

УДК: 556.5 : 579.26

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ БАКТЕРИОБЕНТОСНЫХ СООБЩЕСТВ
МАЛЫХ РЕК ЕВРОПЕЙСКО-ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ЮЖНОГО УРАЛА**

© 2025 Н.Г. Шерышева

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

Исследовано влияние условий ландшафтно-географической зональности на структуру доминирования бактериобентосных сообществ малых рек разных географических зон: Южного Урала, Приволжской возвышенности и Окско-Донской низменности Русской равнины. Рассматривается влияние на бактериобентосные сообщества и доминантные таксоны факторов среды: pH, гранулометрического состава донных отложений, содержания органического вещества и общего железа. *Ключевые слова:* малые реки, бактериобентосные сообщества, жирно-кислотные маркеры, доминантный комплекс, таксономический состав, ландшафтно-географическая зональность, экологические факторы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-413-418

EDN: SWMNKN

Исследования проведены в рамках темы государственного задания «Влияние изменений природно-климатических условий на состояние биоразнообразия и функционирование природных и антропогенно-измененных экосистем», рег. № 1024032600218-3-1.6.20

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей организации пространственной структуры бактериальных сообществ является одной из фундаментальных задач современной экологии. В условиях ежегодно возрастающего антропогенного пресса на экосистемы внутренних водоемов все актуальнее становится изучение малых рек – первичного звена гидрографической сети, питающих большинство крупных водоемов России. Донные отложения водотоков, как зональные элементы ландшафта, служат местом обитания для микроорганизмов – важнейшего компонента деструкционного цикла [1]. Деятельностью бактериобентосного сообщества определяется состояние, как самих донных отложений, так и качество вод притоков. Географические особенности структуры донных бактериальных сообществ малых рек на территории России в литературе не рассматривались. Цель настоящей работы заключалась в изучении структуры доминантного комплекса и таксономического состава бактериобентосных сообществ на малых реках разных географических зон России с учетом особенностей типа донных отложений и отдельных факторов среды обитания.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таксономическая структура донных микробных сообществ изучалась на малых реках Окско-Донской низменности Русской равнины (реки Хмелина и Малый Ломовис), Приволжской возвышенности (реки Свинуха и Сура) и предгорья Южного Урала (река Коелга). Исследованные биотопы расположены на участках подводных переходов магистральных нефтепродуктопроводов (рис. 1). Отмеченные реки в разной степени испытывают антропогенную нагрузку (распашка земель долин рек, магистрали нефтепродуктопроводов, комплексы гидротехнических сооружений – плотины, автомобильные переправы, водохозяйственные объекты). Пробы грунта отбирались лотом (объемом захвата 100 см³) с поверхностных слоев донных отложений (0–5 см) из центральных участков рек в зонах подводного перехода нефтепродуктопровода. Исследования проводились в 2011–2015 гг.

Таксономический состав микробных сообществ изучали методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии (ГХ-МС), позволяющим определить количественное соотношение микроорганизмов в пробе. Анализ проводили на ГХ-МС системы AT-5850/5973 фирмы Agilent Technologies (США) в лаборатории Академической группы Академика РАМН Ю.Ф. Исакова Научного Центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева г. Москва. Метод ГХ-МС позволяет определить родовую (а иногда и видовую) принадлежность бактерий численностью более 10⁴ кл/г сухого ила [2]. Состав

*Шерышева Наталья Григорьевна, кандидат биологических наук, доцент, научный сотрудник лаборатории гидробиологии,
E-mail: sapfir-sherry@yandex.ru*



Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб на малых реках:

- 1 – р. Хмелина, 2 – р. М. Ломовис (Окско-Донская низменность), 3 – р. Сура,
4 – р. Свинуха (Приволжская возвышенность), 5 – р. Коелга (предгорья Южного Урала)

микробных сообществ рассчитывали в электронных таблицах «EXCEL» с помощью разработанного алгоритма расчета [2, 3], дополненного локальной базой жирно-кислотных маркеров, разработанной нами для сообществ озерных илов [3]. Число клеток микроорганизма рассчитывали по формуле [2]: $N_i = A_i \times k / R_i$, где N_i – число клеток в единице веса пробы (г), A_i – площадь пика маркера, по которому проводятся вычисления, k – коэффициент пропорциональности, учитывающий условия анализа и чувствительность прибора, R_i – доля в % маркера в профиле жирных кислот определяемого микроорганизма. ГХ-МС анализ определен автором метода д.м.н. Г.А. Осиповым.

Для количественной оценки степени доминирования устанавливали шкалу рангов по численности с учетом особенностей структуры сообществ: менее 1% – малозначимые виды; 1–5% – второстепенные виды; 5–10% – субдоминанты; более 10% – доминанты [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные хромато-масс-спектрометрическим методом анализы показали, что таксономическое разнообразие донного бактериоценоза рассматриваемых водотоков включает микроорганизмы 55-ти таксонов родового/видового ранга домена *Bacteria*, принадлежащих филумам *Cyanobacteria*, *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroides*, *Spirochaetes* (рис. 2).

Бактериальный комплекс обитателей донных отложений малых рек представлен родами *Acetobacter*, *Acetobacterium*, *Actinomadura*, *Actinomyces*, *Aeromonas*, *Burkholderia*, *Agrobacterium*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Cellulomonas*, *Chlamydia*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Cytophaga*, *Flexibacter*, *Desulfotomaculum*, *Desulfovibrio*, *Eubacterium*, *Leptothrix*, *Methylococcus*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Nitrobacter*, *Nocardia*, *Hydrogenophaga*, *Propionibacterium*, *Pseudomonas*, *Pseudonocardia*, *Rhodococcus*, *Sphaerotilus*, *Sphingomonas*, *Spirochaeta*, *Staphylococcus*, *Streptomyces*, *Geothrix*, *Thiobacillus*, *Xanthomonas* и семейством *Enterobacteriaceae*. Были обнаружены также группа диссимиляционных железоредукторов FeRed (Турова, 1996) [5], FeRB (Lovley) и FeRed KM-2 (Лебедева) и сине-зеленые водоросли родов *Anabaena*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* филума *Cyanobacteria*.

Численность бактериобентоса, определенная методом ГХ-МС, изменялась в пределах от $5,43 \times 10^7$ кл/г до $44,93 \times 10^7$ кл/г сухого грунта. В илах, обедненных органическим веществом р. Сура численность бактерий составляла $6,90 \times 10^7$ кл/г, р. Малый Ломовис – $7,76 \times 10^7$ кл/г. На биотопах рр. Коелга и Хмелина с наибольшим содержанием органического вещества популяции бактериобентоса достигали максимального развития. Их численность составляла $21,63 \times 10^7$ кл/г и $44,93 \times 10^7$ кл/г, соответственно. Самой малочисленной оказалось сообщество бактерий в илах р. Свинуха – $5,43 \times 10^7$ кл/г.

По результатам хромато-масс-спектрометрического анализа произведена количественная оценка доминирования в изучаемых сообществах. Так, в торфянистом иле р. Хмелина доминировали виды р. *Butyrivibrio*. В илистых песках с растительным детритом водотоков М. Ломовис и Сура обнаружены доминантные таксоны – р. *Acetobacter* и железоредукторы FeRB (Lovley), в «техногенном» иле р. Свинуха преобладали только железоредукторы FeRB (Lovley). Биотоп р. Коелга с более высокой скоростью течения, а, следовательно, и более быстрой сменой условий среды, характеризовался отсутствием в бактериобентосном сообществе доминант.

Субдоминанты речных биоценозов в обобщенном варианте представлены рр. *Acetobacter*, *Aeromonas*/*Burkholderia*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Cyanobacteria*, *Rhodococcus*, *Spirochaeta*, *Propionibacterium* и железоредукторами FeRB (Lovley). Субдоминантный бактериальный комплекс отражает связь с механическим составом донных отложений. Так, вклад субдоминантных таксонов в общую численность бактерий увеличивался с повышением содержания алевритово-пелитовой фракции (рис. 3, 4), обладающей способностью сорбировать органическое вещество и биогенные элементы.

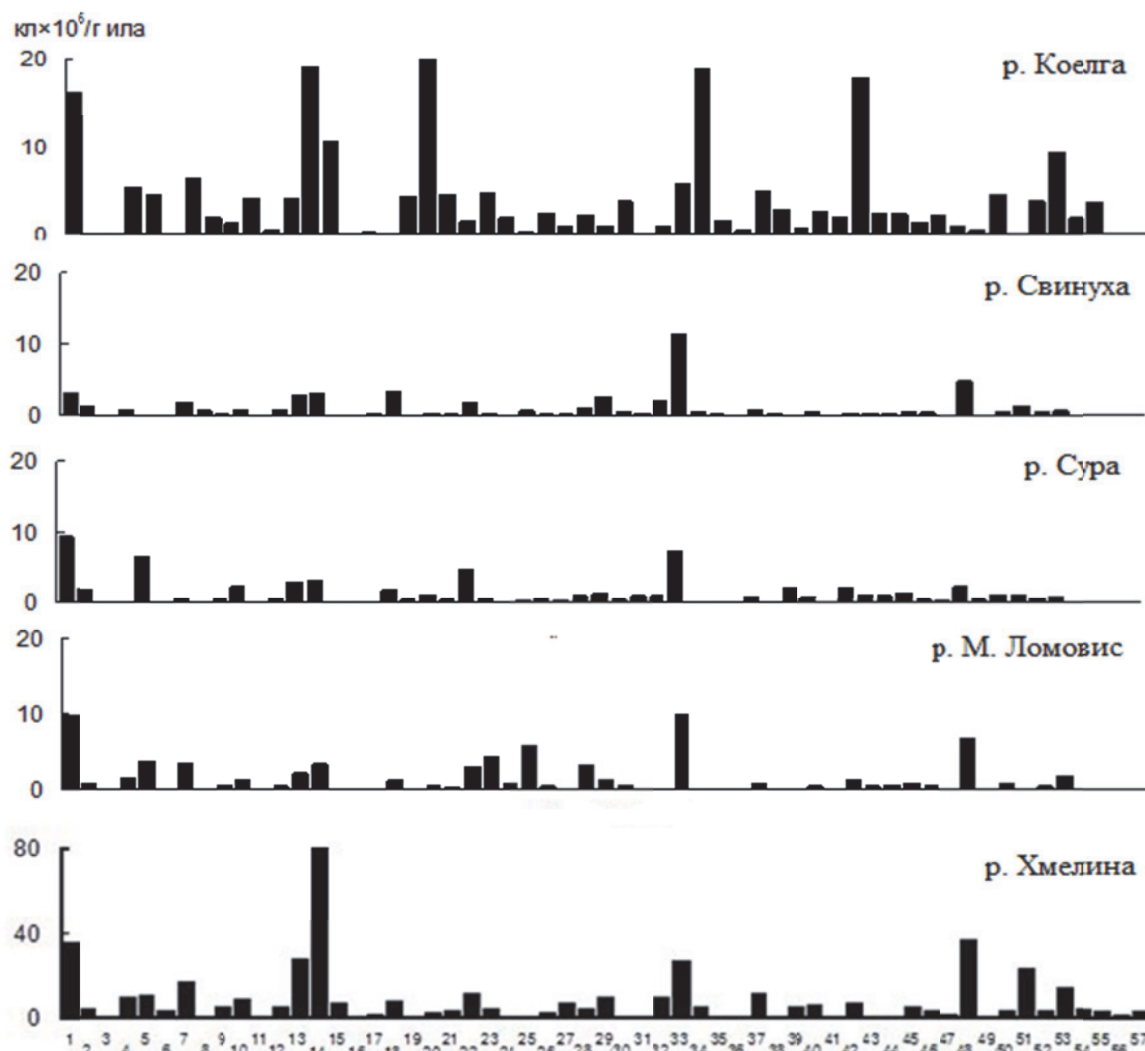


Рис. 2. Таксономический состав и численность бактериальных сообществ донных отложений малых рек географических зон:

Окско-Донской низменности, Приволжской возвышенности, предгорья Южного Урала:

1 – *Acetobacter*, 2 – *Acetobacterium*, 3 – *Actinomadura roseola*, 4 – *Actinomyces*, 5 – *Aeromonas/Burkholderia*, 6 – *Agrobacterium radiobacter*, 7 – *Azospirillum*, 8 – *Bacillus coagulans*, 9 – *Bacillus subtilis*, 10 – *Bacteroides fragilis*, 11 – *Bacteroides hypermegas*, 12 – *Butyrivibrio* 1213, 13 – *Butyrivibrio* 2333, 14 – *Butyrivibrio* 2426, 15 – *Cellulomonas*, 16 – *Chlamydia*, 17 – *Clostridium butyricum*, 18 – *Clostridium* sp., 19 – *Clostridium pasterianum*, 20 – *Clostridium difficile*, 21 – *Corynebacterium aquaticum*, 22 – *Cyanobacteria*, 23 – *Anabaena*, 24 – *Microcystis*, *Oscillatoria*, 25 – *Aphanizomenon*, 26 – *Cytophaga/Flexybacter*, 27 – *Desulfotomaculum*, 28 – *Desulfovibrio*, 29 – сем. *Enterobacteriaceae*, 30 – *Eubacterium*, 31 – *Eubacterium* sp., 32 – *Eubacterium lentum*, 33 – FeRB Lovley, 34 – FeRed KM-2(Лебедева), 35 – FeRed (Тырова, 1996), 36 – *Methylococcus*, 37 – *Micrococcus*, 38 – *Mycobacterium*, 39 – *Nitrobacter*, 40 – *Nocardia carnea*, 41 – *Propionibacterium freudenreichii*, 42 – *Pseudomonas fluorescens*, 43 – *Hydrogenophaga*, 44 – *Pseudomonas* sp., 45 – *P. vesicularis*, 46 – *Pseudonocardia*, 47 – *Rhodococcus terrae*, 48 – *Rhodococcus rhodochrous*, 49 – *Sphaerotilus natans*, 50 – *Sphingomonas capsulata*, 51 – *Spirochaeta* «М», 52 – *Staphylococcus*, 53 – *Streptomyces rimosus*, 54 – *Leptothrix*, 55 – *Geothrix fermentas*, 56 – *Thiobacillus*, 57 – *Xanthomonas*

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех исследованных биотопах обнаружено 62% постоянно обитающих родов/видов, что свидетельствует об эврибионтности большинства таксонов донного бактериального сообщества. Наибольшим разнообразием таксонов характеризовались сообщества обогащенных органическим веществом торфянистого ила р. Хмелина и песчанистого ила р. Коелга. Наиболее значимыми в сообществах были *Acetobacter*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Rhodococcus*, FeRB Lovley, *Azospirillum*, *Cyanobacteria* и представители сем. *Enterobacteriaceae*. Выявленные таксоны составляли основу исследованных бактериальных речных сообществ.



Рис. 3. Процентное распределение по классам доминирования таксономического состава бактериобентосных сообществ малых рек географических зон: Окско-Донской низменности, Приволжской возвышенности, предгорья Южного Урала



Рис. 4. Доля фракций механического состава донных отложений малых рек географических зон: Окско-Донской низменности, Приволжской возвышенности, предгорья Южного Урала.

