

Состояние бентосных сообществ реки Вычегда в условиях влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства

М. А. БАТУРИНА, Е. Б. ФЕФИЛОВА, О. А. ЛОСКУТОВА

*Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: baturina@ib.komisc.ru*

Статья поступила 27.04.2021

После доработки 20.05.2021

Принята к печати 21.05.2021

АННОТАЦИЯ

Описаны состав, разнообразие донных сообществ и современное экологическое состояние р. Вычегда в зоне влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства. Отмечены не характерные для донных биоценозов среднего течения р. Вычегда количественные показатели развития и высокое разнообразие донной фауны. В составе зообентоса выявлены 23 таксономические группы донных беспозвоночных. Для семи модельных групп установлено 125 видов и форм, определен устойчивый комплекс видов, доминирующих на исследованном участке реки. В составе модельных групп преобладали виды-индикаторы α - β - и β -сапробных условий. В целом, индексы оценки качества вод, основанные на составе и структуре сообществ донных беспозвоночных, характеризовали состояние реки на участке мониторинга как “удовлетворительное”. Исключение составляли пункты сброса условно чистых сточных вод, где увеличивалась роль видов-индикаторов α - и полисапробных условий, а значения большинства индексов были достоверно ниже.

Ключевые слова: зообентос, биоразнообразие водных беспозвоночных, сточные воды целлюлозно-бумажного производства, р. Вычегда.

Известно [Culp et al., 2000b; Батурина, Кононова, 2021], что сточные воды целлюлозно-бумажных комбинатов содержат разнообразные соединения, которые оказывают различное воздействие на водные организмы и сообщества, изменяя количественные показатели развития, влияя на их состав и структуру, биологию отдельных видов.

Вычегда (правый приток р. Северной Двины, бассейн Белого моря) – одна из крупных рек европейской части России и вторая по площади бассейна река Республики Коми, протекает по территории республики и Архангельской области. Учитывая важную роль © Батурина М. А., Фефилова Е. Б., Лоскутова О. А., 2021

ее бассейна в регионе [Батурина и др., 2020], актуальной задачей является контроль за состоянием населяющих ее сообществ водных организмов. Биологические исследования экосистемы р. Вычегда начаты в 40-х годах прошлого века [Батурина и др., 2016]. В 1980-е годы проводились комплексные гидробиологические и гидрохимические наблюдения за экологическим состоянием сообществ водных беспозвоночных и качеством вод реки в зоне действия целлюлозно-бумажного комбината [Батурина, Кононова, 2021]. В дальнейшем в различных экологических работах встречаются результаты эпизодических наблюдений за состоя-

нием водотока, преимущественно за химическим составом воды [Максименко и др., 2000; Личутина и др., 2011] или донных отложений [Троянская, 2019]. Последняя сводка о составе и количественных показателях развития зообентоса в р. Вычегда в 2010 г. на участке расположения рассеивающего выпуска стоков АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (АО “Монди СЛПК”) касалась проектирования гидротехнических работ [Мискевич, Самохина, 2019]. После проведения многолетней масштабной модернизации производства [Личутина и др., 2011; Троянская, 2019] и реконструкции очистных сооружений [Батурина, Кононова, 2021] наблюдения за состоянием донного сообщества реки носили планомерный мониторинговый характер с 2018 по 2020 г. и проводились на определенном числе пунктов отбора в рамках совместного проекта АО “Монди СЛПК” и Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

Сообщества донных беспозвоночных служат одним из лучших биоиндикаторов качества водной среды и воздействия на гидрэкосистемы [Семенченко, 2004; Шитиков и др., 2005]. По сравнению с другими сообществами гидробионтов, характеристики зообентоса наиболее стабильны в пространстве и времени. Поэтому именно он наиболее четко отражает не только общее состояние гидрэкосистемы, но и ее локальные особенности в градиенте воздействия. Параметрами для оценки изменений среды [Шитиков, Зинченко, 2013] могут служить традиционные характеристики биоценозов: число видов, биомасса, численность, индексы видового богатства и разнообразия, а также изменения этих показателей во времени и пространстве.

Цель настоящей работы состоит в оценке и анализе изменений количественных показателей развития бентосных сообществ, видового разнообразия фауны донных беспозвоночных, происходящих в условиях влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства, и оценке качества вод р. Вычегда на участке мониторинга.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в районе АО “Монди СЛПК”, в среднем течении р. Вычегда. По течению реки на участке протяженно-

стью 55 км выбрано шесть пунктов (I – VI). Из них пункты I и IV – точки сброса сточных вод АО “Монди СЛПК” после очистки, II, III и V, VI – расположены ниже стоков и анализируются нами как “условно фоновые”. Более подробное описание района с картой-схемой пунктов исследований, а также химического состава воды дано в работе Е. Н. Патовой с соавт. [Патова и др., 2021a]. Дополнительные пункты, расположенные на 62 и 79 км выше от п. I, включены в анализ количественных данных как “контроль” (К). Они характеризуются высоким правым коренным берегом, поросшим сосновым лесом, ближе к воде – ивняком, левый берег намывной, образует мелководные песчаные косы. Скорость течения – 0,1–0,5 м/с. Преобладает песчаный, местами с наилком, грунт. Вдоль правого берега редко встречаются разреженные заросли, представленные *Carex* sp. и *Alisma plantago-aquatica* L. Содержание растворенного в воде кислорода варьировало от 7,7 до 9,0 мг/л, активная реакция среды – от 7,4 до 8, максимальная прозрачность воды – 1,2 м.

Для оценки динамики количественных показателей развития зообентоса в пунктах отбора проб I и IV привлечены материалы В. Н. Шубиной за 1988 г. (количественные данные разбора проб).

Полевые исследования зообентоса проводили 23, 24 июля 2018 г., 13–17 июля 2019 г., 20, 21 июля 2020 г. В каждом пункте отбирали от двух до пяти проб. В пунктах I и IV отбор проводили ежегодно, в п. III – в 2018 и 2019 гг., на остальных – разовые сборы. Всего отобрано 40 гидробиологических проб. Количественные пробы отбирали по гидробиологическим разрезам с разных глубин (от 0,5 до 3,5 м), использовали дночерпатель Петерсена (1/40 см²), а на плотных грунтах у берега – гидробиологический скребок (длина лезвия 30 см) с мешком из газа 158 мкм. Далее пробы обрабатывали стандартными методами [Методика..., 1975].

