

УДК 574.55.639.313

doi:10.21685/2307-9150-2021-1-6

Зоопланктонные сообщества в новом и старом руслах р. Суры на территории г. Пензы

Ю. А. Пастухова¹, Т. Г. Стойко², Д. Г. Смирнов³,
А. А. Флягин⁴, Е. А. Ембулаева⁵

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{4,5}ООО «Горводоканал», Пенза, Россия

¹yuliya.pastukhova.98@mail.ru, ²tgstojko@mail.ru, ³eptesicus@mail.ru,

⁴flyagman@yandex.ru, ⁵ltkosk@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Река Сура в г. Пензе и ее окрестностях с 1942–1943 гг. испытала значительное естественное и антропогенное (строительство плотин) воздействие, что вызвало изменение ее русла. В ходе естественного меандрирования образовалась протока, которая после прорыва в 1945 г. плотины стала основным руслом, а старая Сура превратилась в старицу. В 1970 г. после создания выше города Пензенского водохранилища состояние водотока и прилежащих к нему водоемов еще больше изменилось, равно как и состав населяющих их гидробионтов. На гидрологический режим Суры определенное влияние оказывает и созданное в 1959 г. водохранилище у ТЭЦ-1. Таким образом, за прошедшие 75 лет сформировались отдельные водные экосистемы двух русловых водотоков Суры, сходство и различие которых можно оценить по особенностям присутствующих в них зоопланктонных сообществ. *Цель работы* – изучить зоопланктонные сообщества в новом и старом руслах реки Суры, выявить ключевые факторы и их влияние на формирование структуры этих сообществ. *Материалы и методы.* Материалом для исследования послужили пробы зоопланктона, взятые в современном русле р. Суры на семи станциях: в районе с. Засечное (I), до впадения (IIa) и после впадения (IIб) р. Мойки, до впадения (IIIa) и после впадения (IIIб) р. Кашаевки, за плотиной ТЭЦ-1 (IV), после очистных сооружений (V), а также в старом русле на восьми станциях: в протоке Барковки (ПБ1 и ПБ2), отстойнике (О), старичном озере Алтарка (А1, А2), в микро-районе Ахуны в р. Старая Сура (СС) и в двух старичных озерах: Калашный Затон (КЗ) и Старица Подковка (ССП). Всего обработано по общепринятым методикам 55 проб, которые отбирали ежемесячно в весенне-летний период 2020 г. Физико-химические параметры среды анализировали по пробам воды, отобраным в августе 2020 г. *Результаты.* Всего в сообществах зоопланктона обнаружено 82 вида. Самое высокое число видов отмечено на одной из станций современного русла р. Суры, а самое низкое – в водотоках стариц. По структурным параметрам (численность, число видов, их встречаемость, доля доминантных видов) сообщества зоопланктона р. Суры на станциях вблизи плотины ТЭЦ-1 значительно отличаются по сравнению с другими пунктами отбора проб на реке. Причина связана с превращением водотока на этом участке в водохранилище, т.е. со значительным снижением проточности реки. В августе на станциях разнотипных водных объектов в старом русле р. Суры pH воды и содержание таких компонентов, как NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , БПК₅, взвешенные вещества и жесткость воды – ниже, чем в новом русле. Самые высокие значения этих параметров в р. Суре на станциях IV, V обусловлены аккумуляцией загрязняющих веществ, поступающих в водоток в черте города и непосредственно в местах их расположения. Статистически значимыми оказались зависимости обилия 11 из 18 видов доминантов

от 19 параметров среды. Показатели численности индикаторных видов и структурных параметров сообществ зоопланктона свидетельствуют о загрязненности исследуемых водных объектов и характеризуют их как мезотрофные и эвтрофные. *Выводы.* Отличия зоопланктонных сообществ нового и старого русел р. Суры обусловлены разным гидрологическим режимом (скорость течения, зарастаемость и пр.) и антропогенным воздействием. В старом русле, а также на последней станции р. Суры в связи с замедленным течением и накоплением органических веществ в результате отмирания высшей водной растительности, многочисленных водорослей, а также поступления органики особенности зоопланктонных сообществ указывают на переход водных объектов от мезотрофного к эвтрофному типу.

Ключевые слова: водные объекты, зоопланктонные сообщества, коловратки, ветвистоусые и веслоногие ракообразные, доминанты, мезотрофный, эвтрофный

Для цитирования: Пастухова Ю. А., Стойко Т. Г., Смирнов Д. Г., Флягин А. А., Ембулаева Е. А. Зоопланктонные сообщества в новом и старом руслах р. Суры на территории г. Пензы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 1. С. 57–73. doi:10.21685/2307-9150-2021-1-6

Zooplankton communities in the new and old Sura riverbeds in Penza

Yu.A. Pastukhova¹, T.G. Stojko², D.G. Smirnov³,
A.A. Flyagin⁴, E.A. Embulaeva⁵

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

^{4,5}“Gorvodokanal” LLC, Penza, Russia

¹yuliya.pastukhova.98@mail.ru, ²tgstojko@mail.ru, ³eptesicus@mail.ru,

⁴flyagman@yandex.ru, ⁵ltkosk@bk.ru

Abstract. Background. The Sura River in Penza and its vicinity undergo significant natural and anthropogenic (dam construction) impacts in 1942–1943, which caused a change in the riverbed. In the course of its natural meandering a channel was formed, which has become the main in 1945 after the breakthrough of water through the hydroconstruction, and the old Sura turned into the former riverbed. In 1970, after the creation of the Penza reservoir above the city, the state of the watercourse and adjacent reservoirs, as well as the hydrobionts inhabiting them, changed even more. The river regime is also affected by the reservoir created in 1959 at Heat Electropower Station-1. Over the past 75 years, aquatic ecosystems have been formed, the similarities and differences of which can be studied on the example of zooplankton communities that respond quickly to changes in the environment. The aim of the work is to study zooplankton communities in the new and old riverbeds of the Sura River, as well as to identify key factors and their possible influence on the formation of the structure of these communities. *Materials and methods.* Material for the study consists of zooplankton samples taken in the modern channel of the Sura river 7 stations: in village Zasechnoe of (I) to the confluence (IIa) and after the confluence (IIb) of the Moyka river, to the confluence (IIIa) and after the confluence (IIIb), Kashaevka river, behind the dam of Heat Electropower Station-1 (IV), after sewage treatment plant (V), and in the old riverbed at 8 stations: flow Barkovki (PB1 and PB2), sedimentation tank (O), oxbow lake Altarca (A1, A2), in the Akhuny microdistrict in the Staraya Sura river (SS) and two oxbow lakes: Kalashny Zaton (KZ) and the Podkovka oxbow (SSP). In total, 55 samples were processed according to generally accepted methods, which were taken monthly in the spring-summer period of 2020. The physicochemical parameters of the environment were analyzed in August. *Results.* Totally 82 species have been found in zooplankton communities. The highest number of species was recorded at one of the stations of the modern Sura

