считаем, что следует обратить внимание на отмеченные в обрастаниях р. Гладкой бентосные цианобактерии из порядка Oscillatoriales, которые способны синтезировать микроцистины и анатоксин-А [18]. Микроцистины — сильные гепатотоксины, а анатоксин-А — блокатор нервно-мышечной передачи; их повышенные концентрации в воде могут вызывать гистологическую дегенерацию у макробеспозвоночных и патологические эффекты в тканях рыб [19, 20]. Поэтому при длительной эвтрофикации необходима организация мониторинга по наличию этих токсинов в обрастаниях, мышцах моллюсков и рыб.

Не исключено, что в перспективе в результате глобального потепления климата число гидрологических крайностей, выраженных в том числе в чередовании аномально маловодных и многоводных периодов, может возрасти [6]. В случае повторения в течение нескольких сезонов аномально малой воды следует ожидать эвтрофирование эстуариев в более крупных масштабах, что в первую очередь повлияет на снижение численности популяций корбикул и других беспозвоночных.

Работа выполнена при поддержке программы Дальневосточного отделения РАН “Дальний Восток” (грант ВАНТ17-007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
2. Berezina N.A., Golubkov S.M. Effect of drifting macroalgae *Cladophora glomerata* on benthic community dynamics in the easternmost Baltic Sea // Journal of Marine Systems. 2008. V. 74. S80–S85.
3. Golubkov S.M., Berezina N.A., Gubelit Y.I. et al. A relative contribution of carbon from green tide algae *Cladophora glomerata* and *Ulva intestinalis* in the coastal food webs in the Neva Estuary (Baltic Sea) // Marine Pollution Bulletin. 2018. V. 126. P. 43–50.
4. Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Freshwater ecosystems of the southern region of the Russian Far East are undergoing extreme environmental change // Knowledge and Management and management of aquatic ecosystems. 2016. V. 417. № 34. P. 1–10.
5. Комендантов А.Ю. Осморегуляторные способности *Corbicula japonica* (Bivalvia, Corbiculidae) в воде различной солености // Зоол. журн. 1984. Т. 63. № 5. С. 769–771.
6. Комендантов А.Ю. Макробентос эстуария реки Гладкой (залив Посьета Японского моря) // Гидробиологические исследования эстуариев. Тр. ЗИН РАН. Л., 1986. Т. 141. С. 114–126.
7. Водоросли. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
8. Swift E. Cleaning diatoms frustules with ultraviolet radiation and peroxide // Phycologia. 1967. № 6. P. 161–163.
9. Pantle F., Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse // Gas- und Wasserfach. 1955. Bd 96. № 18. 604 S.
10. Сладечек В. Общая биологическая схема качества воды // Санитарная и техническая гидробиология. М.: Наука, 1967. С. 26–31.
11. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А. и др. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Kütz. (Chlorophyta) в прибрежной зоне Южного Байкала // Гидробиол. журн. 2014. Т. 50. № 5. С. 15–26.
12. Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // J. Great Lakes Research. 2016. № 42. P. 487–497.

13. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
14. Богатов В.В., Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 388 с.
15. Borchardt M.A. Effects of flowing water on nitrogen- and phosphorus-limited photosynthesis and optimum N : P ratios by *Spirogyra fluviatilis* (Charophyceae) // J. Phycol. 1994. V. 30. № 3. P. 418–430.
16. Valiela I., McClellan J., Hauxwell J. et al. Macroalgal blooms in shallow estuaries: controls and ecophysiological and ecosystem consequences // Limnol. Oceanogr. 1997. V. 42. P. 1105–1118.
17. Rybak A.S. Ecological preferences of freshwater *Ulva flexuosa* (Ulvales; Ulvophyceae): development of macroalgal mats in a Tulce fishpond (Wielkopolska Region, Poland) // Oceanological and Hydrobiological Studies. 2016. V. 45. № 1. P. 100–111.
18. Cantoral Uriza E.A., Asencio A.D., Aboal M. Are We Underestimating Benthic Cyanotoxins? Extensive Sampling Results from Spain // Toxins. 2017. № 9 (12), pii 385. doi 10.3390/toxins9120385
19. El Ghazali I., Saqrane S., Carvalho A.P. et al. Effect of different microcystin profiles on toxin bioaccumulation in common carp (*Cyprinus carpio*) larvae via *Artemia nauplii* // Ecotox. Environ. Saf. 2010. V. 73. P. 762–770.
20. Trinchet I., Djediat C., Huet H. et al. Pathological modifications following sub-chronic exposure of medaka fish (*Oryzias latipes*) to microcystin-LR // Reprod. Toxicol. 2011. V. 32. P. 329–340.