

УДК 574.58(282.247.431.2)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ЗООБЕНТОСА ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДОННЫХ СООБЩЕСТВ РЕК СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГИ

© 2024. В.К. Шитиков<sup>1</sup>, Т.Д. Зинченко<sup>1</sup>, Э.В. Абросимова<sup>1</sup>, Л.В. Головатюк<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр РАН,

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия

<sup>2</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия

Статья поступила в редакцию 17.09.2024

Рассматриваются перспективы использования базы биологических свойств видов макрозообентоса, разработанной западноевропейскими экологами, для моделирования распределения донных сообществ Средней и Нижней Волги. С использованием многомерных методов построены и анализируются ординационные диаграммы для 135 таксонов зообентоса в пространстве 72 биологических и экологических характеристик. Показана статистически значимая связь свойств видов с частотным распределением таксонов по 5 водохранилищам и природно-климатическим зонам. Проанализированы пути приведения исходного состава признаков к более компактной и информативной форме, в первую очередь, за счет выделения оптимального набора градаций качественных признаков. В результате такой оптимизации и после учета ряда важных региональных факторов, базу данных планируется использовать для интерпретации связей между абиотическими переменными и совокупностью характерных свойств отдельных таксономических групп, формирования экологических шкал и создания комплексных моделей совместного распределения видов.

*Ключевые слова:* пресноводный бентос, бассейн р. Волга, свойства видов, анализ соответствия, совместный анализ инерции

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-174-183

EDN: YDTZGE

*Работа выполнена по программе фундаментальных исследований по теме «Изменение, устойчивость и сохранение биологического разнообразия под воздействием глобальных изменений климата и интенсивной антропогенной нагрузки на экосистемы Волжского бассейна», № 122032500063-0.*

### ВВЕДЕНИЕ

Естественная и антропогенная пространственно-временная изменчивость окружающей среды определяют мозаичную видовую структуру сообществ гидробионтов. При этом каждому многомерному «шаблону» абиотических и биотических условий в конкретном местообитании соответствует определенная совокупность видов с необходимыми жизненной стратегией, диапазонами толерантности, потребностями в ресурсах и другими биологическими свойствами

ми [20]. Оптимальный набор таких функциональных и морфологических характеристик (*traits*) вида позволяет организмам легко адаптироваться к меняющимся условиям биотопов и занимать свое место в сообществе с учетом всего комплекса экзо- и эндогенных взаимодействий [1, 12, 19].

Взаимосвязь между абиотическими условиями и биологическими свойствами видов из-за большой комбинаторики факторов имеет сложный характер и вряд ли в полной мере может быть оценена количественно по эмпирическим наблюдениям, которые всегда будут обладать существенной неполнотой данных. В любой среде обитания всегда можно найти организмы с неожиданными сочетаниями признаков, которые будут нарушать предположения общей теоретической модели [17]. Несмотря на это, очевидна важность выделения единообразных функциональных групп таксонов, максимально сходных по своим биологическим признакам, которые в дальнейшем могут быть использованы для прогнозирования и управления разнообразием

---

*Шитиков Владимир Кириллович, доктор биологических наук.*

*Зинченко Татьяна Дмитриевна, доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия. E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru.*

*Абросимова Элина Владимировна, инженер лаборатории биоразнообразия.*

*Головатюк Лариса Владимировна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия ИЭВБ РАН, старший научный сотрудник ИБВВ РАН.*

пресноводных сообществ, местообитаний и экосистем [8, 15].

Нами была использована база данных по биологическим свойствам 472 таксонов макрозообентоса, сформированная в ходе тщательного изучения информации, собранной из обширных и разрозненных литературных источников, включая неопубликованные экспедиционные отчеты из различных регионов мира [16, 21]. С использованием базы данных получены и обсуждаются результаты эффективного решения экологических и биогеографических задач на примере исследований разнотипных речных сетей разных регионов Европы [6, 8, 13, 14].

Для структурирования биологической информации в базе использовалось 11 переменных, касающиеся водных стадий жизненного цикла, потенциального числа поколений, потенциала расселения, отношения к субстрату, общих физиологических признаков и поведенческих аспектов размножения или питания. Признаки каждого таксона обычно имеют принципиально нечеткий характер (один и тот же вид может иметь различный характер питания или разные размеры тела, обитать в разных зонах сапробности и проч.) и описываются путем относительного распределения частот между модальностями (градациями от 2 до 7) значений каждой переменной.

В настоящей статье проводится многомерный статистический анализ биологических и экологических характеристик видов из этой базы и собственных данных применительно к речному макрозообентосу Среднего и Нижнего Поволжья. Нами, с использованием методов ординации показана тесная связь биологических свойств гидробионтов с их пространственным распределением и факторами окружающей среды, выполнена сравнительная оценка важности различных признаков и определены пути выделения характерных систематических единиц или функциональных группировок донных сообществ.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ биологических и экологических свойств видов осуществляли по результатам многолетних 1990–2019 гг. исследований донных сообществ на территории Среднего и Нижнего Поволжья [2, 3]. Гидробиологическую съемку макрозообентоса проводили в разные месяцы вегетационного периода на 90 малых и 12 средних равнинных реках, притоках Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилищ, в том числе, на 7 реках аридного региона бассейна оз. Эльтон. Всего было взято 1400 проб с идентификацией 740 видов и таксонов рангом выше вида, из которых для дальнейшего статисти-

ческого анализа было отобрано 135 систематических единиц, встретившихся не менее, чем в 15 пробах.