riverbed Sura, and the lowest – in the Staritsa watercourses. According to structural parameters (population, number of species, their occurrence, proportion of dominant species), the zooplankton communities of the Sura River at stations near the Heat Electropower Station-1 dam are significantly different compared to other sampling points on the river. The reason is due to the transformation of the watercourse in this area into a reservoir, i.e. with a significant decrease in the flow of the river due to the construction of the dam. The pH of water and the content of such components as NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , BOC_5 , suspended substances and water hardness are lower than in the new riverbed in August at stations of different types of water bodies in the old riverbed of the Sura River. The highest values of these parameters in the Sura River at stations IV, V are due to the accumulation of pollutants entering the watercourse within the city and directly at their locations. The dependences of the abundance of 11 of the 18 dominant species on 19 environmental parameters were statistically significant. Parameters of the indicator species number and structural parameters of zooplankton communities indicate the contamination of the studied water bodies and characterize them as mesotrophic and eutrophic. *Conclusions.* Differences in zooplankton communities of the new and old Sura River beds are due to different regimes (flow rate, overgrowth, etc.) and anthropogenic impact. In the old riverbed, as well as at the last station of the Sura River, due to the slow flow and accumulation of organic substances as a result of the death of vascular vegetation, numerous algae, as well as the arrival of organic matter, zooplankton communities indicate the transition of water bodies from mesotrophic to eutrophic type.

Keywords: water bodies, zooplankton communities, Rotifera, Cladocera and Copepoda, dominants, mesotrophic, eutrophic

For citation: Pastukhova Yu.A., Stojko T.G., Smirnov D.G., Flyagin A.A., Embulaeva E.A. Zooplankton communities in the new and old Sura riverbeds in Penza. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki* = *University proceedings. Volga region. Natural sciences*. 2021;1:57–73. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-1-6

В настоящее время трудно найти водные объекты, которые в той или иной степени не испытывали бы различного рода воздействия (естественные, антропогенные) и не подвергались структурным изменениям ее компонентов. Для речных систем такие преобразования связаны с деформацией, или смещением русловой части, что приводит к обязательным перестройкам гидрологического режима и общего состояния гидробиоты. На территории Пензенской области с 1942 г. в результате строительства плотин таким воздействием была подвержена р. Сура в окрестностях г. Пензы. При развитии процесса меандрирования образовалась протока, которая после прорыва плотины в 1945 г. стала основным руслом, а старая Сура превратилось в старицу. В 1970 г. выше города было создано Пензенское водохранилище. Его строительство еще более повлияло на состояние как основного водотока, так и прилежащих к нему водоемов, а также гидробионтов их населяющих. На гидрологический режим Суры определенное влияние оказывает и созданное в 1959 г. водохранилище у ТЭЦ-1.

Зоопланктонные сообщества являются одними из важнейших компонентов экосистем водоемов и водотоков. Они играют большую роль в процессах биологического самоочищения и круговорота веществ и являются одними из индикаторов состояния среды. Общеизвестно, что сообщества зоопланктона являются динамичными системами, которые быстро реагируют на происходящие изменения среды. Используя информацию о времени масштабных изменений и перестройки реки, имеется уникальная возможность

изучить результат 75-летнего развития сообществ зоопланктона в близко расположенных, но разных водотоках р. Суры.

Цель работы – изучить зоопланктонные сообщества в новом и старом руслах р. Суры, выявить ключевые факторы и их влияние на формирование структуры этих сообществ.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы зоопланктона, взятые в современном и старом руслах р. Суры (рис. 1). В р. Суре зоопланктон взят на семи станциях (с юга на север): в районе с. Засечное (I), до впадения (IIa) и после впадения (IIб) в нее р. Мойки, до впадения (IIIa) и после впадения (IIIб) р. Кашаевки, за плотиной ТЭЦ-1 (IV), после очистных сооружений (V). Река Мойка в низовьях заключена в прямоугольный коллектор, диаметром около 1,8 м. Русло реки очень сильно заилено и в него сбрасывают сточные воды. Река Кашаевка в черте г. Пензы заключена в коллектор длиной 3,7 км, (высотой 2,5 м и шириной 3–4 м). Из этой реки в р. Суру попадают все виды сточных вод. На участке р. Суры вблизи плотины ТЭЦ-1 гидрологический режим изменен. По мнению некоторых исследователей, строительство этой плотины привело к образованию вверх по течению так называемого «городского водохранилища» длиной 13 км [1, 2].

В старом русле пробы ($n = 8$) отбирали в небольших водотоках и старичных водоемах. Исследовали две протоки (ПБ1 и ПБ2) в микрорайоне Барковка: отстойник (О) и старичное озеро Алтарка (A1, A2). Ниже по течению на расстоянии 2,5 км в микрорайоне Ахуны пробы отбирали в р. Старая Сура (СС) и в двух старичных озерах: Калашный Затон (КЗ) и Старица Подковка (ССП). Последнее до 90-х годов прошлого века использовалось для сброса сточных (канализационных) вод микрорайона Ахуны.

Поверхностную воду объемом 100 л (на р. Суре) и 30 л (на старичных водных объектах) процеживали через сеть Апштейна (размер ячеек 67 мкм). Пробы фиксировали 4 %-м формалином. Зоопланктон подсчитывали в камере Богорова обычным счетным методом [3]. Организмы идентифицировали с использованием книги «Определитель зоопланктона.., 2010» [4]. Всего обработано по общепринятым в гидробиологии методам 55 проб, которые отбирали в весенне-летний период 2020 г. На каждой станции измеряли температуру воды, а также визуально учитывали особенности прибрежной и водной растительности, скорость течения.

Для характеристики зоопланктонных сообществ использовали такие показатели, как численность (тыс. экз./м³), число видов, их встречаемость (отношение числа проб, где вид был обнаружен, к общему числу проб), трофические и топические характеристики [5]. Доминантными считали виды, доля которых от общей численности организмов в пробе превышала уровень 10 % [6]. Для выявления сходства сообществ зоопланктона по видовому составу и структуре использован кластерный анализ (метод среднего присоединения) на основе матрицы индекса сходства Раупа – Крика. На основе анализа таксономической структуры зоопланктона дана характеристика трофического статуса водных объектов с использованием показателя коэффициента трофии [7].

