



УДК УДК 28.081.8(470.12)

ВЛИЯНИЕ ОСВОЕННОСТИ ВОДОСБОРА РЕКИ ВЕРХНЕЙ СУХОНЫ (ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТЬ) НА ЗООБЕНТОС ЕЕ ПРИТОКОВ

ИВИЧЕВА

Ксения Николаевна

Вологодский филиал ФГБНУ "ВНИРО",

ksenya.ivicheva@gmail.com

ФИЛОНЕНКО

Игорь Владимирович

Вологодский филиал ФГБНУ "ВНИРО", igor_filonenko@mail.ru

Ключевые слова:

зообентос
антропогенная
нагрузка
ГИС
биотические
индексы
качество вод

Аннотация: Впервые для Вологодской области рассмотрено влияние хозяйственной деятельности на водосборе на структуру сообществ зообентоса на примере притоков реки Сухоны (Вологодская область). Полевые исследования проведены в 2010–2013 гг. на 10 створах 6 рек (Вологда, Лоста, Лухта, Комья, Черный Шингарь, Белый Шингарь). Всего было отобрано 292 пробы. Беспозвоночные идентифицировались до наименьшего определяемого таксона. Для оценки качества вод рассчитывались индексы видового разнообразия (Шеннона – Уивера, Маргалефа, Симпсона), биотические индексы (Trent Biotic Index, Belgian Biotic Index), сапробность, индекс Гуднайта – Уитлея. С применением ГИС-технологий рассчитаны площади водосборов и земель с разными видами антропогенной нагрузки. Для расчета плотности населения использованы данные переписи. При приближении к городу происходит уменьшение видового богатства с выпадением наиболее чувствительных таксонов. Наблюдается изменение структуры сообществ донных макробеспозвоночных: количественные показатели олигохет увеличиваются, всех остальных таксонов – уменьшаются. Индексы видового разнообразия, биотические индексы при приближении к городу уменьшаются, сапробность, индекс Гуднайта – Уитлея, наоборот, увеличиваются. С приближением к городу Вологде отмечается уменьшение лесистости территории и увеличение доли урбанизированных земель и земель, занятых сельским хозяйством, а также плотности населения. Отмечена положительная достоверная корреляция плотности населения и площадей населенных пунктов с количественными показателями олигохет и хирономид, индексами TBI, сапробностью. Отрицательная достоверная корреляция – с видовым богатством, индексами видового разнообразия, биотическими индексами TBI и BBI. Леса и сельскохозяйственные угодья не показывают достоверной корреляции с параметрами зообентоса из-за высокой доли урбанизации. Наибольшие значения корреляции отмечены для индексов Гуднайта – Уитлея и TBI, данные индексы являются наиболее информативными. Полученные закономерности могут экстраполироваться на относительно большую территорию. Использованные методы ГИС желательно применять на этапе подготовки к биомониторинговым исследованиям.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 22 ноября 2018 года

Подписана к печати: 26 марта 2019 года

Введение

Деятельность человека может приводить к ухудшению качества поверхностных вод. Наряду с прямыми сбросами, выделяют такие типы антропогенной нагрузки на водотоки, как фрагментация русла, биозагрязнение и нарушение водосборов (Vörösmarty et al., 2010). Под нарушением водосборов понимают их распашку, выпас скота, осушение болот и покрытие непроницаемыми для стока территориями (например, асфальтовое покрытие). Леса, равномерно распределяя поверхностный сток в течение года, являются показателем целостности водосбора. На распаханых и вытоптаных скотом территориях увеличивается эрозия, вносимые на поля удобрения частично попадают в водоток (Gao et al., 2014). Болота формируют специфические условия на водосборе, которые в значительной степени определяют состав и структуру их гидробиоценозов (Филиппов, 2017). Непроницаемые для стока территории характерны для урбанизированных и субурбанизированных территорий. Урбанизированные территории характеризуются увеличением ливневого стока и усилением эрозии, а в наших условиях еще и прямыми сбросами в водоток. Поэтому говорят о комплексном воздействии урбанизированных территорий на водоток (Grizzetti et al., 2017; Kuzmanovic et al., 2016; Wang et al., 2016). Близким к степени урбанизации показателем является также плотность населения на водосборе (Luck, 2007).

Зообентос, благодаря длительным жизненным циклам и четкой локализации на участке дна, является общепризнанным индикатором экологического состояния водоема (Шитиков и др., 2005), широко используется в мировой практике и рекомендуется для оценки экологического состояния рек на территории Евросоюза (Anonymous. European Commission Directive, 2000). Влияние антропогенной нагрузки на водосборе на сообщества зообентоса и качество вод, оцененное по зообентосу, показано в ряде статей. Так, негативное влияние вырубок на качество вод на примере территории Республики Коми показано в работе М. А. Батуриной с соавторами (Батурина и др., 2017). В то же время в работе (Boggs et al., 2016) на примере территории штата Флорида продемонстрировано отсутствие негативного влияния вырубок на водосборе на сообщества зообентоса при соблюдении технологических процессов. Негативное влияние присутствия

сельскохозяйственных угодий на территории водосбора на качество вод для территорий Китая, Европы и Северной Африки показано в работах (Kuzmanovic et al., 2016; Wang et al., 2016; Lakew, Moog, 2015). В ряде исследований на примере территории Франции и Бразилии доказано, что сельское хозяйство влияет на сообщества зообентоса лишь в узком прибрежном коридоре (Tanaka et al., 2016; Marzin et al., 2013). Наибольший вред сообществам зообентоса наносит степень урбанизации водосбора, что показано на примере Китая (Wang et al., 2016), Эфиопии (Lakew, Moog, 2015), Австралии (Davies et al., 2010), Европы (Kuzmanovic et al., 2016).