Основой для формирования матрицы биологических свойств каждого из 135 видов явилась таблица из приложения к статье [11, файл 1-s2.0-S0048969720357004-mmc1.xlsx, лист Dataset S3]. К базе данных, основанной преимущественно на материале исследований рек Западной Европы, было добавлено некоторое количество отсутствующих видов с полным набором их свойств, которые характерны для поволжского региона. К базовому рубрикатору были также добавлены распределения видов по зонам сапробности в модификации Зелинки-Марвана и типам донного грунта на основании собственных исследований. Список переменных базы и примеры ее заполнения представлен в табл. 1.

Для оценки широтного градиента анализируемых свойств формировалась матрица встречаемости видов в различных природно-климатических зонах и бассейнах водохранилищ. Состав видов, специфичных для каждой группы, представлен в табл. 2. Оценка относительной частоты  $P$ , по которой проводили ранжирование видов, утверждает, что если в наугад взятой пробе встретился вид  $i$ , то эта проба с вероятностью  $P_{ik}$  отобрана на территории  $k$ -го бассейна.

Поскольку каждая из биологических переменных представляет собой композиционные данные, включающие доли (%) отдельных модальностей, в сумме составляющих 100%, то ставилась задача оценить, какие из этих градаций в наибольшей мере определяют общую вариацию признака. Для этого использовали стандартный анализ главных компонент PCA [18].

Для обобщения ковариационных связей в таблице сопряженности видов и всей совокупности их свойств применяли анализ соответствий CA, который находит в многомерном пространстве набор латентных осей в направлении максимальной вариации данных. Тем самым расстояния между объектами (как по строкам, так и по столбцам) в новой редуцированной системе координат будут наилучшим способом соответствовать фактическим расстояниям между объектами в исходной матрице. Специфика кодирования исходных данных определила использование нами нечеткого анализа соответствия (FCA, *Fuzzy Correspondence Analysis* – [7]).

Совместный анализ инерции (CIA, *Co-inertia analysis* – [7]) использовали для объяснения структуры связи между переменными двух различных таблиц (в нашем случае, например, матриц биологических данных и встречаемости видов в водохранилищах).

Вычисления проводили с использованием языка статистической среды R ver. 3.6 и ее специализированного пакета ade4.

Таблица 1. Примеры кодирования распределения биологических и экологических свойств видов по модальностям (%)

Наименование свойств, их метки и число градаций	Состав модальностей	<i>Cricotopus salinophilus</i>	<i>Baetis rhodani</i>	<i>Ecnotus tenellus</i>
Водная стадия – <b>ВС1+ВС4</b>	яйцо, личинка, нимфа, взрослая особь	17 33 50 0	50 50 0 0	33 33 33 0
Продолжительность жизненного цикла – <b>ПЦ1+ ПЦ2</b>	< 1 года, ≥ 1 года	0 100	0 100	0 100
Потенциальное количество циклов в год – <b>КЦ1+ КЦ3</b>	< 1, 1, > 1	0 0 100	0 40 60	0 75 25
Максимальный потенциальный размер – <b>МР1+МР7</b>	≤ 0,25 см, ..., ≥ 8 см	0 50 50 0 0 0 0	0 0 75 25 0 0 0	0 0 100 0 0 0 0
Размножение – <b>Р1+Р8</b>	яйце-живо-рождаемость, свободные яйца, склеенные яйца, прикрепленные кладки, свободные кладки, кладки на растении, кладки наземные, бесполое размножение	0 0 0 40 20 0 40 0	0 0 25 75 0 0 0 0	0 0 100 0 0 0 0 0
Расселение – <b>РС1+РС4</b>	пассивное в водной среде, активное в водной среде, пассивный перенос по воздуху, активное перемещение по воздуху	40 20 20 20	33 22 11 33	25 25 25 25
Формы резистентности – <b>Ф1+Ф4</b>	яйца, коконы, в покое, отсутствуют	0 0 0 100	50 0 0 50	0 0 0 100
Дыхание – <b>Д1+Д4</b>	через тегумент, жаберное, через пластрон, через дыхальца	75 25 0 0	33 67 0 0	100 0 0 0
Передвижение и отношение к субстрату – <b>ПС1+ПС8</b>	перемещается в толще воды, плавает на поверхности, плавает в толще воды, ползает, зарывается в грунт, смешанные, временно прикрепленные, постоянно прикрепленные	0 0 13 38 13 25 13 0	0 0 38 50 0 12 0 0	0 0 0 38 25 0 25 12
Пища – <b>П1+П9</b>	См. рис. 1а	100 0 0 0 0 0 0 0 0	0 18 18 45 9 0 0 0	0 0 0 0 0 67 33 0
Способ питания – <b>СП1+СП8</b>	См. рис. 1б	0 67 0 17 16 0 0 0	0 25 0 75 0 0 0 0	0 0 33 0 50 0 17 0
Тип грунта – <b>Г1+Г6</b>	песок, ..., черный ил	0 16 7 0 3 7 4	84 8 5 1 1 0	8 11 53 16 9 3
Зоны сапробности – <b>С1+С5</b>	II-олиго, ..., VI-полисапробная	1 15 27 30 27	58 42 0 0 0	8 29 34 29 0

**Таблица 2.** Таксоны макрозообентоса, характерные для бассейнов рек различных водохранилищ;  
 $T_{ik}$  – частота встречаемости  $i$ -го вида в  $k$ -м водохранилище,  
 $A_{ik}$  – частота встречаемости, отнесенная к числу выполненных проб в группе,  $P_{ik} = A_{ik} / SA_{ik}$ .