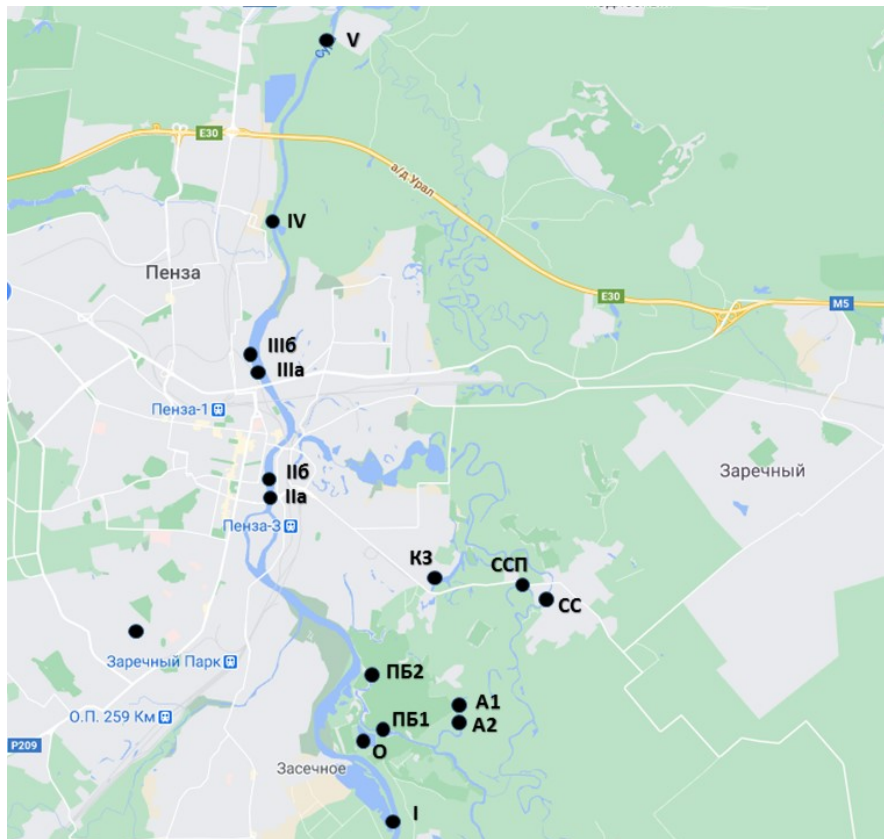


Рис. 1. Станции взятия проб. Новое русло р. Суры: в районе с. Засечное (I), до впадения (IIa) и после впадения (IIб) в нее р. Мойки, до впадения (IIIa) и после впадения (IIIб) в нее р. Кашаевки, за плотиной ТЭЦ-1 (IV), после очистных сооружений (V). Старое русло: протоки Барковки (ПБ1 и ПБ2), отстойник (О), старичное озеро Алтарка (A1, A2), р. Старая Сура (СС) и два старичных озера: Калашный Затон (КЗ) и Старица Подковка (ССП)

В августе одновременно со всех станций были взяты пробы воды на гидрохимический анализ, который проводили согласно общепринятым руководствам [8, 9]. Определение общей щелочности (ммоль/дм^3), общей жесткости ($^{\circ}\text{Ж}$), а также содержания хлоридов (Cl^-) (мг/дм^3), сульфатов (SO_4^{2-}) (мг/дм^3), алюминия (мг/дм^3), кальция (Ca^{2+}) (мг/дм^3) и БПК₅ (мг/дм^3) проводили с помощью титриметрических методов. Потенциометрический метод использовали для измерения водородного показателя (ед. pH) и содержания фторидов (F^-) (мг/дм^3). Содержание ионов аммония (NH_4^+) (мг/дм^3), общего железа (мг/дм^3), нитратов (NO_3^-) (мг/дм^3), нитритов (NO_2^-) (мг/дм^3), марганца (мг/дм^3) проводили фотометрическим методом. Гравиметрический метод применяли для измерения содержания взвешенных веществ (взвеш.) (мг/дм^3).

С целью установления сходства объектов исследования по физико-химическим свойствам применяли иерархический кластерный анализ с использованием алгоритма невзвешенного парного сравнения на основе арифметического среднего (UPGMA) и дистанции Эвклида. Для классификации водных объектов по отношению к физическим и химическим показателям среды и численности видов проводили статистическую ординацию их

показателей методом главных компонент. Критерием для правильности определения объема факторного пространства служили собственные значения факторов. Вклады показателей оценивали по величине факторных нагрузок, которые были коэффициентами чувствительности переменной к координате.

Структуру распределения видов по отношению к водным объектам изучали с помощью анализа соответствия. В качестве критерия проверки значимости связи переменными «вид» и «станция» использовали непараметрический критерий Пирсона (χ^2). По значениям критерия χ^2 и количества наблюдений определяли инерцию, которую использовали при описании видовых предпочтений.

Зависимость между изменениями численности видов и основными физико-химическими параметрами среды устанавливали по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена (R_s).

Данные обрабатывали с помощью программ MS Excel 2010 и Past 2.15 [10].

Результаты и обсуждение

В ходе исследования обнаружено 82 вида зоопланктонных организмов: Rotifera – 42, Cladocera – 28 и Copepoda – 12. Почти на всех станциях (73 %) отмечены ветвистоусые ракообразные *Scapholeberis mucronata*, *Chydorus sphaericus* и коловратки *Lecane bulla*, *Euchlanis dilatata*, последняя отсутствует на станциях КЗ, ССП, СС, ПБ1, а также *Synchaeta tremula*, предпочитающая в основном проточные водные объекты (все станции р. Сура, р. Старая Сура и проток на Барковке). Повсеместная встречаемость отмечена у *Rotaria* sp., копеподных личинок и науплиев веслоногих ракообразных. 18 видов зоопланктона обнаружено только в р. Сура и 22 – только в старом русле. Их относительное обилие не превышало 20 %.

Наибольшее число видов зоопланктона отмечено на станции, расположенной ниже впадения загрязненной р. Кашаевки (ШБ), а самое низкое – на водотоках в Барковке (ПБ1 и ПБ2) (рис. 2,а). Почти на всех станциях водотоков зоопланктонные сообщества характеризуются низкой численностью (13–54 тыс. экз./м³) (рис. 2,б). В то же время в старичных озерах (КЗ и ССП) она была значительно выше (164–417 тыс. экз./м³).

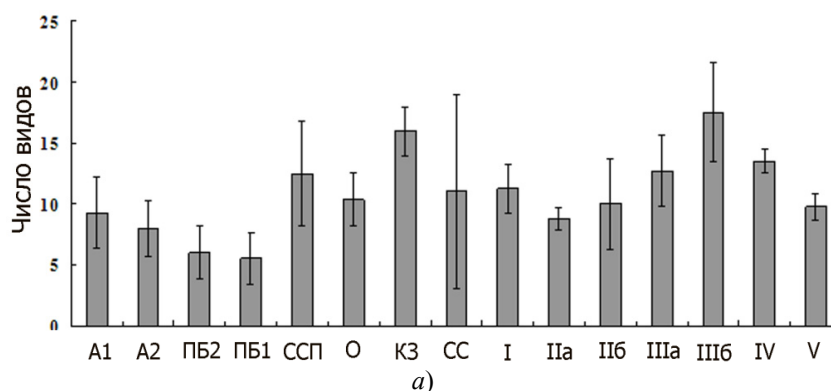


Рис. 2. Среднее число видов (а) и численность зоопланктонных организмов, тыс. экз./м³ (б) в сообществах исследуемых водотоков (I, IIa, IIб, IIIa, IIIб, IV, V) и старичных озер (A1, A2, ПБ1, ПБ2, ССП, О, КЗ, СС). Обозначения станций такие же, как и на рис. 1 (начало)