Для модельных групп донных беспозвоночных: Oligochaeta, Cladocera, Copepoda, Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera, описан полный видовой состав. Копеподиты младших возрастов циклопид и гарпактикоид учитывались при расчетах как Cyclopoida juv. и Harpacticoida juv. Молодь олигохет или семейства, не определенные

до вида в силу сложности идентификации, учитывались как Enchytraeidae gen. sp., Lumbriculidae gen. sp. juv., Tubificinae sp. juv. Молодь личинок амфибиотических насекомых считали как Ephemeroptera gen. sp. juv., Plecoptera gen. sp. juv., Trichoptera gen. sp. juv. Полный список видов водных беспозвоночных с учетом современной таксономии приведен в [Baturina et al., 2021] с указанием распределения видов по пунктам отбора проб.

Для характеристики структурных показателей развития бентоса рассчитывали численность и биомассу, частоту встречаемости таксономической группы или вида для участка, пункта отбора в целом и по каждому году. При анализе данных применяли непараметрические методы статистического анализа, для определения средних показателей рассчитывали медиану (Me). С целью сравнения современных данных с результатами более ранних исследований мейобентос и макробентос анализировали совместно.

Для оценки видового разнообразия для каждой таксономической группы рассчитывали: индекс доминирования D для каждого вида (вид считали доминантом, если $100 \leq D \leq 10\%$, субдоминантом, если $10 < D > 1\%$); частоту встречаемости (%) вида (вид считали встречающимся часто, если он был отмечен в 20–40 % проб, обычным – в 5–15 % и редким – менее 5 % проб) [Шитиков и др., 2005]. Биоразнообразие модельных групп учитывали с помощью индексов Шеннона (H_N , бит./экз.), Симпсона (D_S), рассчитанных по численности таксонов, и индекса выравненности экологических групп Пиелу (E) [Там же]. Сравнение состава бентических фаун по годам и в пунктах отбора проводили с использованием индекса Чекановско-Съеренсена (I_S) [Там же]. Считали $I_S \cdot 100$: 15–30 % – низким сходством; 30–50 % – умеренным сходством; 50–65 % – средним сходством; 65–80 % – высоким сходством.

Для оценки качества вод использовали индексы, основанные на видовом богатстве, разнообразии и структурных характеристиках зообентоса и применяемые в различных методах биологического контроля [Семенченко, 2004]: EPT Index, биотический индекс р. Трент (Trent Biotic Index) (TBI) и его модификация – индекс EBI, Biological Monitoring Working Party (BMWP) и его производная – Average Score Per Taxon (ASPT), олигохет-

ный индекс Пареле (D_1). При оценке качества воды с помощью индекса видового разнообразия Шеннона применяли градацию чистоты вод по В. А. Яковлеву [1988]. Сапробность (S) для ряда видов бентосных беспозвоночных указывалась по [Макрушин, 1974; Унифицированные методы ..., 1977; Чертопруд, Чертопруд, 2010; Ермолаева, Двуреченская, 2013].

При выполнении кластерного анализа применяли метод Варда (Ward's method), в качестве меры различия между кластерами использовали евклидово расстояние. Дендрограммы построены по присутствию/отсутствию видов.

При сравнительном анализе для выбора наиболее информативных показателей рассчитывали коэффициенты вариации (C_V) индексов и значение вероятности p . Статистическая обработка данных выполнена с использованием стандартного пакета STATISTICA 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количественные и структурные показатели сообществ водных беспозвоночных

На исследованном участке р. Вычегда за три года наблюдений выявлены 23 таксономические группы донных беспозвоночных. Число групп в пунктах отбора варьировало от 13 до 19, в среднем 15 групп/пункт. Наиболее часто (от 50 до 100 %) в пробах бентоса встречались личинки Chironomidae, Ceratopogonidae, Ephemeroptera, а также Nematoda, Oligochaeta, Cladocera, Copepoda, Hydrachnidia. Очень редко (менее 20 % проб или только в один из трех годов наблюдений) отмечались Hirudinea, личинки Coleoptera, Odonata, Simuliidae, Megaloptera.

Относительно данных за 1988 г. (2,3 тыс. экз./м²; 0,2 г/м²) средняя численность зообентоса на исследованном участке реки в 2018–2020 гг. возросла при сходных значениях биомассы – 6,5 тыс. экз./м² и 0,3 г/м² соответственно. В современный период исследований распределение донных беспозвоночных в отдельных пунктах варьировало в широких пределах (рис. 1).

В пункте К (контроль) численность в 2,5 раза, а биомасса более чем в 3 раза были ниже относительно среднего показателя для

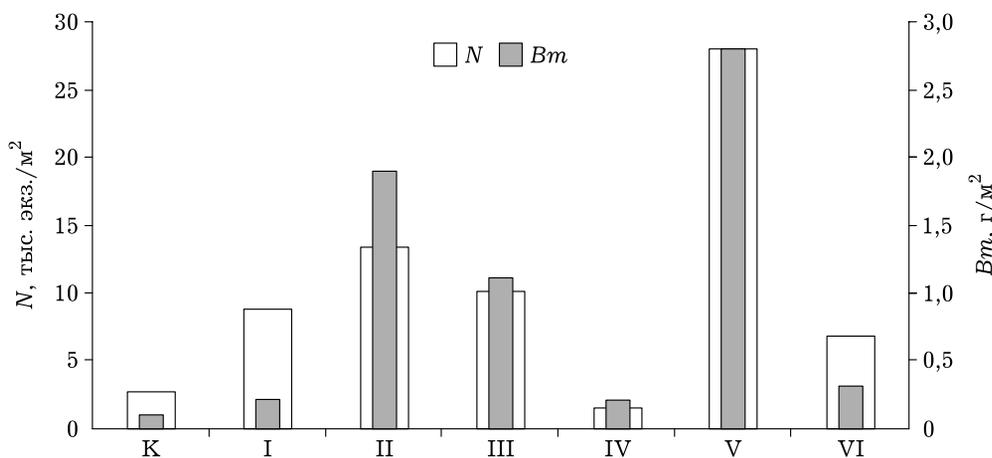


Рис. 1. Численность (N , тыс. экз./м²) и биомасса (Bm , г/м²) зообентоса вдоль исследованного участка реки. I – VI – пункты отбора проб; К – контроль

пунктов I – VI и составляли 2,6 тыс. экз./м² и 0,1 г/м² соответственно. А в сравнении с максимальными значениями численности и биомассы бентоса, установленными в пунктах II и V, количественные показатели развития бентоса в п. К были в 10 раз ниже.