Наименование видов	$T$	$A$ (%)	$P$ (%)
Куйбышевское водохранилище (КВ) – 163 пробы			
<i>Procladius</i> sp.	17	10.43	79.56
<i>Stempellina almi</i>	15	9.20	72.30
<i>Isochaetides newaensis</i>	18	11.04	63.87
<i>Hydropsyche ornatula</i>	10	6.13	61.56
<i>Isochaetides michaelsoni</i>	18	11.04	61.33
<i>Paralauterborniella nigrohalteralis</i>	8	4.91	61.26
Саратовское водохранилище, лесостепная зона (СВ Л) – 261 проба			
<i>Elmis maugetii</i>	26	9.96	89.03
<i>Ephemera vulgata</i>	21	8.05	84.84
<i>Orthocladius</i> sp.	20	7.66	78.88
<i>Monodiamesa bathyphila</i>	49	18.77	78.58
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>gracei</i>	39	14.94	72.95
<i>Dicranota bimaculata</i>	84	32.18	68.22
Саратовское водохранилище, степная зона (СВ С) – 474 пробы			
<i>Bithynia tentaculata</i>	24	5.06	66.85
<i>Tanytus vilipennis</i>	20	4.22	61.98
<i>Paratanytarsus lauterborni</i>	15	3.16	57.30
<i>Endochironomus tendens</i>	18	3.80	51.69
<i>Dreissena polymorpha</i>	35	7.38	51.53
<i>Caenis horaria</i>	39	8.23	51.33
Волгоградское водохранилище (ВВ) – 168 проб			
<i>Caenis robusta</i>	53	31.55	91.65
<i>Plea minutissima</i>	21	12.50	87.52
<i>Leptocerus tineiformis</i>	11	6.55	84.64
<i>Cloeon simile</i>	22	13.10	84.43
<i>Laccophilus</i> sp.	13	7.74	82.43
<i>Ilyocoris cimicoides</i>	18	10.71	81.24
Оз. Эльтон (ЭЛ) – 335 проб			
<i>Palpomyia schmidtii</i>	32	9.55	100
<i>Chironomus salinarius</i>	148	44.18	100
<i>Cricotopus salinophilus</i>	210	62.69	99.06
<i>Glyptotendipes salinus</i>	72	21.49	92.33
<i>Gammarus lacustris</i>	46	13.73	83.06
<i>Ephydra</i> sp.	91	27.16	71.80

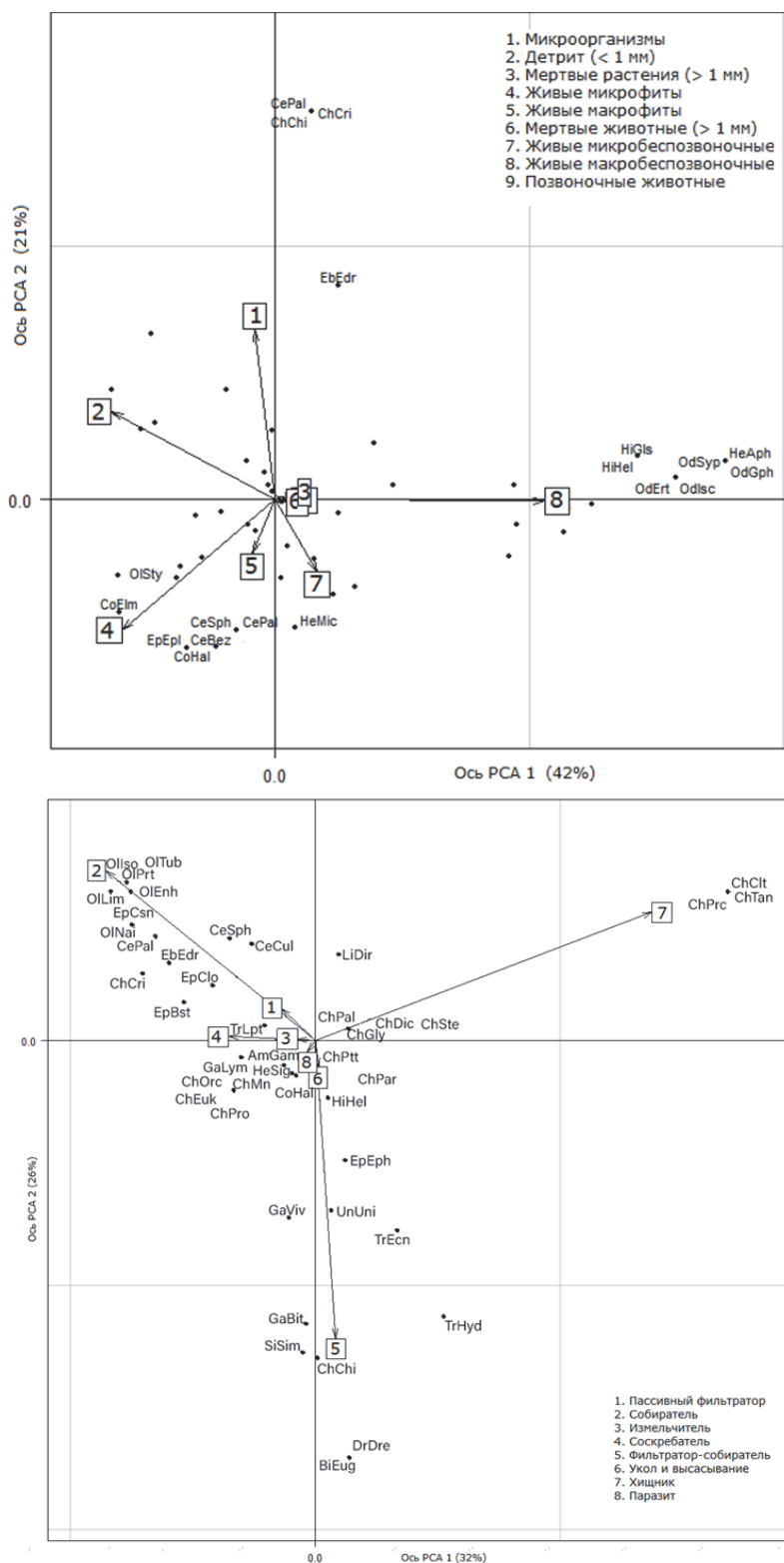
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ главных компонент (РСА) проводили отдельно для модальностей 8 биологических признаков видов, представленных в табл. 1. Примеры ординационных диаграмм для распределений пищевых ресурсов (П) и способов питания (СП) приведены на рис. 1. Полученные графики интерпретировали, исходя из следующих соображений: (а) чем меньше расстояние между точками видов или градаций признаков, тем больше между ними соответствие; (б) чем дальше точки находятся от