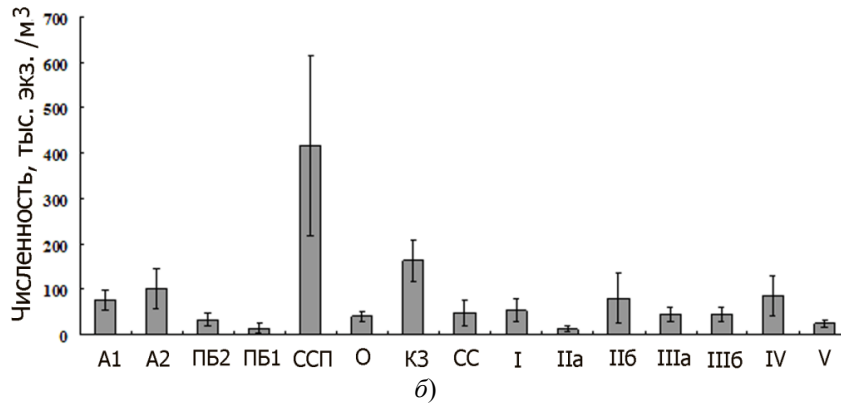


Рис. 2. Среднее число видов (а) и численность зоопланктонных организмов, тыс. экз./м³ (б) в сообществах исследуемых водотоков (I, IIa, IIб, IIIa, IIIб, IV, V) и старичных озёр (A1, A2, ПБ1, ПБ2, ССП, О, КЗ, СС).
Обозначения станций такие же, как и на рис. 1 (окончание)

Анализ видовой структуры показал, что по индексу разнообразия Раупа – Крика сообщества разделились на две группы, отличающиеся между собой более чем на 55 % (рис. 3). В первую группу включены все речные сообщества нового русла р. Суры, а также отличающееся на 36 % сообщество из старого русла (озеро ССП).

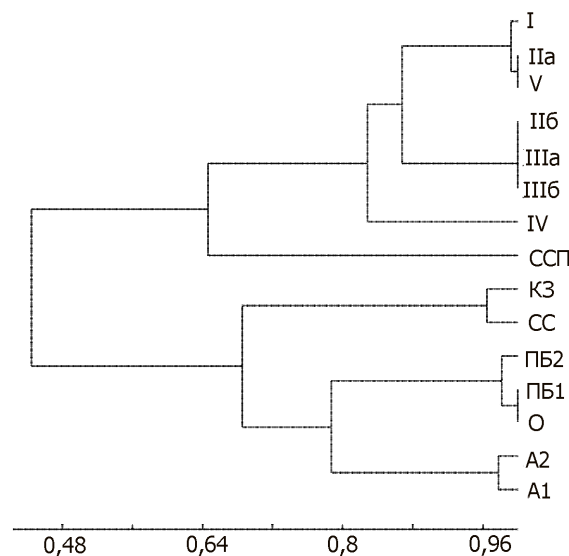


Рис. 3. Сходство видового состава зоопланктонных сообществ водных объектов (индекс Раупа – Крика) экосистемы р. Суры.
Обозначения станций такие же, как на рис. 1.

Вторая группа объединяет сообщества зоопланктона из станций, находящихся в микрорайонах Барковка и Ахуны. При этом ахунские и барковские сообщества разделились на две подгруппы. В каждой из них отмечено структурное сходство кластеров по распределению проточных и стоячих водоемов,

несмотря на различия их гидрофизических свойств. Возможно, это связано с территориальной близостью этих объектов и возможным обменом гидробионтами на близко расположенных участках.

Оценка качества воды

В связи с тем, что зоопланктеры чувствительны к состоянию среды, была проведена оценка трофического статуса и уровня загрязнения этих водных объектов. В списке выявленных зоопланктеров отмечено 54 вида-индикатора.

Согласно коэффициенту трофии (табл. 1) водоемы, на которых расположены станции ПБ1, ПБ2, ССП, О и V, соответствуют эвтрофному типу, а воду в них можно определить как «грязная». На высокое содержание органических веществ в этих водоемах указывает обильное развитие водной, околоводной растительности и накопление их остатков на дне. На станции ССП такая повышенная аккумуляция органики связана также с использованием водоема для сброса сточных (канализационных) вод из микрорайона Ахуны. Вблизи станций ПБ1 и ПБ2 расположены участки частного сектора, с которых органика с дождевыми стоками поступает в водоток. На V станции в р. Суру поступает вода из города после очистных сооружений, которая также содержит большое количество органических веществ. Остальные водные объекты по коэффициенту трофии соответствуют мезотрофному типу, а вода в них характеризуется как «умеренно чистая».

Таблица 1

Коэффициенты трофии (Е) водных объектов экосистемы р. Суры, полученные по результатам исследований зоопланктонных сообществ

A1	A2	ПБ2	ПБ1	ССП	О	КЗ	СС	I	IIa	IIб	IIIa	IIIб	IV	V
0,48	0,40	1,77	1,80	1,08	1,08	0,46	0,26	0,38	0,48	0,36	0,65	0,60	0,89	1,25

Примечание. Обозначения станций такие же, как и на рис. 1. Жирным шрифтом выделены эвтрофные значения.

В начале августа, когда сообщества зоопланктона достаточно развиты, были проведены исследования зависимости их структурных показателей с физико-химическими параметрами среды обитания.

По отношению к химическим и физическим факторам среды все станции, на которых отбирали пробы, на 15 %-м уровне различий эвклидовых дистанций разделены на три кластера (рис. 4,а). Первый объединяет станции р. Суры – I, IIa, IIб, IIIa и IIIб. Второй кластер включает станции старого русла реки – ПБ2, A2, СС, ПБ1, КЗ и О. С этим же кластером объединяется территориально близко расположенная станция A1. Однако она имеет с кластерной группой различия, превышающие 15 %-й уровень, поэтому должна рассматриваться отдельно. Третий включает станции р. Суры, расположенные ниже по течению – IV и V. Наконец, максимальную дистанцию (>90 %) от всех имеет станция ССП, которая характеризуется крайне высоким содержанием в воде ионов хлора.

