

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ХАОТИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЗООПЛАНКТОНА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ПРИТОКА РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2014 С.Э. Болотов¹, А.В. Крылов¹, В.М. Еськов², В.В. Козлова², О.В. Мухортова³

¹ Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок

² Сургутский государственный университет ХМАО-Югры, г. Сургут

³ Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Поступила 27.02.2014

Приведены результаты сравнительного анализа экологической структуры и параметров хаотической организации зоопланктона устьевой области притока равнинного водохранилища. Показано, что в устьевой области притока, по сравнению со смежными участками реки и водохранилища, происходит значительное увеличение численности и биомассы зоопланктона, устойчиво регистрируется более высокое видовое богатство, возрастают значения параметров хаотических аттракторов сообществ. Под влиянием погодных термических аномалий нарушается фоновая структура сходства видового состава зоопланктона гидроэкологических зон устьевой области, снижается их фаунистическое своеобразие и биоценотическая специфика. В условиях термического эвтрофирования параметры хаотических аттракторов сообществ сигнализируют о серьезных функциональных нарушениях в зоопланктоне и переходе его в состояние патологии.

Ключевые слова: зоопланктон, река, водохранилище, устьевая область, температура воды, аномальные климатические условия, хаос, квазиаттрактор.

ВВЕДЕНИЕ

Среди многообразия водных объектов бассейнов водохранилищ особое значение имеет изучение малых и средних рек.

В результате затопления водами водохранилищ участки их нижнего течения исчезли, а возникшие устьевые области находятся в подпоре, который способен выклиниваться на расстояния до 50 км. Учитывая, что большинство водохранилищ имеют значительное количество средних и малых притоков (например, Рыбинское – 61) [4], можно говорить о формировании обширной площади специфических пограничных участков. Однако сведения об устьевых областях притоков равнинных водохранилищ весьма ограничены и к настоящему времени они оказались неким фронтиром, между относительно изученными экосистемами водохранилищ и малых рек [3].

Целью работы является сравнительный анализ экологической структуры зоопланктона устьевой области малого притока Рыбинского водохранилища и параметров хаотической организации планктонных сообществ, функционирующих в

разных гидроэкологических режимах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В устьевой области притоков водохранилища происходит смешение речных и водохранилищных вод, по обеспеченности которыми ранее выполнено районирование устьевой области реки Ильдь – малого притока Рыбинского водохранилища [1], в ходе которого выделены три основные гидроэкологические зоны: ПА – переходная притока с преобладанием речных вод, ПВ – фронтальная, характеризующаяся значительными вертикальными градиентами с отчетливым расслоением более минерализованных речных и опресненных водохранилищных вод, и ПС – переходная приемника с преобладанием водных масс водохранилища. Для сравнения нами также изучены граничные водные системы реки (зона I) и глубоководного участка Волжского плеса Рыбинского водохранилища (зона III).

Сборы зоопланктона проводили 1–2 раза в месяц с мая по октябрь фонового 2009 и аномально жарких 2010–2011 гг. в зоне свободного течения реки Ильдь, ее устьевой области и Волжском плесе Рыбинского водохранилища. Зоопланктон собирали на медиали: на мелководных участках ведром, на глубоководных – планктоботометром объемом 5 л в столбе воды от поверхности до дна. Через газ с размером ячеек 64 мкм процеживали 20–60 л воды, пробы фиксировали 4%-ным формалином. Камеральную обработку проб проводили по стандартной методике [2]. Сообщества зоопланктона характеризовали на основе комплекса

Болотов Сергей Эдуардович, младший научный сотрудник, alhimikhmu@yandex.ru; *Крылов Александр Витальевич*, доктор биологических наук, профессор, krylov@ibiw.yaroslavl.ru; *Еськов Валерий Матвеевич*, доктор биологических наук, доктор физико-математических наук, профессор, kafedra_bin@mail.ru; *Козлова Виктория Викторовна*, доктор биологических наук, доцент, kafedra_bin@mail.ru; *Мухортова Оксана Владимировна*, кандидат биологических наук, научный сотрудник, muhortova-o@mail.ru

23-х экологически значимых параметров развития, рассчитанных в программе «FW-Zooplankton», разработанной в Лаборатории экологии водных беспозвоночных ИБВВ РАН.