центра координат, тем больше их информационная значимость при анализе изменчивости экосистемы.

Для представленных на рис. 1 примеров информационные потери от перехода из многомерного в двумерное пространство достаточно умеренны: главные две оси РСА объясняют около 60% общей дисперсии данных.

Вблизи центра координат каждой диаграмм располагается большое число видов, статистически однородных по питанию, а метки некоторых градаций фактически совпадают и впоследствии могут быть объединены. Например,



**Рис. 1.** Ординация таксонов зообентоса по пищевым ресурсам **П** (а) и способам питания **СП** (б); метки видов включают сокращенное название семейства

(первые 2 символа – см. рис. 2) и рода (градация дается по [20]):

- AmGam* – Gammarus, *BiEug* – Euglesa, *CeCul* – Culicoides, *CePal* – Palpomyia, *CeSph* – Sphaeromias, *ChChi* – Chironomus, *ChCri* – Cricotopus, *ChDic* – Dicotendipes, *ChEuk* – Eukiefferiella, *ChGly* – Glyptotendipes, *ChMnd* – Monodiamesa, *ChOrc* – Orthocladius, *ChPal* – Paralauteborniella, *ChPar* – Paracladopelma, *ChPro* – Prodiamesa, *ChPtt* – Paratanytarsus, *ChSte* – Stempellina, *CoHal* – Haliplus, *DrDre* – Dreissena, *EpBst* – Baetis, *EpClo* – Cloeon, *EpCsn* – Caenis, *EbEdr* – Ephydra, *EpEph* – Ephemera, *GaBit* – Bithynia, *GaLym* – Lymnaea, *GaViv* – Viviparus, *HeSig* – Sigara, *HiHel* – Helobdella, *LiDir* – Dicranota, *OEnh* – Enchytraeus, *OIso* – Isochaetides, *OLim* – Limnodrilus, *OLNai* – Nais, *OLPrt* – Potamothrix, *OLTub* – Tubifex, *SiSim* – Simulium, *TrEcn* – Ecnomus, *TrHyd* – Hydropsyche, *TrLpt* – Leptocerus, *UnUni* – Unio

на рис. 1а четко можно выделить группы видов, питающихся микроорганизмами, детритом, микрофитами и макробеспозвоночными.

Со способами питания (рис. 1б) ситуация сложнее: здесь на фоне общего набора способов питания фактически выделяются только группы хищников и собирателей. Причем группа фильтраторов-собирателей сильно коррелирует (но с обратным знаком) с группой просто собирателей, и здесь, скорее всего, наблюдается эффект «ложного разделения», когда при разработке рубрикатора признаков были выделены две близкие по смыслу градации, а при кодировании данных отнесение к каждой модальности происходило, в значительной мере, случайно.