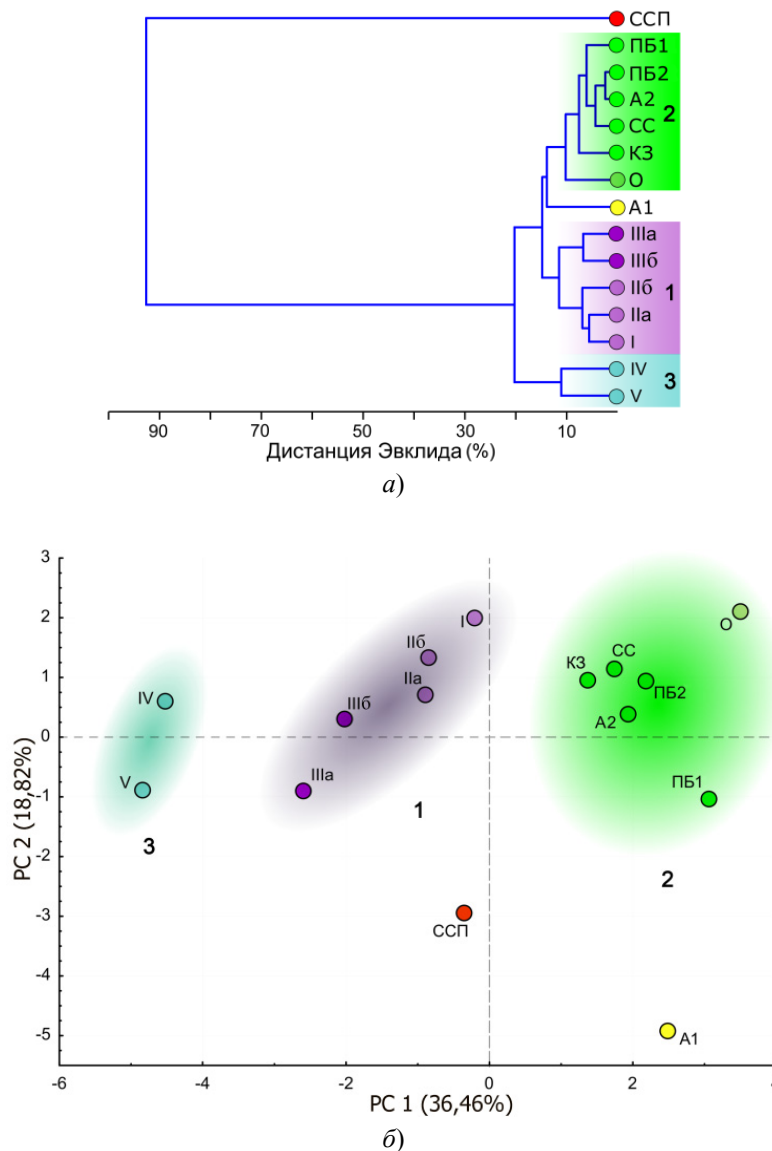


Рис. 4. Результаты классификации станций по физическим и химическим показателям среды, полученные при единовременном взятии проб в августе 2020 г.:
a – кластерный анализ; *б* – анализ главных компонент (облака вокруг точек – эллипсы рассеивания). Цифрами обозначены кластеры и соответствующие им эллипсы рассеивания: 1 – станции I, IIa, IIб, IIIa и IIIб; 2 – ПБ2, А2, СС, ПБ1, КЗ, О; 3 – IV и V. Обозначения станций такие же, как и на рис. 1

Выделенные в процессе кластеризации группы хорошо согласуются с результатами анализа главных компонент (рис. 4,б). Данные по станциям сравнительно хорошо факторизуются (первые две латентные переменные описывают 55,3 % общей дисперсии), что свидетельствует об имеющихся между ними статистических различий по физическим и химическим показателям. В пространстве первых двух главных компонент станции делятся на те же три хорошо обособленных группы. Их дифференциация в основном

происходит по первой компоненте (собственное число – 6,9), которая отрицательно максимально скоррелирована с показателями pH, NO_2^- , NO_3^- , БПК₅, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , взвеш. и °Ж (табл. 2).

Таблица 2

Факторные нагрузки показателей среды в анализе главных компонент (PC1, PC2), полученных на основе единовременного взятия проб в августе 2020 г.

Компоненты	T °C	mS	ppt	pH	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	БПК ₅	Взвеш.	Ca^{2+}
PC1	–0,295	–0,514	–0,557	–0,738	–0,463	–0,810	–0,911	–0,784	–0,710	–0,848
PC2	0,415	–0,367	–0,407	0,535	–0,480	0,019	0,242	–0,341	–0,360	–0,143

Компоненты	SO_4^{2-}	Cl^-	Fe_2 и Fe_3	F^-	Mn	Щел	°Ж	Al	O_2
PC1	–0,726	–0,148	0,196	–0,161	0,436	–0,555	–0,840	0,095	–0,597
PC2	0,478	–0,402	–0,815	–0,640	–0,531	–0,180	–0,245	0,418	0,498

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения факторов, имеющие наибольшую нагрузку при классификации объектов. Принятые сокращения: температура (T °C), электропроводность (mS), жесткость (ppt), водородный показатель (ед. pH); содержание в мг/дм³: ионы аммония (NH_4^+), нитриты (NO_2^-), нитраты (NO_3^-), БПК₅, взвешенные вещества (Взвеш.), кальций (Ca^{2+}), сульфаты (SO_4^{2-}), хлориды (Cl^-), общее железо (Fe_2 и Fe_3), фториды (F^-), марганец (Mn), алюминий (Al), растворенный кислород (O_2); жесткость (°Ж), щелочность (Щел) моль/дм³.

Распределение станций по первой компоненте показывает, что те из них, которые относятся ко второму кластеру, имеют наименьшие значения этих показателей, а к третьему – наибольшие. Вторая главная компонента (собственное число – 3,6) показывает структурированность факторного пространства относительно содержания в воде окисленного железа, где наибольшие его значения отмечены на станциях А1 и ССП.

По видовому составу зоопланктонные сообщества делятся на два больших кластера (рис. 5). Первый включает те из них, которые были обнаружены в водоемах, где вода имеет низкие значения pH, NO_2^- , NO_3^- , БПК₅, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , взвеш. и °Ж. Наибольшее сходство здесь демонстрируют сообщества ПБ1, ПБ2, ССП и СС, а самым специфическим является – КЗ. Второй кластер объединяет сообщества станций, где значения перечисленных выше химических показателей, наоборот, завышены. Однако и в этом случае отмечается разделение кластера на две хорошо различимые по видовому составу группы. Одна из них включает станции Па и ПБ, другая – Пб и Ша, I, V и IV.

Распределение видов по типам станций наиболее точно иллюстрирует анализ соответствия (рис. 6). В ходе стандартизации данных между переменными *доминантный вид – станция* выявлена достаточно сильная связь ($\chi^2 = 1589$, $df = 238$, $p < 0,001$), поэтому она может использоваться как анализирующая при описании предпочтений. В пространстве полученных размерностей все виды группируются согласно своим ассоциациям к соответствующим станциям. Наибольший вклад в статистику χ^2 Пирсона дает первая размерность, объясняющая 28 % инерции.