В 1988 г. в точках, соответствующих современным пунктам I, II и IV, было указано семь таксономических групп донных беспозвоночных, численность бентоса формировали личинки Chironomidae (35,8 %), совместно с Oligochaeta (22,5 %) и Nematoda (16,4 %), при преобладании в биомассе личинок Chironomidae (49,7 %) и Oligochaeta (31,5 %). В современный период (2018–2020 гг.) в этих пунктах (I, II и VI) число таксономических групп беспозвоночных увеличилось до 20, в общей численности бентоса по-прежнему преобладали личинки Chironomidae (28,6 %) и Oligochaeta (14,4 %), однако увеличилась доля бентосных ракообразных (до 36,8 %). Основу биомассы формировали преимущественно личинки амфибиотических насекомых, включая Chironomidae (51,2 %), доля остальных групп составляла менее 10 %.

В целом, в 2018–2020 гг. на исследованном участке реки (рис. 2) из 23 таксономических групп личинки амфибиотических насекомых составляли основную долю в общей численности бентоса при количественном преобладании личинок хирономид. Исключение составили: п. I, где в 2020 г. достоверно ($p < 0,015$) возросла доля ракообразных; п. IV, где в 2018 и 2019 гг. увеличилась доля олигохет. При этом на песчаных с наилком грунтах п. К из 15 так-

сономических групп в численность бентоса наряду с личинками Chironomidae (55,7 %) входили Oligochaeta (9,2 %) и Nematoda (19,5 %).

Более 50 % массы бентоса в п. К приходилось на долю личинок Chironomidae, на втором месте по значимости стояли Mollusca (14,5 %). На участке между пунктами I–VI основу биомассы бентоса также составляли личинки Chironomidae, однако выделялись: п. I, где в 2020 г. выросла роль бентосных ракообразных, преимущественно Cladocera; п. III (в 2018 г.) и п. VI (в 2019 г.), где отмечалась наибольшая доля моллюсков (см. рис. 2).

Оценка биоразнообразия сообществ водных беспозвоночных

Для семи модельных групп донных беспозвоночных установлен видовой состав [Baturina et al., 2021], включающий виды и таксоны выше видового ранга (всего 125): Oligochaeta – 40, Mollusca – 3, Cladocera – 15, Copepoda – 16 (Cyclopoida – 14; Harpacticoida – 2), Coleoptera – 2; Plecoptera – 5, Ephemeroptera – 26, Trichoptera – 11; Diptera – 7.

Наиболее часто на исследованном участке реки, не считая молоди п/сем. Tubificinae и неполовозрелых Cyclopoida, отмечались виды *Amphichaeta leidigi*, *Piguetiella blanci*, *Nais behningi*, *Uncinaiis uncinata*, *Stylaria lacustris*, *Chaetogaster diaphanus*, *Propappus volki*, *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta), *Disparalona rostrata*, *Alona affinis*, *A. quad-rangularis*, *Coronatella rectangula*, *Chydorus*

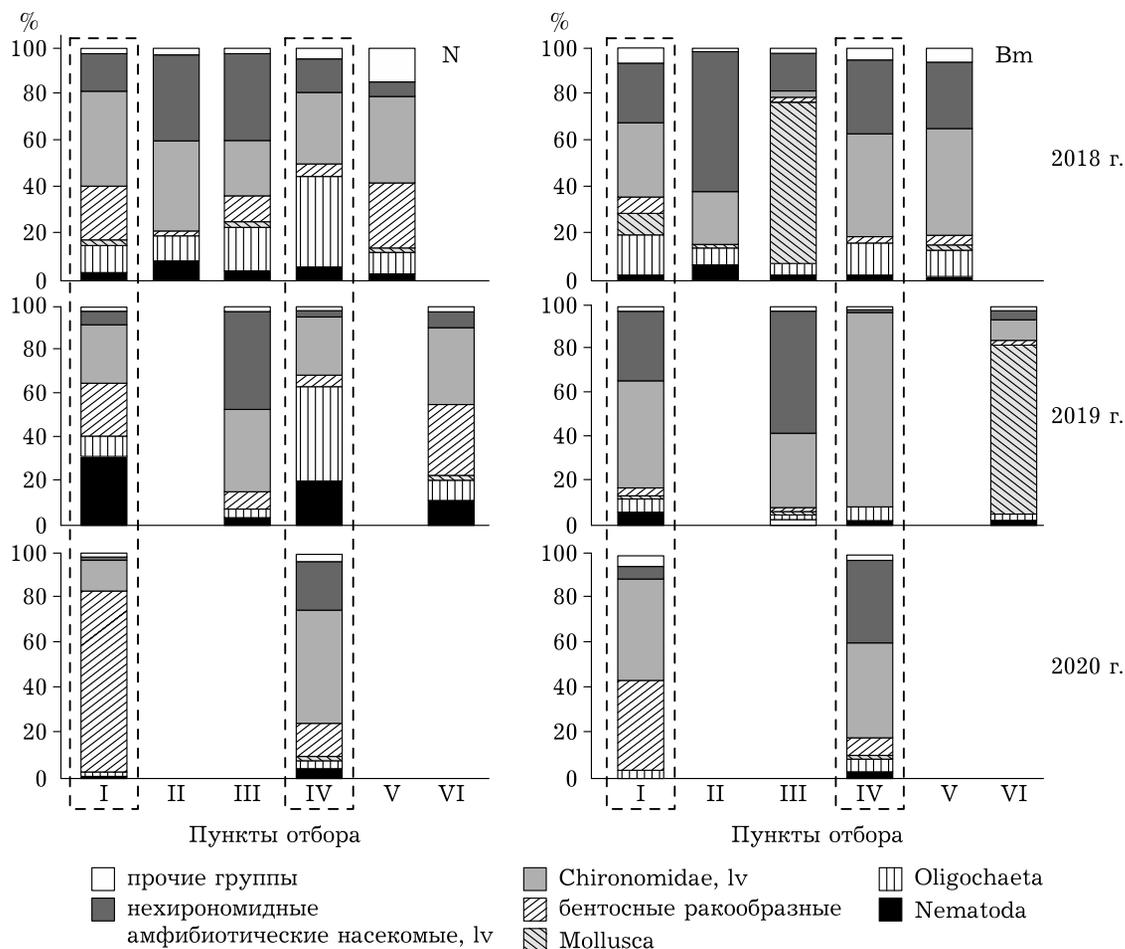


Рис. 2. Динамика соотношения численности (N) и биомассы (Bm) основных таксономических групп зообентоса на различных пунктах отбора проб. Пункты I и IV – точки сброса очищенных сточных вод (обведены пунктиром). Амфибиотические насекомые: личинки Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Diptera (кроме Chironomidae). Мейобентосные ракообразные: Cladocera, Copepoda, Ostracoda. Прочие группы приведены в [Baturina et al., 2021]

sphaericus (Cladocera), *Paracyclops fimbriatus*, *Eucyclops serrulatus* (Cyclopoida), Heptageniidae gen. sp. (Ephemeroptera), *Neureclipsis bimaculata*, *Hydropsyche* sp., Polycentropodiidae gen. sp. (Trichoptera), Limoniidae gen. sp. (Diptera). Доля редких видов (5 % проб) составляла до 44,8 % от общего числа выявленных видов.