В качестве формальных показателей таксономической сложности применяли индексы средней таксономической отличительности ($\Delta+$) и варибельности таксономической отличительности ($\Lambda+$). Первый, характеризующий таксономическое разнообразие, есть средняя длина пути, который необходимо преодолеть для того, чтобы достичь таксономического ранга общего для двух видов, вычисленная для всех возможных пар видов в сообществе. Второй - по существу является собой дисперсию парных длин связи и может рассматриваться как индекс сложности иерархического дерева.

Расчеты параметров хаотических квазиаттракторов (КА) поведения вектора состояния зоопланктоценозов выполнены с применением авторской запатентованной программы «Identity» (НИИ биофизики и нейрокибернетики Сургутского государственного университета, проф. В.М. Еськов), реализующей идентификацию параметров КА поведения вектора состояния биосистем в m -мерном фазовом пространстве, предназначенной для исследования систем с хаотической организацией. Производили расчет координат граней, их длины (D_i) и объема m -мерного параллелепипеда (vX), ограничивающего КА, внутри которого варьировал вектор состояния зоопланктоценоза, а также показателя асимметрии между стохастическим и хаотическим центром КА (rX).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зоопланктон исследованной акватории сложен весьма разнообразным составом, включающим в себя >250 видов и внутривидовых форм. За период изучения в 2009-2011 году зарегистрировано 220 таксонов в ранге вида, из которых коловраток - 135, ветвистоусых - 58 и веслоногих ракообразных - 27 видов. В целом, за изученный период минимальное количество видов отмечается в водохранилище и проточном участке реки. Наибольшее видовое богатство зоопланктона неизменно формируется в устьевой области реки: в 2009 и 2010 гг. во фронтальной, а в 2011 г. - переходной зоне приемника.

Зоопланктон водной системы притока в аномально жарких 2010 и 2011 годах характеризовался своеобразным видовым составом, резко отличным от вегетационного периода 2009 года, соответствующего по метеорологическим условиям среднемноголетним значениям. Независимо от погодных-климатических условий разных лет устьевая область притока устойчиво обособляется отдельным фаунистическим кластером. Под влиянием сильного прогрева воды в аномально жаркие годы по сравнению с фоновым периодом

увеличивается разнообразие коловраток (с 79 до 109 видов) и ветвистоусых ракообразных (с 36 до 43 видов), общее видовое богатство зоопланктона (с 136 до 170 видов) и возрастает коэффициент трофности E (с 3.8 до 4.4). Кроме того, в условиях жарких лет нарушается фоновая структура фаунистического сходства гидроэкологических зон, а их фаунистическое своеобразие стирается - происходит процесс гомогенизации фауны.

Наибольшим таксономическим разнообразием отличается устьевая область, и главным образом - переходная зона приемника ($\Delta+ = 80.4$), значимо меньшим (даже несколько ниже статистически ожидаемого уровня) - зона свободного течения притока ($\Delta+ = 76.6$). Предельная неравномерность таксономического дерева, напротив характерна для зоопланктона реки ($\Lambda+ = 585.2$), а минимальная - для ее устьевой области ($\Lambda+ = 516.9$). При этом показатель $\Delta+$ значимо коррелирует с уровнем гидрогеоморфологической нестабильности участка ($r = 0.90, p < 0.05$) и содержанием растворенного кислорода ($r = -0.78, p < 0.05$), а показатель $\Lambda+$ значимо связан с температурой ($r = -0.63, p < 0.05$) и прозрачностью воды ($r = 0.90, p < 0.05$), концентрацией растворенного кислорода ($r = 0.85, p < 0.05$) и величиной БПК₅ ($r = -0.76, p < 0.05$).