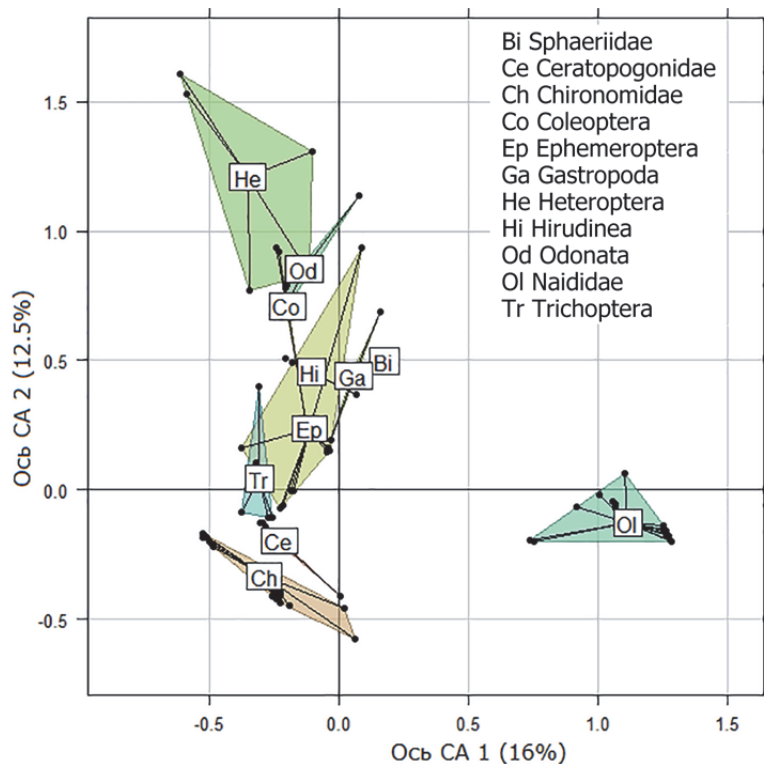
Для оценки корреляционной связи между пищевыми ресурсами и способам питания использовали совместный анализ инерции этих двух ординаций, близость которых оценивали по статистике  $RV = 0.535$ , который является обобщением коэффициента корреляции Пирсона на многомерный случай. Статистическую значимость ( $p = 0.001$ ) выявленной связи проверяли по рандомизационному тесту в ходе 999 итераций.

Нечеткий анализ соответствий FCA проводили на основе всех 72 модальных переменных, описывающих 13 биологических характеристик из табл. 1. Естественно, в таких многомерных условиях выделение ортогональных направлений максимальной вариации данных становится затруднительным – две главных оси объясняют только 28.7% общей инерции, соответствующей нормированной  $\chi^2$ -статистике.

На рис. 2 представлен один из вариантов ординационных диаграмм с объединением точек заданных кластеров. Все множество видов было разбито на таксономические группы и 11 из них представлено в форме почти непересекающихся сегментов. Расстояния между центроидами кластеров интерпретировали как меру различий групп по всей совокупности биологических характеристик.

Положение каждого объекта на диаграмме определяется сложной линейной комбинацией нагрузок всех 72 исходных переменных, поэтому содержательный смысл факторных осей установить сложно. Но построенная модель позволяет установить, какие конкретно переменные в максимальной степени способствуют смещению точек видов от центра координат: (а) на «север», т.е. в направлении возрастания оси ординат – размножение прикрепленными кладками яиц, дыхание через пластрон или дыхальца, питание через укол и высасывание как способы питания хищников; (б) на «юг» – размножение наземными кладками, питание микроорганизмами, нимфа в водной стадии; (в) на «восток» – пассивная фильтрация как способ питания, максимальный размер 4 см и более, бесполое размножение и т.д.

Для оценки корреляционной связи между переменными двух ординаций, на основе 72 биологических и экологических характеристик видов и вероятностях их встречаемости в 5 районах Волжского бассейна, использовали совместный анализ инерции (СИА). В результате получено зна-



**Рис. 2.** Ординация систематических групп зообентоса в редуцированном пространстве 72 биологических признаков

чение многомерного коэффициента корреляции  $RV = 0.196$  между обеими исходными таблицами при высоком уровне парной корреляции между парами главных осей анализируемых ординаций (0.86 и 0.66 соответственно).

На рис. 3 представлена ординационная диаграмма СІА, на которой отличия природно-климатических зон выглядят в соответствии с распределением характерных биотопов и таксонов бентоса.

Несмотря на совместное действие многих факторов, влияющих на их разделение, можно предположить, что для рек лесостепной зоны статистически характерны песчаные грунты (Г1) и олигосапробные сообщества (С1), для рек бассейна Волгоградского водохранилища – размножение кладками на растениях (Р6), а для рек бассейна оз. Эльтон – илистые грунты (Г6) и питание микроорганизмами (П1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлечение биологических характеристик видов, частично представленных в табл. 1, при формировании баз данных началось только в

последние десятилетия, тогда как аутэкологические исследования сообществ гидробионтов имеют более чем 100-летнюю историю. В первую очередь, такие работы применительно к пресноводному бентосу были инициированы скоординированными усилиями французских и голландских ученых по созданию общедоступных баз данных по систематике, биологическим свойствам видов и их чувствительности к приоритетным токсикантам [13].