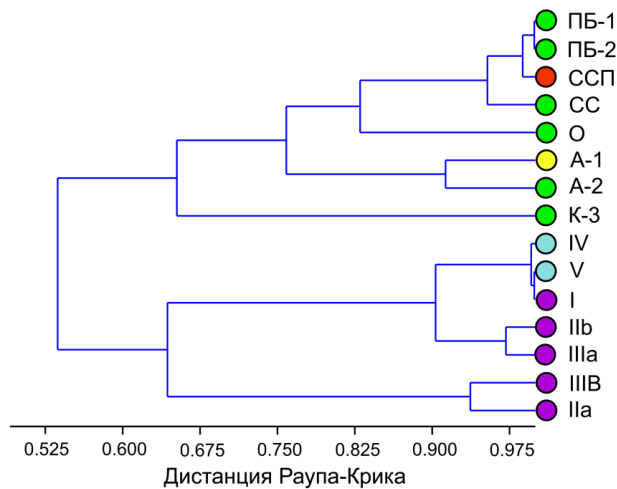


Рис. 5. Результаты классификации (кластерный анализ) станций по видовому составу зоопланктонных сообществ, полученные при единовременном взятии проб в августе 2020 г. Обозначения пунсонов такие же, как на рис. 1 и 5

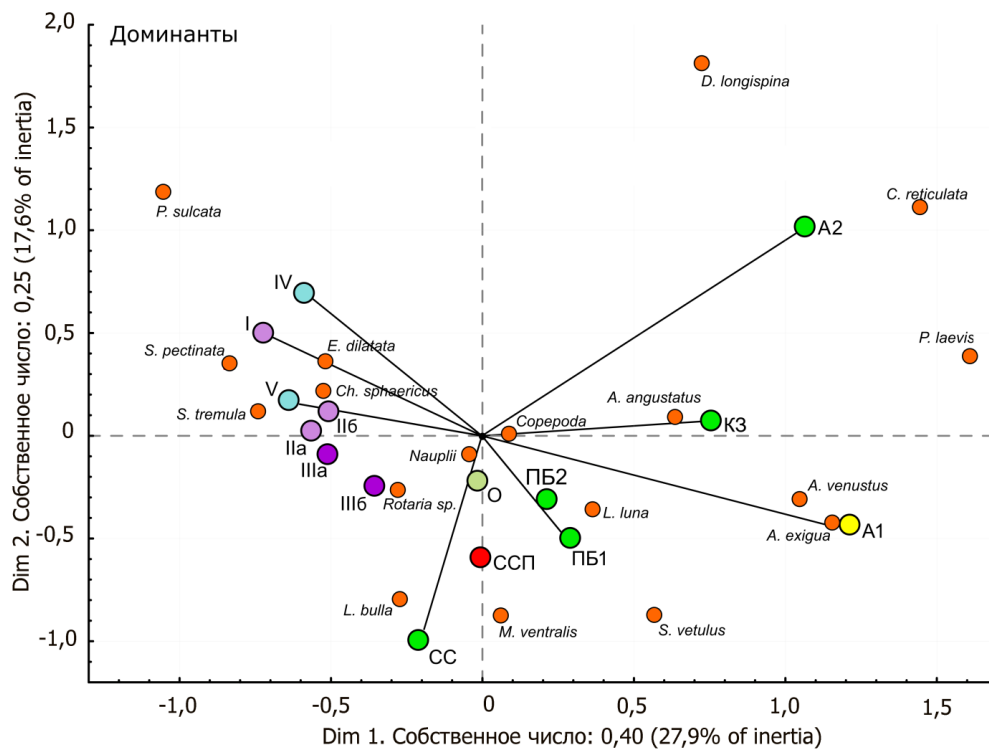


Рис. 6. Распределение доминантных видов в пространстве двух размерностей, построенных на основе данных по их встречаемости на различных станциях в августе 2020 г. Обозначения такие же, как на рис. 1 и 5

Максимальные значения по первой размерности имеют сообщества A1, A2 и K3, где преимущественно встречаются эвритопные рачки *Ceriodaphnia*

reticulata, *Daphnia longispina*, *Acanthocyclops venustus*, *Alonella exigua* и *Picrip-leuroxus laevis*. Противоположное положение занимают сообщества станций I, IV, V, IIa, IIб, IIIa и IIIб, в которых доминантами являются планктонные коловратки: *Synchaeta tremula*, *S. pectinata*, *Euchlanis dilatata* и эвритопная кладоцера *Chydorus sphaericus*. Вторая размерность объясняет только 18 % от общей инерции. По этой размерности наиболее обособлено зоопланктонное сообщество СС, где преимущественно представлены прибрежные виды коловраток – *Mytilina ventralis* и *Lecane bulla*, достигающие своей максимальной численности. Личинки разного возраста веслоногих ракообразных и пиявко-видные коловратки *Rotaria* sp., которые предпочитают зарастающие водоемы, имеют центральное положение в системе координат описанных выше размерностей, что связано с их присутствием в большинстве исследованных станций и указывает на их «обычность» для сообществ экосистемы р. Суры. В целом, результаты анализа соответствия хорошо согласуются с результатами классификации сообществ по видовому составу, полученными в ходе кластерного анализа.

С целью выявления зависимости между численностью гидробионтов и факторами среды был проведен непараметрический статистический корреляционный анализ (табл. 3). Статистически значимые корреляционные связи были отмечены только для 11 из 18 видов доминантов с 19 параметрами среды. Для трех параметров среды (Al, Mn и F⁻) связи с численностью выявлено не было. Наиболее чувствительными к воздействию большинства факторов оказались планктонные преимущественно речные коловратки *S. pectinata* и *S. tremula*, для численности которых были получены исключительно положительные корреляционные связи с анализируемыми показателями среды. Такая же прямая связь, но по отношению только к четырем факторам, выявлена у эвритопной кладоцеры *Ch. sphaericus*, к трем – у прибрежной фитофильной коловратки *E. dilatata*, к одному – у планктонной коловратки – *Pompholyx sulcata* и фитофильной – *Rotaria* sp. В то же время отрицательная зависимость численности отмечены с рядом факторов у *A. venustus* и *A. exigua*. Наконец, только у личинок копепод, предпочитающих зарастающие водоемы, численность положительно коррелирует со степенью зарастания водоемов и отрицательно – с силой течения.

Изучение структуры сообществ зоопланктона различных станций по характеру распределения их значений разнообразия и выравненности показало полное отсутствие ($R_s = 0,16$) их согласованности (рис. 7). По относительному обилию наибольшая выравненность отмечена для сообществ ПБ2, ПБ1 и СС, где выявлены наименьшие показатели pH, NO₂⁻, NO₃⁻, БПК₅, Ca²⁺, SO₄²⁻ и °Ж. Максимальное же разнообразие (наибольшее количество видов) отмечается для сообщества, выявленного вблизи плотины ТЭЦ-1 в Городском водохранилище – IIIб.

Изучение степени сопряженности комплекса исследованных факторов и информационными индексами сообществ показало отсутствие корреляционных связей. Исключение составляет только связь индекса выравненности и показателей содержания кислорода в воде (рис. 8). Согласно полученной зависимости наибольшие значения индекса разнообразия отмечаются на тех станциях, где было зарегистрировано наименьшее содержание кислорода в воде.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции Спирмена (R_s) между численностью доминантных видов и показателями физико-химических параметров среды (по данным августа 2020 г.)

Параметры	<i>E. dilatata</i>	<i>P. sulcata</i>	<i>Rotaria</i> sp.	<i>S. pectinata</i>	<i>S. tremula</i>	<i>A. angustatus</i>	<i>A. exigua</i>	<i>Ch. sphaericus</i>	<i>P. laevis</i>	<i>A. venustus</i>	Ювенильные особи копепода
T °C	0,3	-0,06	0,27	0,57	0,24	0,35	-0,19	0,48	-0,41	-0,29	0,05
mS	0,18	0,3	0,44	0,54	0,75	-0,58	-0,47	0,27	-0,39	-0,38	0,19
ppt	0,22	0,31	0,31	0,57	0,77	-0,65	-0,61	0,12	-0,46	-0,21	0,12
pH	0,49	0,59	0,06	0,47	0,57	-0,41	-0,47	0,48	-0,41	-0,73	-0,24
NH ₄ ⁺	0,35	-0,07	0,17	0,52	0,42	-0,3	0,27	0,46	0,04	-0,18	0,36
NO ₂ ⁻	0,59	0,36	0,3	0,78	0,82	-0,47	-0,34	0,66	-0,49	-0,74	-0,09
NO ₃ ⁻	0,43	0,34	0,24	0,69	0,68	-0,48	-0,3	0,56	-0,42	-0,74	-0,14
БПК ₅	0,53	0,17	0,14	0,76	0,8	-0,38	-0,06	0,56	-0,1	-0,27	0,32
Взвеш. вещества	0,43	0,23	0,2	0,68	0,76	-0,45	-0,1	0,49	-0,01	-0,25	0,23
Ca ²⁺	0,21	0,05	0,41	0,7	0,76	-0,24	-0,55	0,27	-0,32	-0,23	0,37
SO ₄ ²⁻	0,46	0,4	-0,03	0,64	0,51	-0,35	-0,54	0,41	-0,4	-0,64	-0,28
Cl ⁻	0,14	0,06	0,59	0,49	0,59	-0,18	-0,16	0,45	-0,28	-0,51	0,4
Fe ₂ и Fe ₃	-0,29	-0,21	0,07	0,16	0,05	-0,23	0,02	-0,42	0,23	0,61	0,45
Щел	0,2	0,15	0,04	0,76	0,51	-0,04	-0,36	0,29	-0,07	-0,08	0,19
°Ж	0,21	0,15	0,37	0,67	0,79	-0,41	-0,67	0,2	-0,49	-0,18	0,24
O ₂	0,67	0,42	0,04	0,43	0,53	-0,16	-0,2	0,59	-0,48	-0,69	-0,02
Зарастаемость	-0,14	-0,18	0,21	0,34	0,25	0,39	0,45	0,19	0,45	0,22	0,88
Антропогенные	0,39	0,02	0,33	0,48	0,46	0,1	0,05	0,7	-0,17	-0,6	0,25
Течение	0,19	0,42	-0,06	0,23	0,25	-0,31	-0,64	0,05	-0,64	-0,33	-0,67

Примечание. Жирным шрифтом отмечены статистически значимые ($p < 0,05$) значения корреляции Спирмена. Обозначения такие же, как в табл. 2.

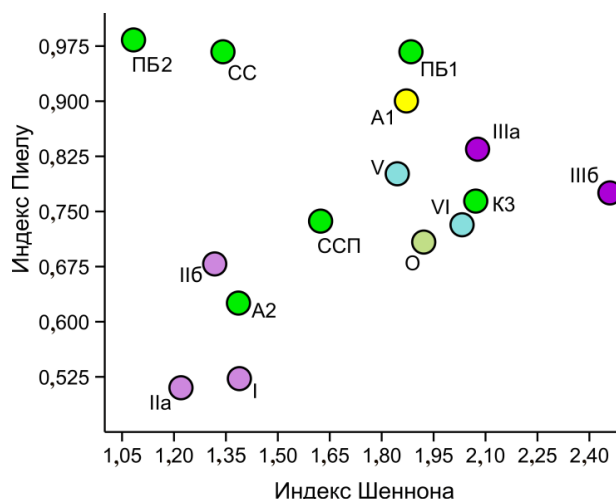


Рис. 7. Диаграмма рассеивания значений информационного индекса Шеннона и индекса выравненности Пиелу сообществ зоопланктона на станциях экосистемы р. Суры (по данным августа 2020 г.). Обозначения такие же, как на рис. 1

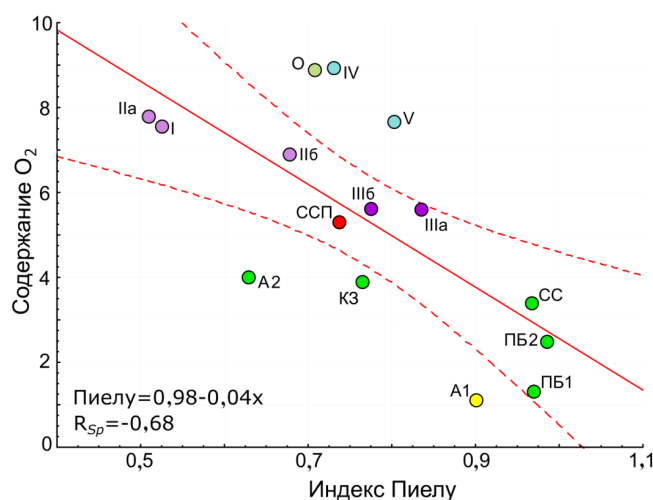


Рис. 8. Регрессионная модель зависимости индекса выравненности Пиелу зоопланктонных сообществ от содержания кислорода в воде на станциях экосистемы р. Суры (по данным августа 2020 г.) Пунктирная линия – 95 % доверительный интервал. Обозначения такие же, как на рис. 1

Закключение

За весь период наблюдений в сообществах зоопланктона экосистемы р. Суры обнаружено 82 вида, при одноразовой съемке (начало августа) на всех станциях – 48. Наибольшее число видов отмечено на станции р. Суры (IIIб), расположенной ниже впадения загрязненной малой реки Кашаевки, а наименьшее – на водотоках (ПБ1 и ПБ2) в Барковке. На всех станциях р. Суры и водотоках в районе Барковки выявлена низкая численность зоопланктеров, которая достигает самых высоких значений только в старичных озерах (К3 и ССП) микрорайона Ахуны. Видовое разнообразие сообществ р. Суры и

старичных водных объектов не совпадает по ряду таксонов, а по структурным параметрам зоопланктоценозы двух станций р. Суры (IIIa, IIIб) отличаются от остальных водотоков. В связи с близостью плотины ТЭЦ-1 и образованием вверх по течению «Городского водохранилища» длиной 13 км на этом участке р. Суры гидрологический режим значительно отличается от такового на других станциях исследований [1, 2]. Данные по структурным параметрам изученных здесь сообществ зоопланктона свидетельствуют о неоднородности по течению вверх так называемого «Городского водохранилища» по физико-химическим показателям. Поэтому этот участок русла р. Суры следует рассматривать как водоток с замедленным течением (станции I, IIa, IIб).

Зоопланктонное сообщество района Ахун (ССП) по структурным параметрам отличается от всех остальных. В этом водоеме отмечается самое высокое содержание ионов хлора, которое, возможно, связано с накоплением на дне загрязняющих веществ со времени начала использования его для сброса сточных (канализационных) вод из микрорайона Ахуны.