Полученные оценки этих индексов преимущественно соответствуют статистически ожидаемым (с вероятностью 95%) для изучаемой водной системы. При этом сами индексы связаны обратной зависимостью ($r = -0.81, p < 0.001$): чем выше таксономическое разнообразие сообщества, тем более выровненное таксономическое дерево ему соответствует.

Максимальная численность и биомасса планктонных животных в целом за вегетационный период и в каждую дату наблюдений устойчиво отмечается в устьевой области реки. Экстремумы обилия (0.6-1.5 млн.экз/м³ - по численности, и 4.5-9.3 г/м³ - по биомассе) формируются, как правило, во фронтальной зоне, иногда регистрируются в переходной зоне притока или приемника.

Результаты nMDS-шкалирования сообществ по видовой структуре показывают, что зоопланктоценозы выделенных зон устьевой области значимо различаются как между собой, так и в сравнении с граничными водными системами реки и водохранилища. Однако, под влиянием сильного прогрева воды в жаркие годы стираются биоценотические различия зоопланктона устьевой области, в частности между фронтальной и переходной зоной приемника. При этом зоопланктон 2011 года характеризуется своеобразной биоценотической структурой, значимо отличной от предшествующих лет.

Для подтверждения экологической дифференциации сообществ устьевой области выполнена

идентификация параметров хаотических КА, описывающих движение вектора состояния зоопланктоценозов в 23-х мерном фазовом пространстве синэкологических параметров. Расчеты показывают, что основные параметры КА, а именно величина асимметрии между геометрическим и хаотическим центром КА (rX) и его объем (vX), удовлетворительно согласуются с данными о качественном и количественном развитии локальных сообществ зоопланктона и хорошо отражают различия, обусловленные принадлежностью к

районированным гидроэкологическим зонам. Так, максимальные значения величины асимметрии центров КА и его объем, как правило, регистрируются во фронтальной зоне устьевой области (табл. 1), которую по совокупности признаков (повышенному видовому богатству и развитию краевого эффекта) мы определяем как зону напряжения – экотон; минимальные значения – в зоне свободного течения притока и водохранилище.

Таблица 1. Параметры КА сообществ зоопланктона водной системы малого притока и водоема-приемника.

Параметры КА	Река		Устьевая область				Вдхр-ще	
	I		IIA	IIB		IIIC		
	1	2	2A	3	4	5		6
rX , у.е.	15522		267857	1400658		335507		105185
	10426	14967		1414506	867412	209126	262997	
vX , у.е.	1.3×10^{39}		1.4×10^{56}	5.2×10^{61}		2.0×10^{38}		1.1×10^{49}
	1.6×10^{28}	8.1×10^{29}		1.0×10^{61}	5.8×10^{38}	1.9×10^{57}	2.1×10^{36}	

Таблица 2. Параметры КА сообществ зоопланктона водной системы малого притока в вегетационные периоды климатической нормы (2009 г.) и аномальной жары (2010-11 гг.).

Год	rX , у.е.					vX , у.е.				
	I	IIA	IIB	IIIC	III	I	IIA	IIB	IIIC	III
2009	420330					2.8×10^{36}				
	508	-	102960	208569	9094	4.1×10^{25}	-	7.7×10^{34}	9.4×10^{30}	8.2×10^{36}
2010	590586					1.0×10^{38}				
	959	-	260320	147826	39812	4.8×10^{21}	-	7.7×10^{34}	6.6×10^{31}	1.8×10^{43}
2011	1758065					1.1×10^{42}				
	10313	267857	593589	121033	21941	3.3×10^{25}	1.4×10^{36}	5.3×10^{38}	3.9×10^{33}	1.6×10^{44}