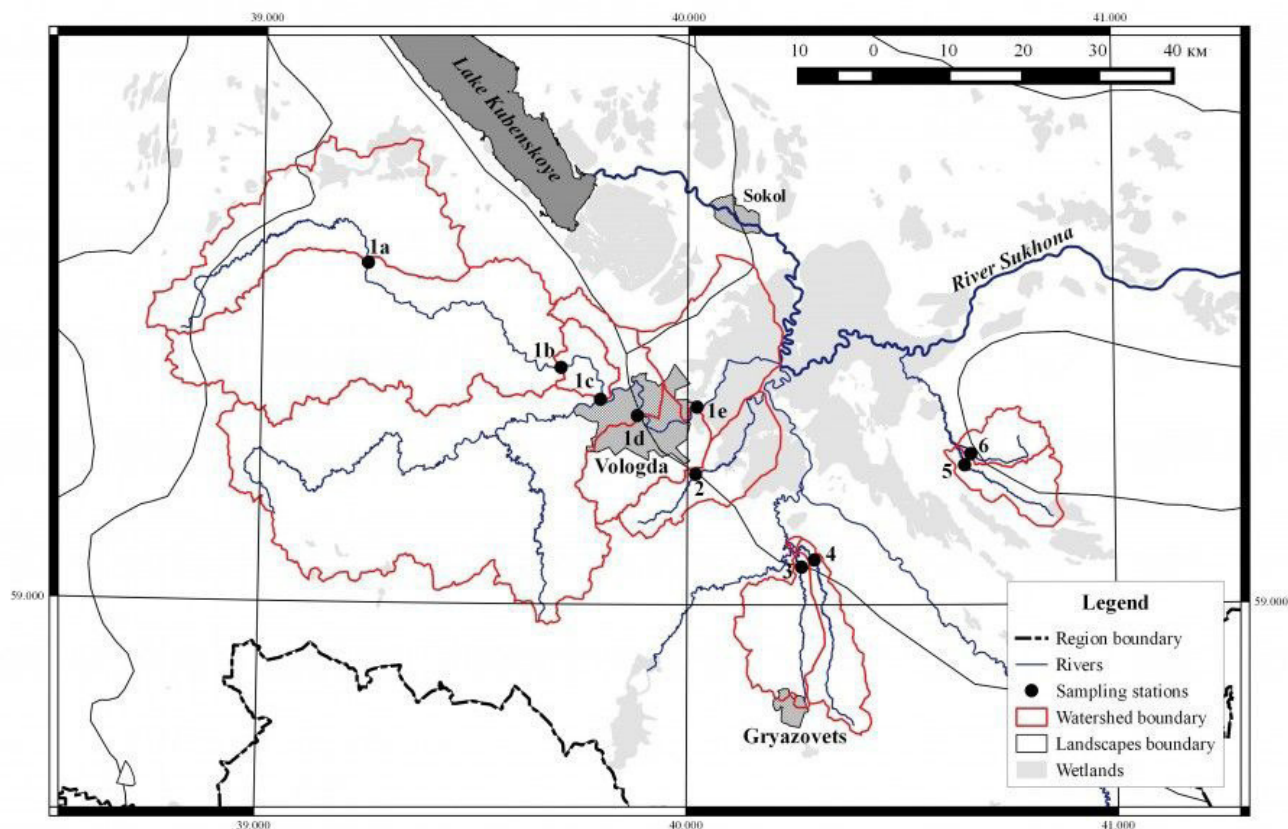
Цель настоящей работы заключалась в рассмотрении влияния хозяйственной деятельности на водосборе на сообщества донных организмов и качество вод водотоков на примере территории Вологодской области.

Материалы

Исследования проводились на 6 реках, относящихся к бассейну Верхней Сухоны (рисунок). Река Вологда относится к группе средних, остальные водотоки – к малым. На р. Вологда заложено 5 створов отбора проб, на остальных реках – по 1. Участки водотоков выше створов отбора проб и сами створы расположены в пределах трех ландшафтов: моренных возвышенностей Вологодско-Грязовецкой и Авнига и озерно-ледниковой Присухонской низины. Отбор проб производился в 2010–2013 гг. Характеристики створов приведены в табл. 1.

Методы

Отбор проб производился авторами на 10 створах согласно гидробиологическим методикам, принятым в ФГБНУ «ГосНИОРХ» (Лобуничева и др., 2013). На каменистых грунтах пробы отбирались путем промывки камней через газ (часть проб в верхнем течении р. Вологда). На мягких грунтах (песок, ил, глина) и в зарослях макрофитов пробы отбирали дночерпателем Гр-91 с площадью захвата 0.0045 м², использовался газ с ячейей 250 мкм. Каждая проба состояла из трех выемок грунта. Пробы фиксировались 40%-ным формалином. Определение организмов до вида осуществлялось по определительным ключам. В случае невозможности идентификации организма до вида, определение производилось до наименьшего определяемого таксона. Всего собрано и обработано 292 пробы зообентоса, из них по р. Вологда – 180, по малым рекам – 112.



Территория исследований и створы отбора проб: 1а – р. Вологда в верховьях; 1b – р. Вологда в водохранилище; 1с – р. Вологда выше города; 1d – р. Вологда в центре города; 1е – р. Вологда ниже города; 2 – р. Лоста; 3 – р. Лухта; 4 – р. Комья; 5 – р. Черный Шингарь; 6 – р. Белый Шингарь

Study area and sampling sites: 1a – Vologda river upstream; 1b – Vologda river reservoir; 1c – Vologda river, upstream the city; 1d – Vologda river in city center; 1e – Vologda river, downstream the city; 2 – Losta river; 3 – Luhta river; 4 – Kom'ya river; 5 – Cherny Shingar' river; 6 – Bely Shingar' river

Расчет индексов видового разнообразия (Шеннона – Уивера, Маргалефа, Симпсона) производился в программе Past. Для оценки качества воды и экологического состояния рассчитывались индексы: Гуднайта – Уитлея, биотический индекс Вудивиса (TBI), Belgian Biotic Index (BBI), Family Biotic Index (FBI) (Семенченко, 2004), сапробность (Sladecsek, 1973).

Для каждого водотока проводилось построение водосборных бассейнов и участков бассейнов до створов инструментами группы Hydrology ArcGis на основе данных Shuttle radar topographic mission (SRTM) (Jarvis et al., 2008). В дальнейшем в пределах водосборов 10 створов рассчитывалась плотность населения и площади земель, занятых населенными пунктами, сельхозугодиями (в эту группу включены пашни, пастбища, сенокосы), лесами и болотами. Анализ данных осуществлялся путем визуального дешифрирования в программе Quantum GIS. Подробная

методика дешифрирования данных зондирования земли описана в (Ивичева, Филоненко, 2017).

Для оценки взаимосвязи экологического состояния вод водотоков и нагрузки на водосбор использован метод корреляции Спирмена.

Результаты

Качество вод в водотоке зависит от хозяйственной деятельности на территории его водосбора. Подробное описание хозяйственной деятельности на водосборе приведено в работе (Ивичева, Филоненко, 2017). На водосборе р. Вологда вниз по течению наблюдается увеличение плотности населения, что взаимосвязано с расположением в пределах водосбора города Вологды (табл. 2). Среди малых рек наименьшая плотность населения на водосборе отмечена для рек Черный Шингарь и Комья, наибольшая – Лухта и Лоста. С приближением

Таблица 1. Основные физические характеристики водотоков
Table 1. Main physical characteristics of streams

№	Минимальная – максимальная ширина в створе, м	Минимальная – максимальная глубина в створе, м	Скорость течения, м/с	Грунт	Ландшафт
1a	11–14	0.3–1	0.4	крупный песок, гравий, валуны	В-Г
1b	40–43	0.5–5	0.01	заиленный песок	В-Г
1c	33–37	0.5–3.5	0.01	заиленный песок	В-Г
1d	68–72	0.5–4	0.01	песок, детрит	Пс
1e	88–90	0.5–3	0.01	ил, детрит	Пс
2	3–4	0.5–1.2	0.01	ил с детритом	В-Г – Пс
3	3–5	0.2–1	0.01	песок с детритом	В-Г – Пс
4	4–5	0.3–1	0.01	песок с детритом	В-Г – Пс
5	3–5	1–1.5	0.01	песок, ил с детритом	Пс
6	2.5–3.5	0.2–0.6	0.4	песок	Ав

Примечание: В-Г – Вологодско-Грязовецкая возвышенность, Пс – Присухонская низина, Ав – возвышенность Авнига.

к городу как вниз по течению р. Вологда, так и в ряду малых рек отмечается уменьшение лесистости водосборов, увеличивается доля открытых территорий.

Всего в составе донных сообществ притоков Верхней Сухоны обнаружено 224 вида и таксона надвидового ранга бентосных организмов. Наиболее распространенной группой являются насекомые (153 вида), из них хирономид – 65 видов. Среди олигохет отмечено 22 вида.

Подробное описание зообентоса района исследования приводится в работах (Ивичева, 2016, 2017). Далее рассматриваются только некоторые характеристики сообществ донных организмов, значимые для настоящей статьи.

Наибольшее число видов зообентоса отмечено в верховьях р. Вологда (1a) (табл. 3). Ниже по течению данной реки наблюдается уменьшение видового богатства. В ряду рек Белый Шингарь – Лоста также происходит снижение числа видов: чем ближе водоток

к областному центру, тем меньше видов в нем регистрируется. Количество видов насекомых снижается пропорционально снижению видового богатства. При приближении к г. Вологде постепенно выпадают наиболее чувствительные таксоны зообентоса (ручейники, поденки, стрекозы, жуки). Вблизи города и на его территории подавляющее большинство видов составляют олигохеты и хирономиды.

Численность и биомасса на разных станциях в течение сезона колеблются в широких пределах. Высокие количественные показатели могут наблюдаться как на хорошо аэрируемых плесах и перекатах в верхнем течении, так и при повышенном содержании органических веществ в нижнем. В обоих случаях донные сообщества состоят из разных таксонов зообентоса. Структура сообществ зообентоса изменяется при приближении к городу: увеличивается доля олигохет, уменьшается относительная численность насекомых (табл. 4).

Видовое богатство и разнообразие в р. Вологда уменьшаются вниз по течению (табл. 5). Среднее число видов в пробе уменьшается с 15 в верховьях до 2 ниже города. Значения индексов Шеннона – Уивера и Маргалефа уменьшаются почти в 10 раз. Среди малых

рек наименьшее видовое богатство и разнообразие отмечено в р. Лоста, протекающей в пригороде г. Вологды. Наибольшие значения зарегистрированы в р. Лухта, несколько меньше – в р. Черный Шингарь.

Таблица 2. Площадь водосбора, плотность населения и землепользование
Table 2. Watershed area, population density and land utilization

№	Площадь водосбора в створе, км ²	Плотность населения в створе, чел./км ²	Леса, %	Эксплуатируемые сельхозугодия, %	Населенные пункты, %
1a	477.2	1.76	65.82	19.40	1.19
1b	1280.4	11.04	64.42	24.13	2.52
1c	1335.4	13.44	62.71	25.43	3.10
1d	2529.4	78.18	60.41	25.91	5.46
1e	2685.4	130.53	57.25	26.35	7.67
2	55.4	29.91	35.02	57.40	5.96
3	143.8	30.62	45.76	46.11	4.59
4	103.3	0.98	59.34	35.33	0.97
5	81.7	0.81	76.74	11.75	0.37
6	54.1	5.36	57.49	29.94	2.96

Таблица 3. Общее число видов и доля видов некоторых групп зообентоса в створах
Table 3. Total number of species and the share of species in some groups of zoobenthos in catchments

№	Число видов	Число видов насекомых	Число видов Chironomidae, %	Число видов Oligochaeta, %
1a	101	80	32	9
1b	72	49	47	11
1c	85	43	33	12
1d	74	42	41	18
1e	16	11	56	19
2	51	32	37	10
3	85	57	35	8
4	66	39	30	8
5	71	43	30	11
6	94	67	40	9

Таблица 4. Относительная численность и биомасса (%) некоторых групп зообентоса
Table 4. Relative abundance and biomass (%) of some groups of zoobenthos

№	Численность Oligochaeta, %	Численность Mollusca, %	Численность насекомых, %	Биомасса Oligochaeta, %
1a	6.9	12.3	79.2	1.8
1b	18.9	17.7	63.1	11.9
1c	37.5	16.8	45.7	40.4
1d	60.2	9.0	28.1	29.9
1e	92.1	0.1	7.6	91.2
2	39.2	21.2	35.6	9.7
3	33.1	21.0	43.7	7.2
4	17.0	43.3	36.7	1.4
5	16.6	33.0	46.3	3.4
6	27.3	10.7	59.6	23.5

Таблица 5. Видовое богатство и индексы видового разнообразия зообентоса (в виде средней арифметической со стандартной ошибкой)

Table 5. Number of species and biodiversity indices of zoobenthos (arithmetical mean and standard deviation)

№	Число видов в пробе	Индекс Шэннона – Уивера	Индекс Маргалефа	Индекс Симпсона
1a	14 ± 1	2.14 ± 0.09	3.35 ± 0.2	0.82 ± 0.02
1b	8 ± 1	1.64 ± 0.12	2.22 ± 0.24	0.73 ± 0.03
1c	9 ± 1	1.78 ± 0.1	2.46 ± 0.15	0.78 ± 0.02
1d	8 ± 2	1.41 ± 0.25	2.13 ± 0.42	0.61 ± 0.09
1e	2 ± 1	0.26 ± 0.09	0.36 ± 0.12	0.14 ± 0.05
2	10 ± 1	1.62 ± 0.12	2.28 ± 0.25	0.7 ± 0.03
3	14 ± 2	1.91 ± 0.16	2.92 ± 0.31	0.77 ± 0.04
4	11 ± 2	1.52 ± 0.17	2.4 ± 0.32	0.66 ± 0.05
5	10 ± 1	1.85 ± 0.13	2.74 ± 0.23	0.78 ± 0.02
6	12 ± 1	1.8 ± 0.22	2.52 ± 0.24	0.66 ± 0.08

По ГОСТ 17.1.3.07–82 согласно индексам Гуднайта – Уитлея и Вудивиса (TBI) реки Вологда (1a) в верховьях и Белый Шингарь (6) относятся к I классу качества, воды характеризуются как очень чистые (табл. 6). Реки Корма (4) и Черный Шингарь (5) – к I–II классу качества, воды очень чистые – чистые. Река Вологда в водохранилище (1б) – ко II классу качества, воды чистые. Реки Вологда ниже плотины (1в) и Лухта (3) – ко II–III классу качества, воды чистые – умеренно загряз-

ненные. Река Лоста (2) – III класс качества, воды умеренно загрязненные. Река Вологда в центре города (1г) – III–IV класс качества, воды умеренно загрязненные – загрязненные. Река Вологда ниже города (1д) – V–VI класс качества, воды грязные – очень грязные. Согласно значениям индекса FBI прекрасное качество воды отмечается лишь в р. Черный Шингарь, хорошее – в р. Вологда в верховьях, посредственное – в р. Вологда в водохранилище, а также в реках Лоста, Лух-

та, Комья и Белый Шингарь, плохое – в р. Вологда ниже плотины, в центре и ниже города. По степени сапробности р. Вологда в верховьях относится к олиго-β-мезосапробным водоемам, реки Черный и Белый Шингарь – к β-мезосапробным. Лишь р. Вологда в нижнем течении является полисапробным водоемом. Все остальные реки и створы являются α-мезосапробными водоемами. Из малых рек наиболее грязной является р. Ло-

ста, однако качество воды в ней сопоставимо с р. Вологда в водохранилище. По всем индексам (рассчитанным на основании относительных количественных показателей, на присутствии или отсутствии отдельных таксонов и на основании видового состава) отмечается ухудшение качества вод в р. Вологда вниз по течению и в малых реках при приближении к областному центру.

Таблица 6. Индексы качества вод (в виде средней арифметической со стандартной ошибкой)
Table 6. Water quality indices (arithmetical mean and standard deviation)

№	Индекс Гуд- найта – Уитлея	TBI	BBI	FBI	Сапробность
1a	6.88 ± 1.1	10	9	4.6	1.59 ± 0.15
1b	22.11 ± 2.61	8	7	6	3.22 ± 0.09
1c	38.48 ± 6.51	8	8	6.8	3.31 ± 0.14
1d	61.59 ± 4.54	3	5	6.8	3.43 ± 0.14
1e	91.83 ± 6.28	2	3	8	3.6 ± 0.01
2	43.06 ± 8.06	6	5	6.2	3.33 ± 0.09
3	36.03 ± 4.51	8	7	5.9	2.95 ± 0.15
4	12.5 ± 3.6	8	8	6.2	2.92 ± 0.11
5	14.88 ± 3.75	9	7	3.2	2.29 ± 0.05
6	11.05 ± 2.8	10	9	5.9	2.12 ± 0.11

Характеристики сообществ зообентоса на разных участках, а также индексы видового разнообразия и экологические индексы демонстрируют корреляционную связь с антропогенной нагрузкой на водосборы (табл. 7). При этом достоверная корреляционная зависимость наблюдается только для таких параметров антропогенной нагрузки, как плотность населения и относительная площадь населенных пунктов. Не выявлено достоверной корреляционной связи между относительной площадью лесов и сельхозугодий и характеристиками зообентоса. Видовое разнообразие и богатство достоверно уменьшаются с увеличением плотности населения и относительной площади населенных пунктов. Наблюдается положительная

корреляционная зависимость между относительным числом видов олигохет и хирономид и плотностью населения на водосборе. Число же видов амфибиотических насекомых в целом, наоборот, снижается при увеличении плотности населения. Наблюдается достоверная отрицательная корреляционная связь между индексами TBI и BBI, значения которых уменьшаются с увеличением антропогенной нагрузки, и плотностью населения. В то же время отмечается положительная корреляционная связь индексов, чьи значения, наоборот, возрастают при увеличении антропогенной нагрузки (индекс Гуднайта – Уитлея, FBI, сапробность) с плотностью населения и долей на водосборе населенных пунктов.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции Спирмена между антропогенной нагрузкой и показателями зообентоса ($p < 0.05$)
Table 7. Coefficients of Spearman correlation between anthropogenic load and zoobenthos' indicators ($p < 0.05$)

Параметр	Плотность населения в створе, чел./км ²	Леса, %	Эксплуатируемые сельхозугодья, %	Населенные пункты, %
Число видов	−0.75	0.25	−0.19	−0.64
Число видов насекомых	−0.68	0.21	−0.18	−0.59
Число видов Oligochaeta, %	0.88	0.15	−0.30	0.64
Число видов Chironomidae, %	0.77	−0.17	0.01	0.71
Численность Oligochaeta, %	0.97	−0.28	0.13	0.89
Численность Mollusca, %	−0.64	0.12	0.11	−0.66
Численность насекомых, %	−0.80	0.30	−0.26	−0.71
Биомасса Oligochaeta, %	0.85	−0.03	−0.14	0.70
Число видов в пробе	−0.77	−0.04	0.13	−0.58
Индекс Шеннона – Уивера	−0.89	0.14	−0.03	−0.71
Индекс	−0.85	0.15	−0.03	−0.72
Индекс Симпсона	−0.88	0.13	0.00	−0.69
Индекс Гуднайта – Уитлея	0.96	−0.31	0.17	0.90
TVI	−0.93	0.27	−0.16	−0.83
BVI	−0.88	0.33	−0.23	−0.82
FBI	0.70	−0.47	0.37	0.77
Сапробность	0.62	−0.40	0.38	0.70

Обсуждение

Полученные материалы показывают, как в данном случае крупный населенный пункт оказывает негативное воздействие на сообщество зообентоса: снижается видовое богатство и разнообразие, упрощается структура сообществ. Биоиндикационные показатели также отражают ухудшение экологического состояния водотоков при приближении к городу. С увеличением антропогенной нагрузки отмечается достоверное снижение видового богатства и разнообразия, а также происходит перестройка сообществ в сторону выпадения амфибиотических насекомых и увеличения роли олигохет. Ранее также отмечено (Gao et al., 2014) выпадение чувствительных таксонов с увеличением антропогенной нагрузки и увеличение числа эврибионтов. Сообщества становятся менее выровненными, увеличивается доминирование отдельных видов олигохет и хирономид.

Достоверную корреляционную связь со степенью антропогенной нагрузки демонстрируют все основные группы индексов (Шитиков и др., 2005): основанные на соотношении отдельных таксонов (Гуднайта – Уитлея), видового разнообразия (Шеннона – Уивера, Маргалефа, Симпсона), основанные на наличии/отсутствии отдельных групп (TBI, BBI, FBI), сапробность. Наибольшие коэффициенты корреляции показывают индексы Гуднайта – Уитлея и Вудивиса (TBI).

При сравнении состояния сообществ зообентоса и характеристик водосбора можно сделать вывод о наибольшем влиянии таких параметров, как плотность населения и доля населенных пунктов. Не выявлено достоверной корреляционной связи долей на водосборе лесов и сельхозугодий с параметрами зообентоса, а также качеством вод, оцененным по зообентосу. В то же время М. А. Батурина с соавторами (Батурина и др., 2017), используя индексы TBI, Гуднайта – Уитлея и соотношение основных таксонов зообентоса, на примере таежной зоны Республики Коми показали положительное влияние лесов и отрицательное влияние вырубок на качество вод водотоков, оцененное на основании характеристик зообентоса. Однако эти исследователи рассматривали водотоки, где антропогенная нагрузка на водосборы сводится, главным образом, к вырубке леса. Существуют также работы (например, Voggs et al., 2016), показывающие отсутствие негативного влияния вырубок на сообщества донных макробеспозвоночных.

Положительное влияние лесов и негативное – сельхозугодий в нашем случае проявляется значительно слабее по сравнению с наблюдаемым эффектом от роста площади населенных пунктов и плотности населения.

Полученные в ходе исследования закономерности находят свое подтверждение также и в других географических зонах. Так, в работе (Wang et al., 2016) на примере юго-восточной провинции Китая на урбанизированных территориях также отмечается уменьшение общего видового богатства в целом и насекомых отдельно, выпадение наиболее чувствительных таксонов, уменьшение значения индекса Шеннона – Уивера и увеличение доли олигохет в сообществах. В отличие от настоящего исследования, в юго-восточной провинции Китая (Wang et al., 2016) наблюдается также достоверное увеличение биомассы в нарушенных районах. Как и в нашем исследовании, наибольшие значения коэффициентов корреляции наблюдаются между показателями зообентоса и долями на водосборе населенных пунктов, наименьшие – между показателями зообентоса и долей полей на водосборе. Однако доля лесов на водосборе также показывает достоверную корреляционную связь с показателями зообентоса. Возможно, это связано с тем, что в исследовании (Wang et al., 2016) отмечается значительно больший разброс в освоенности водосборов: населенные пункты на водосборах исследованных рек занимали до 87 % от площади водосбора, леса – от 7 % площади. В нашем случае леса занимали не менее 35 % водосбора, населенные пункты – не более 7.7 %.

В исследовании на примере Эфиопии (Lakew, Moog, 2015) наблюдается положительная достоверная корреляция лесов и кустарников с видовым богатством всего и поденок + веснянок + ручейников, относительной численностью жуков + стрекоз + поденок + веснянок + ручейников, поденок + веснянок + ручейников и отрицательная – с долей в сообществе олигохет и «красных» хирономид. Урбанизированные территории демонстрируют прямо противоположную зависимость. Сельскохозяйственные угодья не влияют на сообщества зообентоса. В ряде исследований показано, что сельскохозяйственные угодья влияют на водотоки лишь в относительно узком прибрежном коридоре (Tanaka et al., 2016; Marzin et al., 2013). В нашем случае оценивалась вся сельскохозяйственная деятельность на водосборе.

Таким образом, полученные в ходе настоящего исследования закономерности не являются специфическими для региона, а находят подтверждение в работах, посвященных разным климатическим зонам. Метод оценки водосборов при помощи ГИС-технологий может служить отправной точкой для организации гидробиологических исследований и индикации. Наиболее предпочтительно использовать такой анализ на подготовительных этапах для установления точек биомониторинга, как, например, в работах (Carone et al., 2009; Merriam et al., 2013; Petty et al., 2010).

Заключение

Проведенное исследование бассейна реки Верхней Сухоны показало, что наиболь-

шее влияние на качество поверхностных вод водотока оказывает плотность населения на его водосборе и относительная площадь населенных пунктов. Наличие лесов, в силу присутствия более «агрессивных» загрязнителей, в целом показывает меньшее влияние на рассмотренные компоненты. С ростом плотности населения и доли населенных пунктов на водосборе снижаются видовое богатство и разнообразие зообентоса. Наиболее информативными оказались индексы Гуднайта – Уитлея и ТВІ. Полученные закономерности могут экстраполироваться на относительно большую территорию таежной зоны с учетом степени ее освоенности. Используемые методы ГИС оптимально применять на этапе подготовки к биомониторинговым исследованиям.

Библиография

- Батурина М. А., Лоскутова О. А., Роговцова Е. К., Рафикова Ю. С. Использование структурных характеристик зообентоса для оценки экологического состояния малых рек в условиях долговременных рубок (на примере бассейна реки Вычегды) // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 1 (199). С. 17–24.
- ГОСТ 17.1.3.07–82 «Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков». М., 2000. 10 с.
- Ивичева К. Н., Филоненко И. В. О влиянии освоенности водосбора реки Верхней Сухоны (Вологодская область) на химический состав вод ее притоков // Принципы экологии. 2017. № 3. С. 89–101. DOI: 10.15393/j1.art.2017.6422.
- Ивичева К. Н. Зообентос малых рек-притоков Верхней Сухоны // Вода: химия и экология. 2016. № 8 (98). С. 53–59.
- Ивичева К. Н. Зообентос реки Вологды // Вода: химия и экология. 2017. № 1 (103). С. 80–86.
- Лобуничева Е. В., Борисов М. Я., Филоненко И. В., Филиппов Д. А. Оценка экологического состояния малых водоемов: Учебное пособие. Вологда, 2013. 218 с.
- Семенченко В. П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.
- Филиппов Д. А. Особенности структурной организации гидробиоценозов разнотипных болотных водоемов и водотоков // Труды ИБВВ РАН. 2017. Вып. 79 (82). Гидробиологические исследования болот. С. 251–277.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
- Anonymous. European Commission Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy // Official Journal. 2000. L 327, 22/12/2000. P. 0001–0073.
- Boggs J., Sun G., McNulty S. Effects of Timber Harvest on Water Quantity and Quality in Small Watersheds in the Piedmont of North Carolina // Journal of Forestry. 2016. Vol. 114. No 1. P. 27–40. DOI: 10.5849/jof.14-102.
- Carone M. T., Simoniello T., Manfreda S., Caricato G. Watershed influence on fluvial ecosystems: an integrated methodology for river water quality management // Environmental Monitoring and Assessment. 2009. Vol. 152. No 1–4. P. 327–342. DOI: 10.1007/s10661-008-0319-1.
- Davies P. J., Wright I. A., Findlay S. J., Jonasson O. J., Burgin S. Impact of urban development on aquatic macroinvertebrates in south eastern Australia: degradation of in-stream habitats and comparison with non-urban streams // Aquatic Ecology. 2010. Vol. 44. P. 685–700. DOI: 10.1007/s10452-009-9307-y.
- Gao X., Niu C., Chen Yu., Yin X. Spatial heterogeneity of stream environmental conditions and macroinvertebrates community in an agriculture dominated watershed and management implications for a large river (the Liao River, China) basin // Environmental Monitoring and Assessment. 2014. Vol. 186. Is. 4. P. 2375–2391. DOI: 10.1007/s10661-013-3545-0.
- Grizzetti B., Pistocchi A., Liqueste C., Udias A., Bouraoui F., van de Bund W. Human pressures and ecological status of European rivers // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No 205. DOI: 10.1038/s41598-017-00324-3.

- Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Database. 2008. URL: <http://www.srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 05.02.2017).
- Kuzmanovic M., Lopez-Doval J. C., De Castro-Catala N., Guasch H., Petrovic M., Munoz I., Munoz A., Barcelo D. Ecotoxicological risk assessment of chemical pollution in four Iberian river basins and its relationship with the aquatic macroinvertebrate community status // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 540. P. 324–333. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.112.
- Lakew A., Moog O. A multimetric index based on benthic macroinvertebrates for assessing the ecological status of streams and rivers in central and southeast highlands of Ethiopia // *Hydrobiologia*. 2015. Vol. 751. No 1. P. 229–242. DOI: 10.1007/s10750-015-2189-1.
- Luck G. W. A review of the relationships between human population density and biodiversity // *Biological Reviews*. 2007. Vol. 82. P. 607–645.
- Marzin A., Verdonschot P. F., Pont D. The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 704. No 1. P. 375–388. DOI: 10.1007/s10750-012-1254-2.
- Merriam E. R., Petty J. T., Strager M. P., Maxwell A. E., Ziemkiewicz P. F. Scenario analysis predicts context-dependent stream response to landuse change in a heavily mined central Appalachian watershed // *Freshwater Science*. 2013. Vol. 32. No 4. P. 1246–1259. DOI: 10.1899/13-003.1.
- Petty J. T., Fulton J. B., Strager M. P., Merovich G. T., Stiles J. M., Ziemkiewicz P. F. Landscape indicators and thresholds of stream ecological impairment in an intensively mined Appalachian watershed // *J. N. Am. Benthol. Soc.* 2010. Vol. 29. Is. 4. P. 1292–1309. DOI: 10.1899/09-149.1.
- Sladeczek V. System of water quality from the biological point of view // *Ergebn. der Limnol. H. Arsh. Fur Hydrobiol.* 1973. Bienheft. 7. S. 1–218.
- Tanaka M. O., Teixeira de Souza A. L., Moschini L. E., de Oliveira A. K. Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil // *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2016. Vol. 216. P. 333–339. DOI: 10.1016/j.agee.2015.10.016.
- Vörösmarty C. J., McIntyre P. B., Gessner M. O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S. E., Sullivan C. A., Liermann C. R., Davies P. M. Global threats to human water security and river biodiversity // *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 555–561. DOI: 10.1038/nature09440.
- Wang B., Liu D., Liu S., Zhang Y., Lu D., Wang L. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiangtang River, China // *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 68. P. 39–51. DOI: 10.1007/s10750-011-0899-6.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Д. А. Филиппову (ИБВВ РАН) за ценные советы, полученные в процессе подготовки статьи.

ON THE IMPACT OF THE DEVELOPMENT OF THE UPPER SUKHONA RIVER CATCHMENT AREA (VOLOGDA REGION) ON THE ZOOBENTHOS OF ITS TRIBUTARIES

IVICHEVA *VNIRO Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,*
Ksenia Nikolaevna *ksenya.ivicheva@gmail.com*

FILONENKO *VNIRO Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,*
Igor Vladimirovich *igor_filonenko@mail.ru*

Key words:
zoobenthos
anthropogenic load
GIS
biotic indices
water quality

Summary: For the first time in Vologda region, the impact of economic activities on the structure of zoobenthos communities was considered within the catchment area on the example of tributaries of the Upper Suchona River. The study was carried out on 10 catchments of 6 rivers in 2010–2013. A total of 292 samples were collected and examined. Aquatic macro-invertebrates were identified to the lowest detected taxon. To assess water quality, biodiversity indices of the selected groups of zoobenthos, biotic indices, saprobity were calculated. The delineation was made for every catchment with Hydrology ArcGis group tools. Population density and urban, agricultural, woodland and swamp surface areas were calculated within each watershed. With the approach to Vologda city, there is a decrease in species diversity with the loss of the most sensitive taxa. The change in benthos community structure is observed: quantitative indicators of oligochaetes increase, while those of all other taxa decrease. At that, there is a decrease in the diversity indices (Shannon – Weiner index, Simpson Index, Margalef Index), biotic indices (TBI, BBI) and an increase in saprobity, Goodnight – Whitley Index, FBI. Approaching Vologda, reducing forest area and increasing share of urban and agricultural lands as well as increasing population density were noted. Positive significant correlation of population density and settlement areas with quantitative indicators of oligochaetes and chiromomids, as well as with TBI and saprobity was noted. Whereas negative significant correlation was revealed with species wealth, biodiversity index, TBI and BBI biotic indices. Forest and farm lands don't show the significant correlation with zoobenthos parameters because of high proportion of urbanization. The highest correlation values were noted for Goodnight-Whitley index and TBI. These indices are the most informative. Received regularities can be extrapolated to the relatively large territory. It is desirable to apply the used GIS methods at the preparation stage for biomonitoring studies.

Received on: 22 November 2018

Published on: 26 March 2019

References

- Anonymous. European Commission Directive 2000/60/ EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy, Official Journal. 2000. L 327, 22/12/2000. P. 0001–0073.
- Baturina M. A. Loskutova O. A. Rogovcova E. K. Rafikova Yu. S. Using zoobenthos structural characteristics to assess small rivers ecological state in conditions of long-term cuttings (on the example of the Vychegda river basin), Vestnik Instituta biologii Komi NC UrO RAN. 2017. No. 1 (199). P. 17–24.
- Boggs J., Sun G., McNulty S. Effects of Timber Harvest on Water Quantity and Quality in Small Watersheds in the Piedmont of North Carolina, Journal of Forestry. 2016. Vol. 114. No 1. P. 27–40. DOI: 10.5849/jof.14-102.
- Carone M. T., Simoniello T., Manfreda S., Caricato G. Watershed influence on fluvial ecosystems: an integrated methodology for river water quality management, Environmental Monitoring and Assessment. 2009. Vol. 152. No 1–4. P. 327–342. DOI: 10.1007/s10661-008-0319-1.
- Davies P. J., Wright I. A., Findlay S. J., Jonasson O. J., Burgin S. Impact of urban development on aquatic

- macroinvertebrates in south eastern Australia: degradation of in-stream habitats and comparison with non-urban streams, *Aquatic Ecology*. 2010. Vol. 44. P. 685–700. DOI: 10.1007/s10452-009-9307-y.
- Filippov D. A. Specific features of structural organization of hydrobiocenoses in different-type mire water bodies and water courses, *Trudy IBVV RAN*. 2017. Vyp. 79 (82). *Gidrobiologicheskie issledovaniya bolot*. P. 251–277.
- Gao X., Niu C., Chen Yu., Yin X. Spatial heterogeneity of stream environmental conditions and macroinvertebrates community in an agriculture dominated watershed and management implications for a large river (the Liao River, China) basin, *Environmental Monitoring and Assessment*. 2014. Vol. 186. Is. 4. P. 2375–2391. DOI: 10.1007/s10661-013-3545-0.
- Grizzetti B., Pistocchi A., Liqueste C., Udias A., Bouraoui F., van de Bund W. Human pressures and ecological status of European rivers, *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. No 205. DOI: 10.1038/s41598-017-00324-3.
- Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows. M., 2000. 10 p.
- Ivicheva K. N. Filonenko I. V. On the impact of the development of the Verkhnyaya Sukhona river catchment area (Vologda Region) on the chemical composition of the waters in its tributaries, *Principy ekologii*. 2017. No. 3. P. 89–101. DOI: 10.15393/j1.art.2017.6422.
- Ivicheva K. N. Zoobenthos of small rivers-tributaries of the Upper Sukhona, *Voda: himiya i ekologiya*. 2016. No. 8 (98). P. 53–59.
- Ivicheva K. N. Zoobenthos of the Vologda river, *Voda: himiya i ekologiya*. 2017. No. 1 (103). P. 80–86.
- Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Database. 2008. URL: <http://www.srtm.csi.cgiar.org> (data obrascheniya: 05.02.2017).
- Kuzmanovic M., Lopez-Doval J. C., De Castro-Catala N., Guasch H., Petrovic M., Munoz I., Munoz A., Barcelo D. Ecotoxicological risk assessment of chemical pollution in four Iberian river basins and its relationship with the aquatic macroinvertebrate community status, *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 540. P. 324–333. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.112.
- Lakew A., Moog O. A multimetric index based on benthic macroinvertebrates for assessing the ecological status of streams and rivers in central and southeast highlands of Ethiopia, *Hydrobiologia*. 2015. Vol. 751. No 1. P. 229–242. DOI: 10.1007/s10750-015-2189-1.
- Lobunicheva E. V. Borisov M. Ya. Filonenko I. V. Filippov D. A. Environmental assessment of small water bodies. Vologda, 2013. 218 p.
- Luck G. W. A review of the relationships between human population density and biodiversity, *Biological Reviews*. 2007. Vol. 82. P. 607–645.
- Marzin A., Verdonschot P. F., Pont D. The relative influence of catchment, riparian corridor, and reach-scale anthropogenic pressures on fish and macroinvertebrate assemblages in French rivers, *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 704. No 1. P. 375–388. DOI: 10.1007/s10750-012-1254-2.
- Merriam E. R., Petty J. T., Strager M. P., Maxwell A. E., Ziemkiewicz P. F. Scenario analysis predicts context-dependent stream response to landuse change in a heavily mined central Appalachian watershed, *Freshwater Science*. 2013. Vol. 32. No 4. P. 1246–1259. DOI: 10.1899/13-003.1.
- Petty J. T., Fulton J. B., Strager M. P., Merovich G. T., Stiles J. M., Ziemkiewicz P. F. Landscape indicators and thresholds of stream ecological impairment in an intensively mined Appalachian watershed, *J. N. Am. Benthol. Soc.* 2010. Vol. 29. Is. 4. P. 1292–1309. DOI: 10.1899/09-149.1.
- Semenchenko V. P. Principles and systems of bioindication of flowing waters. Minsk: Oreh, 2004. 125 p.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods, criterions, decisions. Kn. 1. M.: Nauka, 2005. 281 p.
- Sladeczek V. System of water quality from the biological point of view, *Ergebn. der Limnol. H. Arsh. Fur Hydrobiol.* 1973. *Bienheft*. 7. S. 1–218.
- Tanaka M. O., Teixeira de Souza A. L., Moschini L. E., de Oliveira A. K. Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil, *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2016. Vol. 216. P. 333–339. DOI: 10.1016/j.agee.2015.10.016.
- Vörösmarty C. J., McIntyre P. B., Gessner M. O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S. E., Sullivan C. A., Liermann C. R., Davies P. M. Global threats to human water security and river biodiversity, *Nature*. 2010. Vol. 467. P. 555–561. DOI: 10.1038/nature09440.
- Wang B., Liu D., Liu S., Zhang Y., Lu D., Wang L. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiangtang River, China, *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 68. P. 39–51. DOI: 10.1007/s10750-011-0899-6.