Среди всего многообразия найденных видов водных беспозвоночных на исследованном отрезке р. Вычегда отмечены новые и редкие для фауны региона. Так, в пунктах I, III и V найдена поденка *Brachycercus harisella*, занесенная в Красную книгу Республики Коми (бионадзор), в п. IV – *Isonychia ignota*. В п. I, в месте сброса условно чистых сточных вод впервые для Республики Коми в составе донной фауны обнаружены виды веслоногих

раков – *Elaphoidella bidens* и *Paracyclops imminitus*. Вопрос о возможных источниках и способах проникновения видов в новое для них местообитание обсуждается в работе Е. Б. Фефиловой с соавторами [Фефилова и др., 2021].

Сравнение состава видов в модельных группах не выявило значительного сходства между пунктами: для всех амфибиотических насекомых, кроме хирономид, сходство определялось как умеренное (I_S 31–37 %); для малощетинковых червей при умеренном сходстве видов между большинством пунктов (I_S 30–47 %) наибольший процент общих видов отмечался для пунктов I–IV и III–V; состав видов микроракообразных также характеризовался умеренным сходством, при этом для Copepoda оно было ниже (I_S 32–37 %), чем

для Cladocera (I_S 46–57 %). Наименьшие значения I_S (19–30 %) отмечены для пунктов II и VI, что, вероятно, связано с отбором проб здесь только в один сезон. С учетом состава видов в модельных группах пункты отбора разделились на кластеры (рис. 3). Объединились пункты сброса очищенных сточных вод (I и IV) по составу олигохет и кладоцер. По составу копепод выделился кластер с пунктами II и V, по превалированию амфибиотических насекомых отделился п. I.

Доминирующий комплекс видов ($100 < D > 10$) в составе модельных групп все три года устойчиво составляли: *D. rostrata* (Cladocera); *P. fimbriatus* и Cyclopoida sp. juv. (Copepoda); представители п/сем. Tubificinae sp. (Oligochaeta) и сем. Polycentropodidae (Trichoptera). Исключительно в 2018 г. доминировали *Mono-spilus dispar* (Cladocera), *Caenis* sp. и Baetidae gen. sp. (Ephemeroptera); в 2019 г. – представители рода *Paraleptophlebia* (Ephemeroptera); в 2020 г. – виды сем. Heptageniidae (Ephemeroptera). Сходство фаун между годами составляло от 27 до 31 %.

В пунктах I и IV – точки сброса условно чистых сточных вод – в условиях повышенной температуры воды [Патова и др., 2021a]

на песчаных и песчано-гравийных грунтах с наилком в составе модельных групп отмечалось наибольшее число видов (77), при этом доля доминантов среди них была наименьшая (21–36 %) относительно других пунктов. К видам-доминантам, стабильно образующим структуру модельных групп в этих пунктах с 2018 по 2020 г., относились: *D. rostrata*, *M. dispar*, *Ch. sphaericus* (Cladocera); *P. fimbriatus*, молодь Cyclopoida sp. (Copepoda), молодь п/сем. Tubificinae (Oligochaeta); Heptageniidae sp. (Ephemeroptera).

В пунктах отбора проб II и III, расположенных ниже по течению от п. I, число видов в модельных группах снижалось (29 и 53), при этом до 32–51 % возрастала в них доля доминантов: *Ch. sphaericus*, *D. rostrata* (Cladocera), молодь Cyclopoida (Copepoda), молодь п/сем. Tubificinae, *Nais behningi* (Oligochaeta), представители родов *Paraleptophlebia* sp. и *Caenis* sp., сем. Baetidae (Ephemeroptera), молодь сем. Polycentropodidae (Trichoptera).

В пунктах отбора V и VI число видов также снизилось относительно п. IV, а доминирующий комплекс видов составлял 41–48 % от общего состава видов. В состав доминантов входили: *A. affinis*, *A. quadrangularis*,

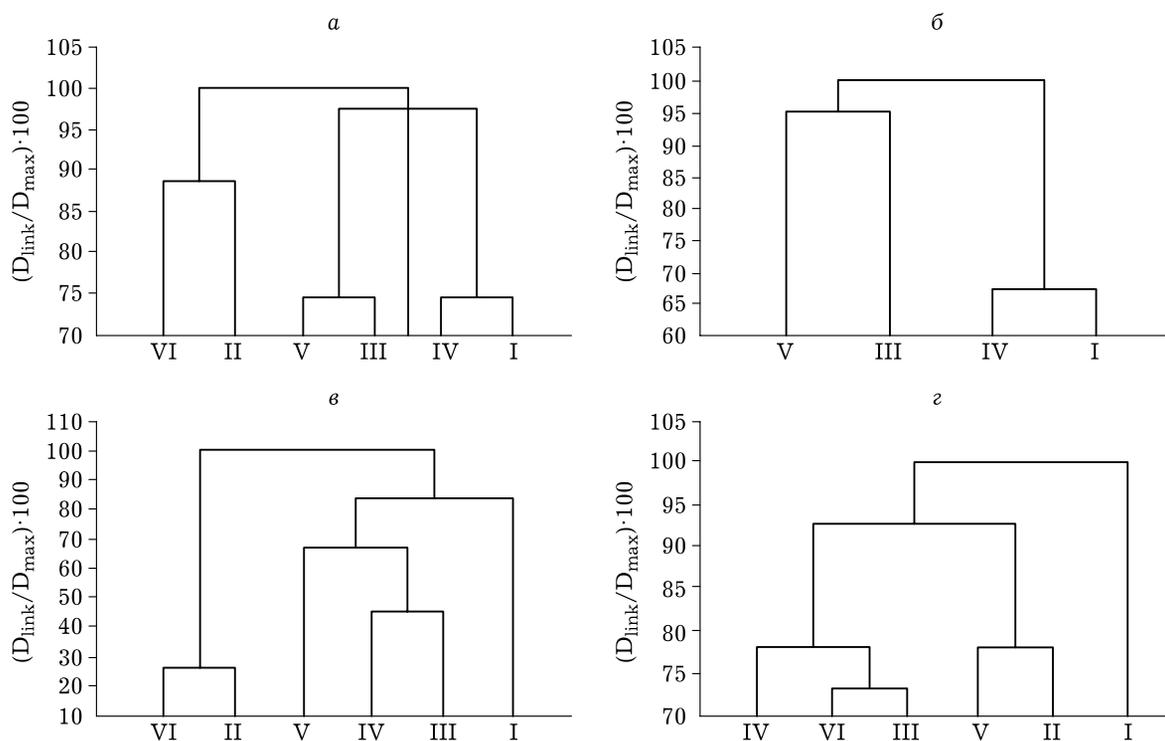


Рис. 3. Дендрограмма сходства видового состава в модельных группах: а – Oligochaeta; б – Cladocera; в – Copepoda; г – амфибиотические насекомые, кроме Chironomidae. I – VI пункты отбора проб в р. Вычегда