По сравнению с периодом климатической нормы 2009 г. в годы аномальной жары – 2010-2011 гг., когда наблюдали продолжительный (> 1.5 месяца) аномальный прогрев всей водной толщи до 29-33°C, глубокий дефицит растворенного кислорода (< 4 мг/л), гиперцветение синезеленых водорослей и катастрофическое ухудшение качества воды, зоопланктон водной системы характеризовался сильнейшими структурными перестройками, необычно высоким уровнем количественного развития и пребывал на грани «функционального срыва». В этих условиях происходит увеличение значений параметров КА (табл. 2), расширение их границ. Это свидетельствует о неудовлетворительной адаптации сообществ зоопланктона к термическому эвтрофированию и сигнализирует об их переходе в область патологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного можно заключить, что зоопланктон водной системы притока, его устьевой области и водохранилища сложен весьма богатым фаунистическим комплексом. Наибольшее видовое богатство и специфическая биоценотическая структура характерны для устьевой области притока и, особенно, ее фронтальной зоны. По сравнению с сообществами граничащих водных объектов – рекой и водохранилищем –

устьевые области притоков характеризуются наиболее высокими величинами удельного числа видов, численности, биомассы и продукции зоопланктона.

Погодные термические аномалии приводят к нарушению фоновой структуры сходства видового состава зоопланктона гидроэкологических зон устьевой области, снижению их фаунистического своеобразия и биоценотической специфики.

Хаотические аттракторы показательны при описании структурно-функциональной организации сообществ зоопланктона малого притока равнинного водохранилища. Параметры КА достигают максимальных значений в устьевой области притока, и особенно ее фронтальной зоне, зоопланктон которой отличается ярко выраженным хаотическим режимом функционирования и которую мы определяем как экотон.

Параметры хаотических аттракторов сообществ обусловлены особенностями режима гидроэкологических зон и межгодовой погодноклиматической изменчивостью. В условиях погодноклиматических аномалий жарких лет параметры КА сигнализируют о серьезных функциональных нарушениях комплексного характера, свидетельствуют о значительных отклонениях от состояния равновесия, нарастании флуктуаций и меры хаотичности зоопланктоценозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотов С.Э., Крылов А.В., Цветков А.И., Соколова Е.А., Поддубный С.А. Водные массы и зоопланктон зоны подпора притока Рыбинского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2012. № 2. С. 134-141.
2. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. М.: Наука, 1975. 240 с.
3. Мухортова О.В. Зоопланктон некоторых притоков (Самара, Большой Кинель, Большой Черемшан, Уса) Средней и Нижней Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 11 (65). С. 61-70.
4. Рыбинское водохранилище / Отв. ред. Б. С. Кузин. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 364 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ECOLOGICAL STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE CHAOTIC ORGANIZATION OF ZOOPLANKTON IN THE OUTFALL OF A TRIBUTARY OF A FLATLAND WATER RESERVOIR

© 2014 S.E. Bolotov¹, A.V. Krylov¹, V.M. Eskov², V.V. Kozlova², O.V. Mukhortova³

¹ Institute for Biology of Inland Waters RAS, Borok

² Surgut States University of KHAMAO-Yugra, Surgut

³ Institute of Ecology of Volga Basin RAS, Togliatti

Results of comparative analysis of ecological structure and parameters of the chaotic organization of zooplankton in the outfall of a tributary of a flatland water reservoir are given. It is shown, that in backwater zone, in comparison with adjoining river and reservoir areas, significant increase in zooplankton abundance and biomass is observed, species richness is persistently higher, increasing values of chaotic attractors communities. Weather thermal anomalies lead to violation structure of similarity of specific structure of zooplankton of hydroecological zones of mouth area of small tributary, decrease their faunistic diversity and biocenotic specifics. In conditions of thermal eutrophication the parameters of chaotic attractors communities signal a serious functional impairment in zooplankton and its transition to a state pathology.

Key words: zooplankton, river, water reservoir, mouth, water temperature, abnormal climatic conditions, chaos, quasi-attractor.

Bolotov Sergey, junior scientific officer, alhimikhmu@yandex.ru; *Krylov Alexandr*, Doctor of Biology, Professor, krylov@ibiw.yaroslavl.ru; *Eskov Valery*, Doctor of Biology, Doctor of Mathematic, Professor, kafedra_bin@mail.ru; *Viktoria Kozlova*, Doctor of Biology, Assistant professor, kafedra_bin@mail.ru; *Mukhortova Oksana*, Candidate of Biology, senior scientist, muhortova-o@mail.ru