Настоящая статья рассматривается нами как первый этап выбора адекватного признакового пространства для последующего построения комплексных ординационных и вероятностных моделей формирования видового состава водных экосистем. Результаты выполненного многомерного анализа для большинства фрагментов ординаций (см. рис. 2-3) показывают экологически хорошо объясняемые ассоциации между объектами, хотя общая достигнутая доля инерции и  $RV$ -коэффициент оказались относительно низкими. Одна из причин этого – большое число из 72 задействованных биологических переменных, которые не все в равной степени информативны и создают опре-

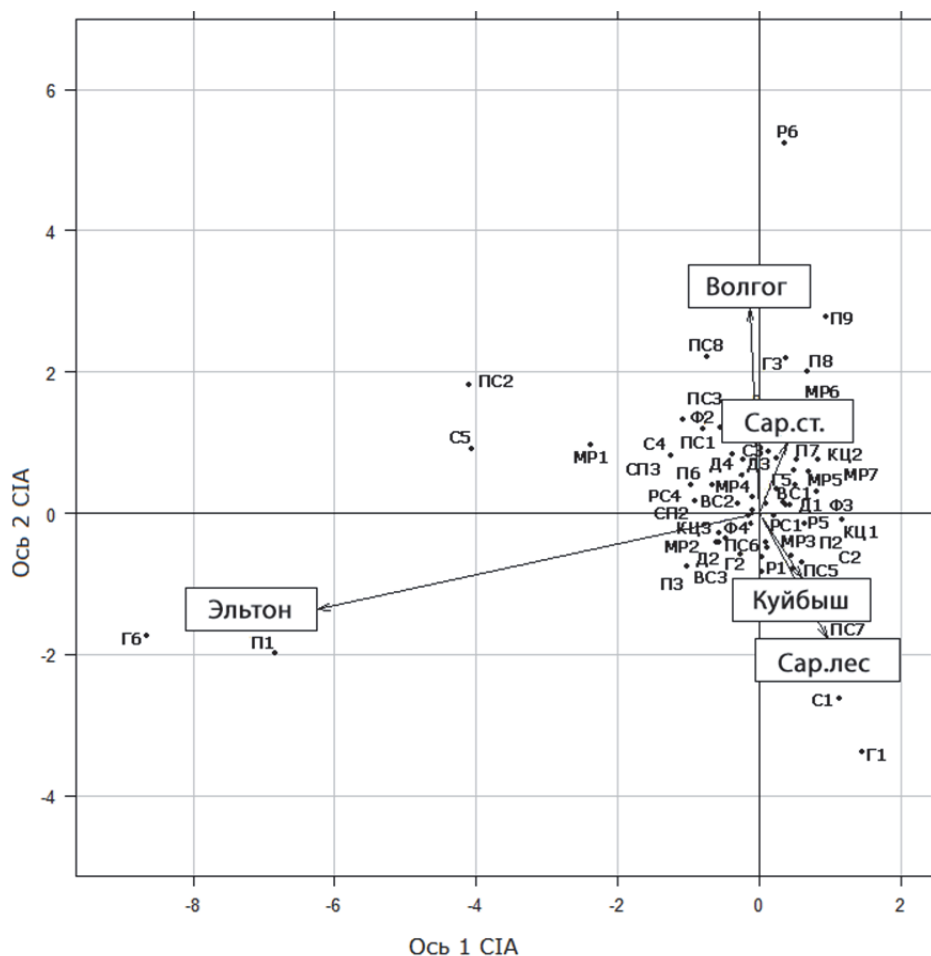


Рис. 3. Совместная ординация бассейнов рек различных водохранилищ и биолого-экологических признаков видов; обозначения меток см. в табл. 1

деленный статистический шум. Решение этой проблемы видится нами в трех направлениях: (а) сокращение числа модальностей отдельных признаков за счет объединения статистически однородных градаций – см. рис. 1; (б) трансформация порядковых качественных переменных к одному числу, например, семь градаций эффективного размера легко свести к обычному среднему значению в мм; (в) устранение тесно коррелируемых признаков и снижение эффекта мультиколлинеарности.

В конечном итоге предметом актуальных экологических исследований является установление и интерпретация связей между абиотическими переменными среды обитания и совокупностью характерных свойств таксономических групп. Для этого необходимо дополнительно привлечение данных экспедиционных наблюдений, фиксирующих комбинации реальной встречаемости видов в различных условиях, а результат может быть реализован в форме моделей пространственного распределения видов [4, 5] или оценок «корреляции четвертого угла» [10].