Индексы разнообразия фауны модельных групп на исследованном участке р. Вычегда

Индекс		Пункт отбора проб					
		I	II	III	IV	V	VI
H_N , бит/экз.	A	1,98	1,79	2,10	1,78	2,88	1,92
	B	1,47	0,91	1,65	0,98	1,89	н/д
	B	0,79	1,75	1,46	0,91	1,25	1,80
D_S	A	0,33	0,48	0,34	0,35	0,15	0,33
	B	0,44	0,65	0,43	0,55	0,34	н/д
	B	0,68	0,52	0,52	0,56	0,56	0,34
E	A	0,77	0,54	0,77	0,69	0,72	0,80
	B	0,74	0,57	0,70	0,82	0,68	н/д
	B	0,65	0,44	0,49	0,49	0,45	0,78

П р и м е ч а н и е. А – Oligochaeta; Б – (Cladocera + Copepoda); В – амфибиотические насекомые (кроме Chironomidae). н/д – нет данных.

D. rostrata (Cyclopoida), *P. fimbriatus* и молодь Cyclopoida (Copepoda), *Amphichaeta leidigi*, *P. blanci*, *Uncinaiis uncinata*, *N. behningi* и представители сем. Enchytraeidae (Oligochaeta), *Caenis horaria*, *Baetis vernus*, *Caenis* sp. (Ephemeroptera), Limoniidae gen. sp. (Diptera). Высокую численность сем. Enchytraeidae в 2019 г. можно объяснить попаданием в пробы большого числа прибрежно-водных видов вследствие высокого уровня воды и подтопления берегов. Затопление больших площадей прибрежных макрофитов привело также к снижению разнообразия амфибиотических насекомых в этот год.

По составу доминирующего комплекса видов наиболее близкими были пункты I–IV (I_S 37 %), III, IV (I_S 50 %), III–V (I_S 41 %). Видовое сходство между остальными пунктами было ниже (I_S не более 24 %). Различия в составе доминирующего комплекса определялись присутствием видов нехириноидных амфибиотических насекомых, сходство видов которых было наименьшим (I_S до 30 %) относительно других групп.

В целом, анализ видового состава модельных групп – микроракообразных, малощетинковых червей, нехириноидных амфибиотических насекомых – выявил достаточно высокий уровень разнообразия сообществ – до 2,5 и 2,1 соответственно. Разнообразие в группах варьировало в зависимости от пункта отбора проб, однако различия значений для большинства пунктов были незначительны (табл. 1). Наибольшее разнообразие

и выровненность фауны отмечались для всех групп в пунктах III и V.

Оценка качества воды и экологического состояния р. Вычегда в условиях сброса очищенных сточных вод АО “Монди СЛПК”

Большая часть фаун модельных групп [Baturina et al., 2021] состояла из видов, имеющих различный индикаторный статус (52 вида), из которых 25 – индикаторы β -мезосапробных условий. В доминирующем комплексе индикаторы составляли от 53 (п. II) до 100 % (п. IV) видов. Значительную роль среди них также играли β -сапробные виды (рис. 4), а в п. IV – α - и полисапробные. Число видов-индикаторов β -мезосапробных условий на исследованном участке реки было стабильно высоким (коэффициент вариации $C_V = 12$).

В составе фауны нехириноидных амфибиотических насекомых доля индикаторных видов составляла 25,5 % с преобладанием β -сапробных (64,3 %). В составе фауны ветвистоусых рачков на долю индикаторов приходилось более 90 % видов, из них более 70 % – олиго- и олиго- β -сапробные виды. В составе индикаторных видов веслоногих ракообразных 71,4 % составляли олиго- и олиго- β -сапробные виды. Фауна малощетинковых червей на 32,5 % состояла из видов-индикаторов, среди которых 39 % – индикаторы α - и полисапробных условий, остальные – β -мезосапробных.

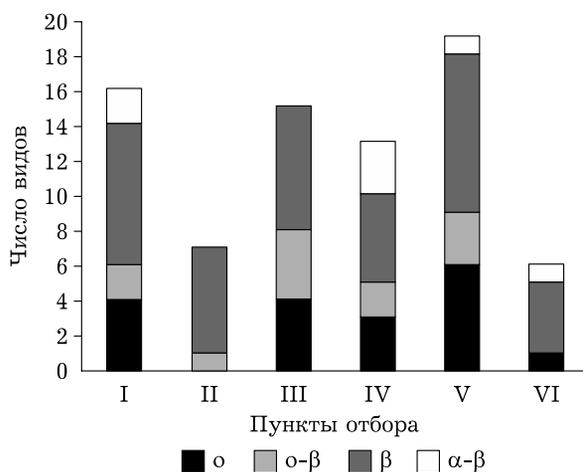


Рис. 4. Доля видов-индикаторов в доминирующем комплексе на исследованных пунктах отбора в р. Вычегда

Структурные и количественные показатели развития бентоса на исследованном участке реки легли в основу расчета индексов для оценки экологического состояния водотока (табл. 2, рис. 5).

Значения индексов BMWP и ASPT (см. рис. 5) варьировали в исследованных пунктах в широких пределах. Наименьшие значения BMWP отмечались в пунктах I и IV (точках сброса условно чистых сточных вод), наибольшие – в пунктах III и V, расположенных ниже по течению. Значения индекса ASPT также минимальны были в пунктах I и IV и увеличивались в III и V. В целом, показатели индексов соответствовали между собой и в оценке качества вод в точках сбора.

Согласно значениям индекса ТВИ и его модификации индекса ЕВІ (см. рис. 5) наиболее удовлетворительное качество воды отмечается лишь в пунктах II и III (см. табл. 2), в остальных значения этих индексов были значительно ниже (см. рис. 5).

В наших исследованиях величина индекса ЕРТ была наибольшей в пунктах II + III (см. рис. 5, табл. 2). В остальных она варьировала от 1 до 3. Однако даже наибольший показатель не соответствует значениям данного индекса, установленного для эталонных створов в ряде рек, качество воды которых определяется как “высокое” [Особенности..., 2011, Головатюк, Зинченко, 2011; Семенченко, 2004].

Значения олигохетного индекса D_1 изменялись от 0,1 до 0,16, максимальное – в п. IV. Однако в целом качество воды на исследованном участке реки, согласно этим показателям, оценивается как “хорошее” или как олигосапробный класс качества. Коэффициент вариации (C_V) индекса был высоким и составлял 61–119 %. По данным 1988 г. доля олигохет в бентосе на исследованном участке варьировала от 10,0 до 92,0 % в отдельных пробах. При $D_1 = 0,22$ качество воды здесь характеризовалось как “слабозагрязненная” или как олиго-β-мезосапробный класс.

Согласно значениям индекса Шеннона (H_N) качество воды в пунктах I и IV варьировало в диапазоне “грязные воды” – “загрязненные воды”, в остальных пунктах – “умеренно загрязненные” – “чистые”.

Для большинства рассчитанных индексов наименьшие значения коэффициента вариации C_V отмечались в пунктах (II, III, V, VI), расположенных ниже точек сброса очищенных сточных вод (I, IV). При этом менее всего варьировали значения индексов ТВИ и ЕВІ, а наибольшая изменчивость значений отмечена для индексов BMWP, ЕРТ, D_1 и H_N . Различия в оценке качества воды между пунктами показаны на рис. 5, где видно, что наименьшие значения большинства индексов отмечены для пунктов I и IV. Оценка качества воды по значениям всех индексов, кроме D_1 , между пунктами была достоверна ($p < 0,05$).

Т а б л и ц а 2

Оценка качества воды на исследованном участке р. Вычегда по биотическим индексам

Пункт отбора	BMWP	ASPT	ЕВІ	ТВИ	ЕРТ
I	Плохое	Плохое	Невысокое	β-Мезосапробный	1,0
III + II	Хорошее	Хорошее	Хорошее	Олигосапробный	8,0
IV	Плохое	Плохое	Низкое	β-Мезосапробный	2,0
V + VI	Плохое	Плохое	Невысокое	Олигосапробный	2,5
C_V	30,4–97,9	26,6–78,1	15,9–41,6	10,4–41,1	44,4–100,0

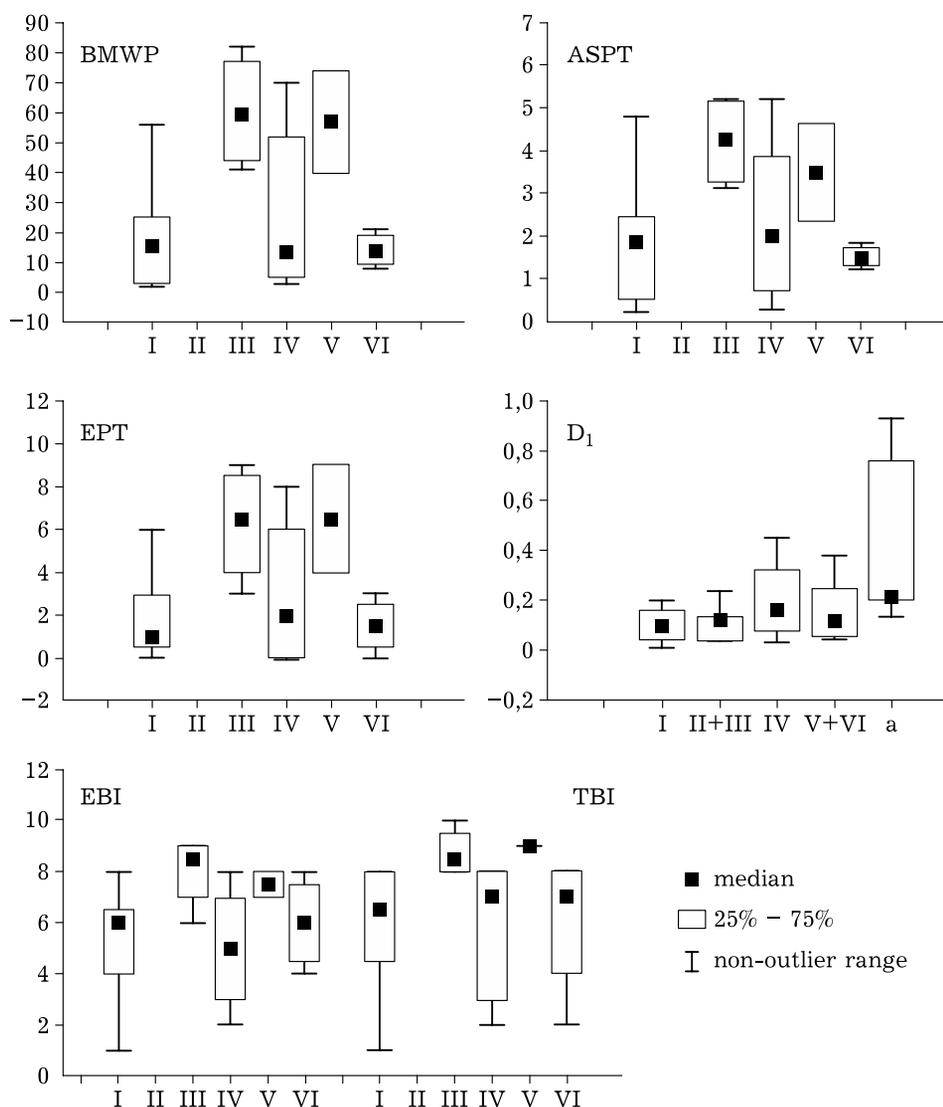


Рис. 5. Бокс-плоты значений индексов оценки качества вод.
 I – VI – пункты наблюдений на исследованном участке р. Вычегда, 2018–2020 гг.;
 а – данные за 1988 г. По оси ординат – показатель индексов

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных нами мониторинговых наблюдений за сообществом донных организмов р. Вычегда в зоне непосредственного влияния условно чистых сточных вод АО “Монди СЛПК” выявили прежде всего рост количественных показателей развития донной фауны и числа таксономических групп, высокие показатели видового разнообразия в модельных группах более чем через 30 лет после первых наблюдений.

Относительно ранних исследований среди групп, доминирующих по численности и биомассе, в составе зообентоса возросла

роль мейобентических ракообразных (преимущественно Cladocera), особенно в точках сброса сточных вод. Это может быть связано с массовым развитием водорослей [DeMott, Tessier, 2002], как наблюдалось в период проведения исследований [Патова и др., 2021б], и указывать на возможную активизацию процессов эвтрофирования [Крючкова, 1987]. Ранее показано [Батурина, Кононова, 2021], что сточные воды предприятий целлюлозно-бумажной промышленности оказывают различное воздействие на биоту водоемов, влияя как непосредственно на организмы, так и опосредованно через изменение среды обитания.

Исследованный участок реки характеризуется повышенной температурой воды [Елсаков, Щанов, 2016]. Известно [Яковлев, 2005; Яныгина, 2011], что поступление дополнительного тепла, так же как и умеренное повышение трофности, особенно для северных водоемов, часто приводит к повышению биопродуктивности и биоразнообразия. Следует отметить, что такие высокие показатели развития не характерны для аборигенных донных сообществ на преобладающих песчаных грунтах среднего течения р. Вычегда [Батурина и др., 2016], что является фактом, подтверждающим наличие изменений в экосистеме реки.

Анализ динамики количественных показателей и структуры зообентоса по продольному профилю реки показал широкий диапазон колебаний этих значений. Так, в составе сточных вод целлюлозно-бумажного производства могут содержаться высокие уровни питательных веществ [Lowell et al., 1985; Hall et al., 1991; Culp et al., 2000a], которые накапливаются в донных отложениях, вызывают изменения в составе бентических водорослей и повышают продуктивность сообществ беспозвоночных. В наших наблюдениях [Патова и др., 2021a] гидрохимические показатели, связанные с общим содержанием органических веществ, и концентрация соединений биогенных элементов превышают нормативные значения во всех пунктах наблюдений, а максимальные их показатели отмечены в п. IV. Также значительно увеличились количественные показатели развития зообентоса исследованного участка реки относительно контрольного. В некоторых исследованиях [Bothwell, 1992; Culp, 2000b] показано, что обилие перифитона и плотность беспозвоночных увеличивались ниже сбросов сточных вод подобно тому, что мы наблюдали на р. Вычегда. Однако, если бы сбросы сточных вод были токсичны для биоты, это, наоборот, проявилось бы в сокращении численности и биомассы беспозвоночных, снижении биоразнообразия сообществ, доминировании единичных устойчивых к загрязнению таксонов [Яковлев, 2005].

Известно [Culp, 2000a, b], что сообщества беспозвоночных на участках сброса сточных вод более похожи друг на друга, чем на контрольных участках. Так, биоразнообразие ниже стоков часто имеет большие показатели, чем измеренные в эталонных точках,

что, вероятно, связано с большей плотностью насекомых, которая определяет появление редких таксонов. В наших исследованиях сходство фаун на протяжении всего участка оценивалось как “умеренное”. При этом между пунктами I и IV (точками сброса очищенных сточных вод АО “Монди СЛПК”) отмечали схожий состав структурообразующих комплексов, а основное различие в составе доминирующего комплекса видов по пунктам определялось составом нехируномидных амфибиотических насекомых, преимущественно Ephemeroptera и Plecoptera, доля редких видов среди которых была наибольшей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период исследования (2018–2020 гг.) в составе зообентоса р. Вычегда в зоне влияния сточных вод АО “Монди СЛПК” установлены 23 таксономические группы донных беспозвоночных, для семи из них выявлено 125 видов и форм. Отмечены высокие значения видового разнообразия и количественные показатели развития донной фауны, не характерные для среднего течения р. Вычегда. Все характеристики биоценозов повышались в пунктах, расположенных ниже непосредственного сброса условно чистых сточных вод, вероятно, под влиянием тепляющего эффекта попадающих в реку стоков и накоплением на дне водотока обогащенных органическими веществами отложений. В составе модельных групп наблюдалось преобладание видов-индикаторов умеренного загрязнения (β - и α -сaproбов), в пунктах сброса очищенных сточных вод значительна была роль индикаторов α - и полисапробных условий. В целом, большинство рассчитанных индексов дают на участке мониторинга достоверно сходную оценку качества вод, определяя его состояние как “удовлетворительное”. Однако в пунктах I и IV, расположенных в местах сброса очищенных сточных вод, состояние водотока характеризовалось как “неудовлетворительное”. Таким образом, на исследованном участке не отмечалось токсического влияния сточных вод на сообщество донных беспозвоночных, но наблюдались процессы антропогенного эвтрофирования экосистемы реки.

Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания № АААА-А17-117112850235-2

и при финансовой поддержке проекта “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” на биологическое разнообразие в районе производства” (договор № 45-2018/180405).

ЛИТЕРАТУРА

- Батурина М. А., Кононова О. Н. Влияние сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности на водные зооценозы: обзор литературы // Сиб. экол. журн. 2021. Том 28, наст. вып. С. 685–695. doi:10.15372/SEJ20210601 [Baturina M. A., Kononova O. N. Impact of waste waters from the pulp and paper industry on aquatic zoocenoses: a review of the literature // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 6].
- Батурина М. А., Кононова О. Н., Елсаков В. В. Гидробиологические характеристики рек Вычегодского бассейна в различных единицах ландшафтного деления // Принципы экологии. 2020. № 1. С. 4–26. doi: 10.15393/j1.art.2020.9982
- Батурина М. А., Кононова О. Н., Фефилова Е. Б., Хохлова Л. Г., Зиновьева А. Н. Изученность водных беспозвоночных крупных рек Республики Коми (Печора и Вычегда) // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3 (27). С. 42–53.
- Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д. Применение биотических идентификаторов для оценки качества вод притоков реки Сок (рр. Байтуган, Камышла, Сосновка) // Вестн. Волжского ун-та им. В. Н. Татищева. 2011. № 11. С. 10–19.
- Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // Современ. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 135–145. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145
- Ермолаева Н. И., Двуреченская С. Я. Региональные индексы индикаторной значимости зоопланктонных организмов в водоемах юга Западной Сибири // Экология. 2013. № 6. С. 476–480. doi: 10.7868/S0367059713060061 [Ermolaeva N. I., Dvurechenskaya S. Ya. Regional indices of the indicator significance of zooplanktonic organisms in water bodies of southern Western Siberia // Rus. J. Ecol. 2013. Vol. 44, N 6. P. 527–531. doi: 10.7868/S0367059713060061].
- Крючкова Н. М. Структура сообществ зоопланктона в водоемах разного типа // Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. С. 184–198.
- Личутина Т. Ф., Гусакова М. А., Мискевич И. В., Цыганов С. П., Соболева Т. В. Экологическая оценка производства продукции на целлюлозно-бумажных предприятиях бассейна р. Северная Двина в соответствии с требованиями европейского сообщества // Лесн. журн. 2011. № 1. С. 89–91.
- Макрушин А. В. Библиографический указатель по теме “Биологический анализ качества вод” с приложением списка организмов индикаторов загрязнения. Л.: Зоол. ин-т АН СССР, 1974. 53 с.
- Максименко П. Ю., Скурлатов Ю. И., Козлов Ю. П., Фрог Б. Н., Штамм Е. В., Козлова Н. Б. Вероятная роль серосодержащих соединений в формировании токсических свойств сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2000. № 4. С. 63–70.
- Методика изучения биогееценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
- Мискевич И. В., Самохина Л. А. О некоторых особенностях сезонной динамики гидробиологических процессов на равнинных водотоках на примере реки Вычегда // Вестн. соврем. исследований. 2019. Вып. 3–11(30). С. 124–130.
- Особенности пресноводных экосистем малых рек. Тольятти: Касандра, 2011. 322 с.
- Патова Е. Н., Кондратёнок Б. М., Сивков М. Д., Кострова С. Н. Качество вод реки Вычегда в условиях поступления очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021а. Т. 28, наст. вып. С. 696–714. doi:10.15372/SEJ20210602 [Patova E. N., Kondratenok B. M., Sivkov M. D., Kostrova S. N. Water quality of the Vychegda River under the conditions of the receipt of treated wastewater from the pulp and paper industry // Contemporary Problems of Ecology. 2021a. Vol. 14, N 6].
- Патова Е. Н., Стенина А. С., Шабалина Ю. Н., Стерлягова И. Н. Фитопланктонные сообщества реки Вычегда в зоне поступления очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021б. Т. 28, наст. вып. С. 746–756. doi:10.15372/SEJ20210606 [Patova E. N., Stenina A. S., Shabalina Ya. N., Sterlyagova I. N. Phytoplankton communities of the Vychegda River in the zone of treated wastewater inflow of the pulp and paper industry // Contemporary Problems of Ecology. 2021b. Vol. 14, N 6].
- Семенченко В. П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.
- Троянская А. Ф. Хлороорганические соединения в донных осадках реки Вычегда на территории Республики Коми в условиях изменяющейся антропогенной нагрузки // Регион. экология. 2019. № 1 (55). С. 108–124. doi: 10.30694/1026-5600-2019-108-124
- Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 3. Методы биологического анализа вод. Прил. 2. Атлас сапробных организмов. М.: Гидрометеозидат, 1977. 227 с.
- Фефилова Е. Б., Расова Е. Е., Велегжанинов И. О. Исследования морфологии и генетики веслоногих раков (Copepoda) в зонах теплового загрязнения рек Республики Коми // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, наст. вып. С. 737–745. doi:10.15372/SEJ20210605 [Feofilova E. B., Rasova E. E., Velegzhaninov I. O. Morphological and genetic studies of copepods (Copepoda) of zones of the Komi Republic rivers effected of thermal pollution // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 6].
- Чертопруд М. В., Чертопруд Е. С. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 184 с.
- Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Изменение таксономического и функционального разнообразия сообществ макрзообентоса по продольному градиенту рек // Успехи соврем. биологии. 2013. Вып. 6 (133). С. 575–587.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.

- Яковлев В. А. Оценка качества поверхностных вод Кольского Севера по гидробиологическим показателям и данным биотестирования (практические рекомендации). Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1988. 27 с.
- Яковлев В. А. Пресноводный зообентос Северной Феноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Ч. 2. Апатиты: Изд. Кол. науч. центра РАН, 2005. 145 с.
- Яныгина Л. В. Экология сообществ донных беспозвоночных в водоемах-охладителях тепловых электростанций Сибири // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 618–630. [Yanygina L. V. Ecology of benthic invertebrate communities in cooling reservoirs of thermal power stations in Siberia // Water Resources. 2011. Vol. 38, N 5. P. 670–681.]
- Baturina M., Fefilova E., Loskutova O. The list of zoobenthos taxa of the Vychegda River (in the areas impacted wastewaters of pulp and paper industry). Mendeley Data. 2021. Vol. 1. doi: 10.17632/86zs8ts2fv.1
- Bothwell M. L. Eutrophication of rivers by nutrients in treated kraft pulp mill effluent // Water Quality Res. J. Can. 1992. Vol. 27. P. 447–472.
- Culp J. M., Cash K. J., Wrona F. J. Cumulative effects assessment for the Northern River Basins Study // J. Aquat. Ecosyst. Stress and Recov. 2000a. Vol. 8. P. 87–94. doi: 10.1023/A:1011404209392
- Culp J. M., Podemski Ch. L., Cash K. J. Interactive effects of nutrients and contaminants from pulp mill effluents on riverine benthos // J. Aquat. Ecosyst. Stress and Recov. 2000b. Vol. 8. P. 67–75. doi: 10.1023/A:1011452108483
- DeMott W. R., Tessier A. J. Stoichiometric constraints vs. algal defenses: testing mechanisms of zooplankton food limitation // Ecology. 2002. Vol. 83, N 12. P. 3426–3433 doi: 10.1890/0012-9658(2002)083
- Hall T. J., Haley R. K., LaFleur L. E. Effects of biologically treated bleached kraft mill effluent on cold water stream productivity in experimental stream channels // Environ. Toxicol. Chem. 1991. Vol. 10. P. 1051–1060.
- Lowell R. B., Culp J. M., Wrona F. J. Stimulation of increased short-term growth and development of mayflies by pulp mill effluent // Environ. Toxicol. Chem. 1985. Vol. 14. P. 1529–1541.

State of benthic communities of Vychegda River under influence of treated wastewater from pulp and paper industry

M. A. BATURINA, E. B. FEFILOVA, O. A. LOSKUTOVA

*Institute of Biology of Komi Science Centre of the UB of the RAS
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: baturina@ib.komisc.ru*

We characterized the composition and diversity of benthic communities, as well as the current ecological state of Vychegda River in the zone of influence of wastewater from a pulp and paper production. A high diversity of benthic fauna and quantitative indicators of its development which are not typical for benthic biocenoses in the middle reaches of Vychegda River were registered. In the composition of the zoobenthos, 23 taxonomic groups of benthic invertebrates were identified. For 7 model groups, we identified 125 species and forms, as well as a persistent complex of species dominating in the studied section of the river. The model groups were dominated by indicator species of α - β - and β -saprobic conditions. In general, the water quality assessment indices based on the composition and structure of benthic invertebrate communities characterize the state of the river at the monitoring site as “satisfactory”. An exception was the wastewater discharge points, where the role of indicator species of α - and polysaprobic conditions was higher and the values of most of the indices were significantly lower.

Key words: zoobenthos, aquatic invertebrates biodiversity, pulp and paper production treated wastewater, Vychegda River.