Анализируя абиотические факторы, установлено, что по сравнению с водными объектами на новом русле р. Суры, станции водных объектов разных типов на старом русле характеризуются низкими значениями pH, т.е. более кислой средой. Возможно, это связано с проходящими в этих водоемах окислительными реакциями, вызванными процессами гниения водорослей и водной растительности, а также опавшей листвы. Содержание в воде этих водоемов таких компонентов, как NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , БПК₅, взвеш. и °Ж, также оказалось более низким, чем на станциях р. Суры. По всей видимости, эта особенность водных объектов старого русла р. Суры связана с тем, что эти вещества концентрируются у дна из-за слабого течения или полного его отсутствия. Обнаруженные высокие значения этих средовых параметров на станциях IV и V обусловлены, по нашему мнению, активной аккумуляцией загрязняющих веществ, поступающих в водоток в черте города и непосредственно с местом расположения этих станций.

Выявленная зависимость между численностью гидробионтов и факторами среды статистически значимой оказалась – только для 11 из 18 видов доминантов и 19 параметров среды. Только у двух видов планктонных колеровок *S. pectinata* и *S. tremula* существует прямая связь роста численности с ростом показателей большинства факторов среды.

Оценка качества вод исследуемых водных объектов с использованием показателей численности индикаторных видов и структурных параметров сообществ зоопланктона свидетельствует об их загрязненности. Многие водные объекты в старом русле р. Суры, а также новое русло р. Суры в своем развитии находятся на переходной стадии от мезотрофного к эвтрофному типу.

Список литературы

1. Иванов А. И., Чернышов Н. В., Кузин Е. Н. Природные условия Пензенской области. Современное состояние. Т. 1. Геологическая среда, рельеф, климат, поверхностные воды, почвы, растительный покров : монография. Пенза : РИО ПГАУ, 2017. 236 с. ISBN 978-5-94338-873-6
2. Асанов А. Ю. Рыбохозяйственное значение водохранилищ, образованных русловыми водоподъемными сооружениями // Сурский вестник. 2019. № 3. С. 22–28. eISSN 2619-1202.

3. Методы биологического анализа пресных вод : сб. науч. работ / отв. ред. Г. Г. Винберг. Л. : Зоологический ин-т АН СССР, 1976. 168 с.
4. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / ред. В. Р. Алексеев, С. Я. Цалохин. М. ; СПб. : Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
5. Чуйков Ю. С. Материалы к кадастру планктонных беспозвоночных бассейна Волги и Северного Каспия. Коловратки (Rotatoria). Тольятти : ИЭВБ РАН, 2000. 195 с.
6. Абакумов В. А. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб. : Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
7. Мяэметс А. Х. Изменения зоопланктона // Антропогенное воздействие на малые озера. Л. : Наука, 1980. С. 54–64.
8. Лобачев А. Л., Степанова Р. Ф., Лобачева И. В. Анализ неорганических загрязнителей питьевых и природных вод : учеб. пособие. Самара : Изд-во Самарского ун-та, 2006. 42 с.
9. Стойкова Е. Е., Медянцева Э. П., Евтюгин Г. А. Гидрохимический анализ. Казань : Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, 2010. 49 с.
10. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia electronica. 2001. Vol. 4, iss. 1, art. 4. 9 p. URL: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

References

1. Ivanov A.I., Chernyshov N.V., Kuzin E.N. *Prirodnye usloviya Penzenskoy oblasti. Sovremennoe sostoyanie. T. 1. Geologicheskaya sreda, rel'ef, klimat, poverkhnostnye vody, pochvy, rastitel'nyy pokrov: monografiya* = Natural conditions of the Penza region. Contemporary state. Volume 1. Geological environment, relief, climate, surface waters, soils, vegetation cover: monograph. Penza: RIO PGAU, 2017:236. ISBN 978-5-94338-873-6. (In Russ.)
2. Asanov A.Yu. Fishery value of reservoirs formed by channel water-carrying structures. *Surskiy vestnik* = Sursky bulletin. 2019;3:22–28. eISSN 2619-1202. (In Russ.)
3. Vinberg G.G. ed. *Metody biologicheskogo analiza presnykh vod: sb. nauch. rabot* = Methods for biological analysis of fresh water: collected papers. Leningrad: Zoologicheskii in-t AN SSSR, 1976:168. (In Russ.)
4. Alekseev V.R., Tsalokhin S.Ya. ed. *Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeyskoy Rossii. T. 1. Zooplankton* = Keys to zooplankton and zoobenthos of fresh waters in European Russia. Volume 1. Zooplankton. Moscow; Saint-Petersburg: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010:495. (In Russ.)
5. Chuykov Yu.S. *Materialy k kadastru planktonnykh bespozvonochnykh basseyna Volgi i Severnogo Kaspiya. Kolovratki (Rotatoria)* = Materials for the inventory of planktonic invertebrates in the Volga and North Caspian basin. Rotifers (Rotatory). Tolyatti: IEVB RAN, 2000:195. (In Russ.)
6. Abakumov V.A. *Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem* = Guidance for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992:318. (In Russ.)
7. Myaemets A.Kh. Zooplankton changes. *Antropogennoe vozdeystvie na malye ozera* = Anthropogenic impact on small lakes. Leningrad: Nauka, 1980:54–64. (In Russ.)
8. Lobachev A.L., Stepanova R.F., Lobacheva I.V. *Analiz neorganicheskikh zagryazniteley pit'evykh i prirodnnykh vod: ucheb. posobie* = Analysis of inorganic pollutants of drinking and natural waters: textbook. Samara: Izd-vo Samarskogo un-ta, 2006:42. (In Russ.)
9. Stoykova E.E., Medyantseva E.P., Evtugin G.A. *Gidrokhimicheskiy analiz* = Hydrochemical analysis. Kazan: Kazanskiy (Privolzhskiy) federal'nyy un-t, 2010:49. (In Russ.)

10. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*. 2001;4(1):9. Available at: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

Информация об авторах / Information about the authors

Юлия Александровна Пастухова

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yuliya.pastukhova.98@mail.ru

Julija A. Pastuchova

Master degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Тамара Григорьевна Стойко

кандидат биологических наук, доцент,
профессор кафедры зоологии и экологии,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: tgstojko@mail.ru

Tamara G. Stojko

Candidate of biological sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of zoology and ecology, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Дмитрий Григорьевич Смирнов

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры зоологии и экологии,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eptesicus@mail.ru

Dmitriy G. Smirnov

Doctor of biological sciences, professor,
professor of the sub-department of zoology
and ecology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Александрович Флягин

главный технолог, ООО «Горводоканал»
(Россия, г. Пенза, ул. Кривоозерье, 24)

E-mail: flyagman@yandex.ru

Aleksandr A. Fliagin

Production manager, "Gorvodokanal" LLC
(24 Krivoserye street, Penza, Russia)

Елена Александровна Ембулаева

кандидат биологических наук, начальник
лаборатории, ООО «Горводоканал»
(Россия, г. Пенза, ул. Совхозная, 27 А)

E-mail: ltkosk@bk.ru

Elena A. Embulaeva

Candidate of biological sciences, head of
the laboratory, "Gorvodokanal" LLC
(27 A Sovkhoznyaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 07.12.2020

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.01.2021

Принята к публикации / Accepted 02.02.2021