Для целей биоиндикации перспективна разработка на этой основе экологических шкал. Примером таких шкал из флористических исследований является шкала Элленберга, выполняющая группировку видов по их сродству к увлажнению и засолению почв, pH и содержанию азота, освещенности и термоклиматическим особенностям. К сожалению, сходные общепринятые экологические шкалы в гидробиологии отсутствуют, за исключением системы сапробности Сладачека и отдельных публикаций, включающих экспертные оценки толерантности видов к условиям среды для отдельных групп гидробионтов и географических районов. Мы полагаем, что решение этой проблемы является актуальной задачей гидробиологических исследований, обеспечивающей конечную эффективность биомониторинга и активное использование его результатов в природоохранных целях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 342 с.
2. Головатюк Л.В. Макрозообентос равнинных рек бассейна Нижней Волги в условиях широтно-зонального градиента факторов среды: таксономическая структура и пространственное распределение. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Борок, 2023. 46 с.
3. Зинченко Т.Д. Эколого-фаунистическая характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) малых рек бассейна Средней и Нижней Волги (Атлас). Тольятти: Кассандра, 2011. 258 с.
4. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Модели максимальной энтропии и пространственное распределение донных сообществ Средней и Нижней Волги // Российский журнал прикладной экологии. 2021а. № 2, С. 10–16. DOI: 10.24852/2411-7374.2021.2.10.16.
5. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Модели совместного распределения видов на примере донных сообществ малых рек Волжского бассейна // Журнал общей биологии. 2021b. Т. 82, № 2, С. 143–154. DOI: 10.1134/S2079086422010078
6. Bonada N., Rieradevall M, Prat N. Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network // Hydrobiologia. 2007. V. 589. P. 91–106. DOI 10.1007/s10750-007-0723-5
7. Chevenet F., Dolédec S., Chessel D. A fuzzy coding approach for the analysis of long-term ecological data // Freshwater Biology. 1994. V. 31. P. 295–309.
8. Dolédec S., Statzner B., Bournaud M. Species traits for future biomonitoring across ecoregions: patterns along a human-impacted river // Freshwater Biology. 1999. V. 42. P. 737–758. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1999.00509.x.
9. Dolédec S., Statzner B. Invertebrate traits for the biomonitoring of large European rivers: an assessment of specific types of human impact. Freshw. Biol. 2008. V. 53. P. 617–634. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01924.x.
10. Dray S, Legendre P. Testing the species traits-environment relationships: the fourth-corner problem revisited // Ecology. 2008. V. 89. P. 3400–3412. DOI 10.1890/08-0349.1.
11. Peng F-J., ter Braak C.J.F., Rico A., Van den Brink P.J. Double constrained ordination for assessing biological trait responses to multiple stressors: A case study with benthic macroinvertebrate communities // Science of the Total Environment. 2021. V. 754. P. 142171. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142171.
12. Keddy P.A. A pragmatic approach to functional ecology // Functional Ecology. 1992. V. 6. P. 621–626.
13. Rico A., Van den Brink P.J. Evaluating aquatic invertebrate vulnerability to insecticides based on intrinsic sensitivity, biological traits, and toxic mode of action // Environ. Toxicol. Chem. 2015. V. 34. P. 1907–1917. DOI: 10.1002/etc.3008.
14. Rico A., Van den Brink P.J., Leitner P., Graf W., Focks A. Relative influence of chemical and non-chemical stressors on invertebrate communities: a case study in the Danube River // Sci. Total Environ. 2016. V. 571. P. 1370–1382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.087.
15. Statzner B., Dolédec S., Huguény B. Biological trait composition of European stream invertebrate communities: assessing the effects of various trait filter types // Ecography. 2004. V. 27. P. 470–488.
16. Statzner B., Bonada N., Dolédec S. Conservation of taxonomic and biological trait diversity of European stream macroinvertebrate communities: a case for a collective public database // Biodivers. Conserv. 2007. V. 16. P. 3609–3632. DOI: 10.1007/s10531-007-9150-1
17. Stearns S. The Evolution of Life Histories. London: Oxford University Press, 1992. 249 p.
18. Thioulouse J., Dray S., Dufour A., Siberchicot A., Jombart T., Pavoine S. Multivariate Analysis of Ecological Data with ade4. Springer New York, NY, 2018. 329 p.
19. Thuiller W., Lavorel S., Midgley G., Lavergne S., Rebelo T. Relating plant traits and species distributions



- along bioclimatic gradients for 88 Leucadendron taxa // Ecology. 2004. V. 85. P. 1688–1699.
20. *Townsend C.R., Hildrew A.G.* Species traits in relation to a habitat templet for river systems // Freshwater Biology. 1994. V. 31. P. 265–275.
21. *Usseglio-Polatera P., Bournaud M., Richoux P., Tachet H.* Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates: relationships and definition of groups with similar traits // Freshwater Biology. 2000. V. 43. P. 175–205.

## USING ZOOBENTHOS BIOLOGICAL PROPERTY DATABASES TO ANALYZE ECOLOGICAL STRUCTURE OF BENTHIC COMMUNITIES IN MIDDLE AND LOWER VOLGA RIVERS

© 2024. V.K. Shitikov<sup>1</sup>, T.D. Zinchenko<sup>1</sup>, E.V. Abrosimova<sup>1</sup>, L.V. Golovatyuk<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup> Samara Federal Research Scientific Center RAS,  
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia  
<sup>2</sup> I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences  
E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru

The prospects of using a database of biological properties of macrozoobenthos species, developed by Western European ecologists, for modeling the distribution of benthic communities in the Middle and Lower Volga basins are considered. Using multivariate methods, ordination diagrams for 135 taxa of zoobenthos in the space of 72 biological and ecological characteristics were constructed and analyzed. A statistically significant correlation between species properties and the frequency distribution of taxa across 5 reservoirs and natural climatic zones has been demonstrated. Methods to transform the initial set of characteristics into a more compact and informative form have been analyzed, primarily by identifying the optimal set of qualitative feature gradations. After such optimization and considering a number of important regional factors, it is planned to use the database for interpreting the relationships between abiotic variables and the collective properties of individual taxonomic groups, forming ecological scales, and creating comprehensive models of the joint distribution of species.