Гравий: сумма фракций размерами 10-5 мм, 5-2,5 мм, 2,5-1мм;

песок: сумма фракций размерами 1,0-0,5 мм, 0,5-0,25 мм, 0,25-0,10 мм;

алеврит-пелит: сумма фракций размерами 0,10-0,05 мм, 0,05-0,01 мм, 0,01 мм

Главная особенность формирования стока малых рек – их тесная связь с ландшафтом бассейна. Своеобразие экологических условий разных водотоков предполагает наличие особенностей таксономической структуры бактериального населения в донных отложениях. Наши исследования показали, что с повышением pH среды в направлении с запада на восток постепенно происходило изменение видового состава микробных сообществ – доля новых в широтном направлении таксонов в составе бактериобентосного сообщества увеличивалась до 14%. Так, популяция бактерий, формирующаяся в кислых торфянистых илах р. Хмелина, обогащенных железом, включала рода *Cellulomonas*, *Thiobacillus*, железобактерии р. *Leptothrix*, железоредукторы *Geothrix fermentas*. В слабокислых илах р. Малый Ломовис обнаружен *Agrobacterium radiobacter*. В нейтральных илах рек Свиноуха и Сура появляется *Bacillus coagulans*, *Clostridium butyricum*, *Sphaerotilus natans* и быстрорастущие *Mycobacterium*. Организмы *Propionium freudenreichii* и *Methylococcus* обнаружены только в слабощелочных грунтах р. Коелга.

Показано [6], что для характеристики ландшафтов большое значение имеет содержание органического вещества, от концентрации и качественного состава которого зависит структура бактериальной популяции [7], так как ведущим в микробной системе является цикл углерода. Полученные нами значения количественных показателей бактериальных популяций рр. Хмелина, Коелга, Малый Ломовис и Сура отражают различное содержание органического вещества в донных отложениях исследованных водотоков (таблица). Неожиданный результат был получен на участке подводного перехода р. Свиноуха. Несмотря на то, что в донных отложениях исследуемого биотопа реки содержание органического вещества было велико, численность бактерий в них оказалась наименьшей, по сравнению с другими реками. Причина этого, по-видимому, заключается в специфичности условий, в которых формируется качественная структура органического вещества в р. Свиноуха. Река почти на всем своем протяжении протекает в пределах г. Самары. Такое расположение позволяет отнести ее к сильноизмененным водохозяйственными мероприятиями водотокам. Ил в р. Свиноуха характеризуется сильным запахом нефтепродуктов, что указывает на аккумуляцию веществ техногенного происхождения. Поэтому органическое вещество в донных отложениях этой реки может содержать химические компоненты, угнетающие развитие микрофлоры.

Таблица. Физико-ландшафтные и химические показатели донных отложений водотоков на участках перехода нефтепродуктопроводов [8, 9]

Реки	Почвы	Тип донных отложений	Н, м	Алеврит-пелит, %	pH	Fe _{общ.} мг/г	C _{орг} мг/г
Предгорье: Восточный склон хребта Уралтау в северной части Зауральского плато (Челябинская обл.)							
Коелга	Лугово-черноземные, песчаные	Песчанистый ил с органическими включениями	0,64	38,5	7,42	7,00	92,9
Приволжская возвышенность Русской равнины (Самарская, Ульяновская, Пензенская обл.)							
Свинуха	Супесчаные, песчаные и обыкновенные черноземы	Глинистый ил с запахом нефтепродуктов	0,31	55,3	7,13	7,45	88,4
Сура	Супесчаные и песчаные	Илистый песок	1,86	7,7	7,08	3,19	55,4
Окско-Донская низменность Русской равнины (Тамбовская обл.)							
М. Ломовис	Выщелоченные и оподзоленные черноземы	Песчанистый ил	0,91	17,0	6,48	2,84	71,9
Хмелина	Лугово-черноземные, торфяно-болотистые, дерново-глубоугумусные	Торфянистый ил с органическими включениями	0,67	38,5	5,33	9,75	108,3

Донные отложения исследованных рек в местах подводных переходов нефтепроводов представлены разнотипными грунтами, отражающими особенности ландшафтов (таблица). Зональной особенностью исследованных участков рек является повышение активной реакции среды (pH) донных осадков, структура которых формируется под влиянием почв. Так, активная реакция среды донных осадков рек Хмелина и М. Ломовис, протекающих в черноземах и торфяниках Окско-Донской низменности изменяется от кислой-слабокислой до нейтральной в реках Свинуха и Сура в Приволжской возвышенности, для которой характерен карст, и до слабощелочной в р. Коелга Южного Урала. Закономерностью распределения общего железа и растворенного органического вещества является повышение содержания этих веществ с увеличением мелких алевритовых и пелитовых фракций в механическом составе грунтов. Максимальные их значения характерны для тонкодисперсных илов.

Доминантный комплекс не проявляет какой-либо единой тенденции в своей структуре вдоль географического градиента, но имеет некоторые локальные особенности, обусловленные типом илов и условиями обитания. Разнообразие доминирующих таксонов в западно-восточном направлении снижается. Следует отметить высокий уровень развития диссимиляционных железоредукторов FeRB (Lovley) в составе речных бактериальных донных сообществ: индекс доминирования (доля в общей численности) изменяется от 6% до 21%. Согласно нашим исследованиям индекс доминирования FeRB (Lovley) в озерных илах составляет 1,6– 10%.

ВЫВОДЫ

Впервые проведены исследования географических особенностей доминантной структуры бактериобентосных сообществ малых рек России. Исследованы три региона в западно-восточном градиенте экологических условий: Окско-Донская низменность, Приволжская возвышенность и предгорье Южного Урала. Методом ГХ-СМ в составе бактериальных популяций малых рек выявлено 55 таксонов родового и видового ранга и одного семейства. Независимо от географического положения водотоков основная часть таксономического состава их бактериобентосных сообществ одинакова. Структурообразующим комплексом во всех исследованных биотопах служат *Acetobacter*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Rhodococcus*, FeRB Lovley, *Cyanobacteria* и представители сем. *Enterobacteriaceae*.

Выявлена тенденция в формировании таксономического разнообразия бактериобентоса вдоль градиента активной реакции среды (pH): от кислых илов к слабощелочным происходит смена отдельных таксонов в сообществе: *Geothrix fermentas*, pp. *Leptothrix*, *Thiobacillus*, *Cellulomonas*, *Bacillus coagulans*, p. *Mycobacterium*, *Propionicum freudenreichii* и p. *Methylococcus*. Зональной особенностью

речных микробных сообществ является высокая численность, а в ряде случаев – доминирование группы бактерий FeRB Lovley. Изменение в таксономическом составе и формирование более тонкой структуры бактериальных сообществ определяется локальными условиями среды обитания.

Количественное соотношение доминант отражает экологические особенности ландшафтов в географическом градиенте. Выявлена связь характера доминирования сообществ с тонкодисперсной фракцией грунтов. Содержание органического вещества, его генезис являются значимыми по отношению к количественному развитию бактерий в донных отложениях малых рек. В формировании доминантного комплекса бактериобентосных сообществ локальных биотопов важную роль играют особенности ландшафтов – характер почвенного покрова, соотношение фракций механического состава грунтов, тип донных отложений, активная реакция среды, содержание общего железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов В.В., Федоровский А.С. Основы речной гидрологии и гидробиологии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 384 с.
2. Верховцева Н.В., Осипов Г.А. Метод газовой хроматографии-масс-спектрометрии в изучении микробных сообществ почв агроценоза // Проблемы агрохимии и экологии. 2008. № 1. С. 51–54.
3. Sherysheva N.G., Osipov G.A., Khalko V.V. Studying composition of bacteriobenthic communities in the sediments of water ecosystems by fatty acid markers // J. Inland Water Biology, 2015. 8(3). P. 242–249.
4. Баканов А.И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах // Экологический мониторинг. Методы биологического и физико-химического мониторинга. Часть VI. / Под ред. проф. Д.Б. Гелашвили. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. С. 61–116.
5. Турова Е.С., Осипов Г.А. Изучение структуры микробного сообщества, активного в биотрансформации минералов железа в каолине // Микробиология, 1996. Т. 65. № 5. С. 682–689.
6. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии: Наука, 2004. 348 с.
7. Дробкова В.Г. Зональные изменения интенсивности микробиологических процессов в озерах. – Л.: Наука, 1981. 212 с.
8. Дементьев В.С. Мониторинг поверхностных водных объектов. Оценка качества вод. Чебоксары: Типография «Крона-2», 2008. 276 с.
9. Плетнева С.Ю., Шерышева Н.Г., Загорская Е.П., Страхов Д.А. Ландшафтно-географические особенности донных отложений малых рек // Вектор науки, 2012. № 3 (21). С. 17–32.

GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE DOMINANT STRUCTURE OF BAKTERIOBENTHIC COMMUNITIES OF SMALL RIVERS EUROPEAN-CENTRAL RUSSIA AND SOUTH URALS

© 2025 N.G. Sherysheva

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti, Russia

The influence of the landscape and geographical zonation on the dominant complex and taxonomic compositions and abundances of bacteriobenthic communities in small rivers was studied, including such geographical zones as the Southern Urals, the Volga Upland and the Oka–Don Lowland. The impact of environmental factors on communities such as pH, sediment type, organic matter and total iron contents is discussed.

Keywords: small rivers, bacteriobenthic communities, fatty acid markers, dominant complex, taxonomic structure, landscape zonation, environmental factors.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-413-418

EDN: SWMNKH

REFERENCES

1. Bogatov V.V., Fedorovskiy A.S. Osnovy rechnoy gidrologii i gidrobiologii. Vladivostok: Dal'nauka, 2017. 384 s.
2. Verkhovtseva N.V., Osipov G.A. Metod gazovoy khromatografii-mass-spektrometrii v izuchenii mikrobnykh soobshchestv pochv agrotsenoza // Problemy agrokhimii i ekologii. 2008. № 1. S. 51–54.
3. Sherysheva N.G., Osipov G.A., Khalko V.V. Studying composition of bacteriobenthic communities in the sediments of water ecosystems by fatty acid markers // J. Inland Water Biology, 2015. 8(3). R. 242–249.
4. Bakanov A.I. Kolichestvennaya otsenka dominirovaniya v ekologicheskikh soobshchestvakh // Ekologicheskii monitoring. Metody biologicheskogo i fiziko-khimicheskogo monitoringa. Chast' VI. / Pod red. prof. D.B. Gelashvili. – N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2006. S. 61–116.
5. Turova Ye.S., Osipov G.A. Izucheniye struktury mikrobnogo soobshchestva, aktivnogo v biotransformatsii mineralov zheleza v kaoline // Mikrobiologiya, 1996. T. 65. № 5. S. 682–689.
6. Zavarzin G.A. Lektsii po prirodovedcheskoy mikrobiologii: Nauka, 2004. 348 s.
7. Drobkova V.G. Zonal'nyye izmeneniya intensivnosti mikrobiologicheskikh protsessov v ozerakh. L.: Nauka, 1981. 212 s.
8. Dement'yev V.S. Monitoring poverkhnostnykh vodnykh ob'yektov. Otsenka kachestva vod. Cheboksary: Tipografiya «Krona-2», 2008. 276 s.
9. Pletneva S.YU., Sherysheva N.G., Zagorskaya Ye.P., Strakhov D.A. Landshaftno-geograficheskiye osobennosti donnykh otlozheniy malyykh rek // Vektor nauki, 2012. № 3 (21). S. 17–32.

Natalya Sherysheva, Candidate of Biological, Associate Professor, Researcher at the Laboratory of Hydrobiology.
E-mail: sapfir-sherry@yandex.ru