*Keywords:* freshwater benthos, Volga River basin, species properties, correspondence analysis, co-inertia analysis

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-5-174-183

EDN: YDTZGE

### REFERENCES

1. *Alimov A.F., Bogatov V.V., Golubkov S.M.* *Produkcionnaya gidrobiologiya* [Production hydrobiology]. Spb.: Nauka, 2013. 342 s.
2. *Golovatyuk L.V.* Makrozoobentos ravninnyh rek bassejna Nizhnej Volgi v usloviyah shirotno-zonal'nogo gradienta faktorov sredy: taksonomicheskaya struktura i prostranstvennoe raspredelenie [Golovatyuk L.V. Macrozoobenthos of lowland rivers of the Lower Volga basin under conditions of a latitudinal-zonal gradient of environmental factors: taxonomic structure and spatial distribution. Avtoref. dis. ... doct. biol. sciences. Borok, 2023. 46 p.]. Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. Borok, 2023. 46 s.
3. *Zinchenko T.D.* Ekologo-faunisticheskaya harakteristika hironomid (Diptera, Chironomidae) malyh rek bassejna Srednej i Nizhnej Volgi (Atlas) [Ecological and faunal characteristics of chironomids (Diptera, Chironomidae) of small rivers of the Middle and Lower Volga basin (Atlas)]. Togliatti: Cassandra, 2011. 258 p.
4. *Shitikov V.K., Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V.* Modeli maksimal'noj entropii i prostranstvennoe raspredelenie donnyh soobshchestv Srednej i Nizhnej Volgi [Maximum entropy models and spatial distribution of bottom community species on the territory of the Middle and Lower Volga region] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii. 2021. № 2, S. 10–16. DOI: 10.24852/2411-7374.2021.2.10.16.
5. *Shitikov V.K., Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V.* Modeli sovместnogo raspredeleniya vidov na primere donnyh soobshchestv malyh rek Volzhskogo bassejna // Zhurnal obshchej biologii. 2021. T. 82, № 2, S. 143–154. [Models of Joint Distribution of Species on the Example of Benthic Communities from Small Rivers of the Volga Basin // Biology Bulletin Reviews, 2022, V. 12, No. 1. P. 84–93. DOI: 10.1134/S2079086422010078].
6. *Bonada N., Rieradevall M, Prat N.* Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network // Hydrobiologia. 2007. V. 589. P. 91–106. DOI 10.1007/s10750-007-0723-5
7. *Chevenet F., Dolédec S., Chessel D.* A fuzzy coding approach for the analysis of long-term ecological data // Freshwater Biology. 1994. V. 31. P. 295–309.
8. *Dolédec S., Statzner B., Bournaud M.* Species traits for future biomonitoring across ecoregions: patterns along a human-impacted river // Freshwater Biology. 1999. V. 42. P. 737–758. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1999.00509.x.
9. *Dolédec S., Statzner B.* Invertebrate traits for the biomonitoring of large European rivers: an assessment of specific types of human impact. Freshw. Biol. 2008. V. 53. P. 617–634. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01924.x.

10. Dray S, Legendre P. Testing the species traits-environment relationships: the fourth- corner problem revisited // Ecology. 2008. V. 89. P. 3400–3412. DOI 10.1890/08-0349.1.
11. Peng F-J., ter Braak C.J.F., Rico A., Van den Brink P.J. Double constrained ordination for assessing biological trait responses to multiple stressors: A case study with benthic macroinvertebrate communities // Science of the Total Environment. 2021. V. 754. P. 142171. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142171.
12. Keddy P.A. A pragmatic approach to functional ecology // Functional Ecology. 1992. V. 6. P. 621–626.
13. Rico A., Van den Brink P.J. Evaluating aquatic invertebrate vulnerability to insecticides based on intrinsic sensitivity, biological traits, and toxic mode of action // Environ. Toxicol. Chem. 2015. V. 34. P. 1907–1917. DOI: 10.1002/etc.3008.
14. Rico A., Van den Brink P.J., Leitner P., Graf W., Focks A. Relative influence of chemical and non-chemical stressors on invertebrate communities: a case study in the Danube River // Sci. Total Environ. 2016. V. 571. P. 1370–1382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.087.
15. Statzner B., Dolédec S., Hugueny B. Biological trait composition of European stream invertebrate communities: assessing the effects of various trait filter types // Ecography. 2004. V. 27. P. 470–488.
16. Statzner B., Bonada N., Dolédec S. Conservation of taxonomic and biological trait diversity of European stream macroinvertebrate communities: a case for a collective public database // Biodivers. Conserv. 2007. V. 16. P. 3609–3632. DOI: 10.1007/s10531-007-9150-1
17. Stearns S. The Evolution of Life Histories. London: Oxford University Press, 1992. 249 p.
18. Thioulouse J., Dray S., Dufour A., Siberchicot A., Jombart T., Pavoine S. Multivariate Analysis of Ecological Data with ade4. Springer New York, NY, 2018. 329 p.
19. Thuiller W., Lavorel S., Midgley G., Lavergne S., Rebelo T. Relating plant traits and species distributions along bioclimatic gradients for 88 Leucadendron taxa // Ecology. 2004. V. 85. P. 1688–1699.
20. Townsend C.R., Hildrew A.G. Species traits in relation to a habitat templet for river systems // Freshwater Biology. 1994. V. 31. P. 265–275.
21. Usseglio-Polatera P., Bournaud M., Richoux P., Tachet H. Biological and ecological traits of benthic freshwater macroinvertebrates: relationships and definition of groups with similar traits // Freshwater

---

Vladimir Shitikov, Doctor of Biological Sciences.

Tatiana Zinchenko, Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Biodiversity. E-mail: zinchenko.tdz@yandex.ru.

Elina Abrosimova, Engineer at the Laboratory of Biodiversity. Larisa Golovatyuk, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Biodiversity, Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences; Senior Researcher at the Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences.