

УДК 574.6+504.4

**ПРИМЕНЕНИЕ БИОТИЧЕСКИХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА НИЖНЕЙ
ВОЛГИ)**

**Татьяна Дмитриевна Зинченко¹, Лариса Владимировна Головатюк¹, Элина
Владимировна Абросимова¹, Екатерина Владимировна Промахова²**

¹ Институт экологии Волжского бассейна РАН,

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

tdz@mail333.com

качество воды, малые реки, индексы, метрики, Европейская Рамочная Водная Директива, бассейн Нижней Волги

В работе представлен сравнительный анализ биоиндикационных показателей и индексов, предлагаемых Европейской Рамочной Водной Директивой (Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy) для оценки качества поверхностных вод. Биотические показатели получены на основе многолетних исследований донных сообществ малых рек бассейна Нижней Волги.

**APPLICATION OF BIOTIC IDENTIFIERS FOR SURFACE WATER QUALITY
EVALUATION (ON THE EXAMPLE OF THE SMALL RIVERS IN THE LOWER VOLGA
BASIN)**

**Tatiana Dmitrievna Zinchenko¹, Larisa Vladimirovna Golovatyuk¹, Elina Vladimirovna
Abrosimova¹, Ekaterina Vladimirovna Promakhova²**

¹ Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences,

² Lomonosov Moscow State University

tdz@mail333.com

water quality, small rivers, the indexes, the European Water Framework Directive, the Lower Volga basin

This paper presents a comparative analysis of bioindication indicators and indices offered by the Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy to evaluate the quality of surface waters. Biotic indices are derived from the long-term studies of benthic communities of the small rivers in the Lower Volga basin.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках биотической концепции, предполагающей существование причинной связи между уровнем воздействия на экосистему и откликом биоты [6], постоянно совершенствуются новые методы мониторинга и оценки устойчивого развития экосистем на различных региональных уровнях. Это требует поиска, обоснования и разработки комплекса обобщенных показателей, оценивающих техногенное воздействие на экосистемы, контролирующих динамику их состояния и прогнозирующих эффективность природоохранных мероприятий. Для решения вопросов, связанных с оценкой опасности кризисного состояния водных объектов, нами ранее была проведена научно-обоснованная экологическая классификация равнинных рек Волжского бассейна [2], разработан способ их комплексной оценки на основе интегрального индекса экологического состояния – ИИЭС,

позволяющий оценить суммарный эффект воздействия загрязнения на сообщества гидробионтов и на экосистему в целом [5].

В настоящее время существует несколько систем, которые используются различными странами. Это американская система RPBs (Rapid Bioassessment Protocols), британская классификационная система RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System), система мультиметрических показателей, объединенных под названием «Индекс биологической или биотической целостности» (Index of Biotic Integrity, *IBI*), для комплексной оценки биоты по набору 12 показателей, сравнение которых осуществляется с эталонными участками или водотоками [16] и др. Европейская Рамочная Водная Директива (WFD) позволила интенсифицировать и совершенствовать систему показателей для определения экологического качества поверхностных вод в странах ЕС [12].

Полученные многолетние данные позволили нам выполнить сравнительный анализ биоиндикационных показателей, индексов и метрик, предлагаемых для использования при определении качества воды Европейской Рамочной Водной Директивой [15]. Наиболее интересным объектом таких сравнительных исследований стали малые реки лесостепной зоны Высокого Заволжья, исследованные в рамках проведения экологического мониторинга [4, 8]. Мы попытались выявить индикаторную значимость, то есть чувствительность ряда индексов и метрик в различных створах малых рек, впадающих в р. Сок (приток Саратовского водохранилища).

Полученные данные свидетельствуют о том, что определенную реакцию на антропогенное воздействие обнаруживают практически все исследованные таксоны, несмотря на существенные различия между ними [2, 13]. Балльная оценка дает возможность показать индикаторную ценность различных характеристик экосистемы реки и выделить наиболее работоспособные индикаторы.

Цель работы: произвести сравнительный анализ биотических идентификаторов, включающих индексы и метрики, предложенные Европейской Рамочной Водной Директивой (WFD) и выявить их эффективность на примере исследования малых рек бассейна Нижней Волги.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на малых реках Байтуган, Камышла и Сосновка – притоках р. Сок (рис.1). Отбор проб бентоса осуществлялся в период проведения мониторинговых исследований (июнь, июль) на 8 створах рр. Байтуган (длина - 20 км, уклон – 7.7‰), Камышла (длина – 20 км, уклон – 7.9‰), Сосновка (длина – 16 км, уклон – 0.52‰). Реки характеризуются достаточно сходными гидроморфологическими и гидрологическими условиями, отличаясь в основном скоростью течения, характером биотопов (табл. 1) и уровнем антропогенной нагрузки.

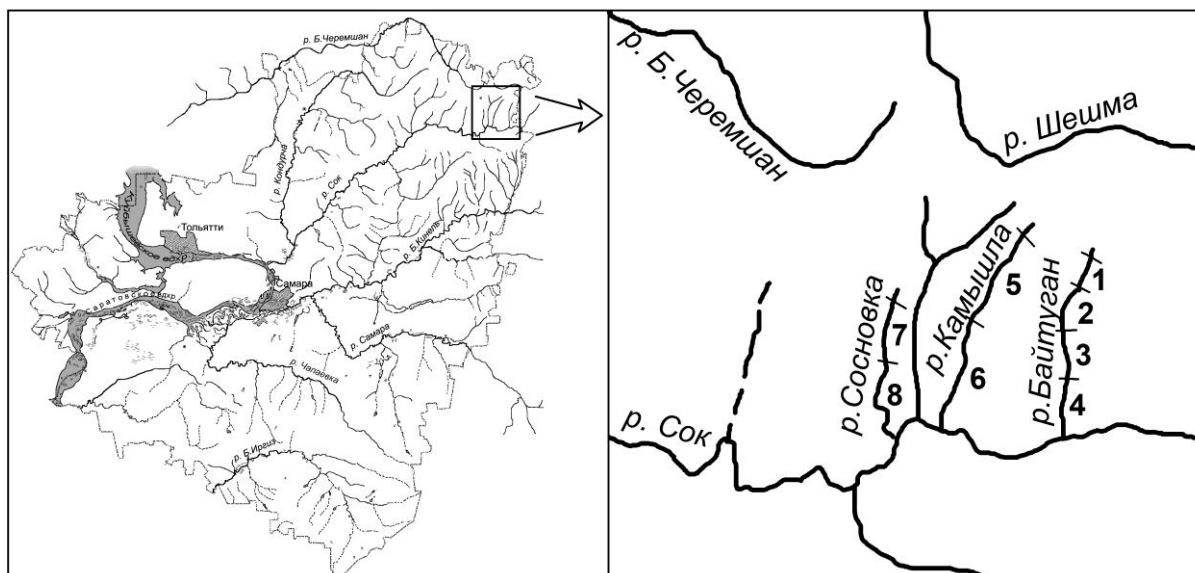


Рис. 1. Карта – схема гидрографической сети Самарской области и выделенных створов на малых реках верхнего течения бассейна р.Сок

При создании эталонных створов исследованных рек с последующим выбором эталонных показателей, представленных оксифильными и реофильными таксонами, руководствовались положениями (WFD). В качестве эталонных рассматривали створы 1-4 на р. Байтуган, где антропогенная нагрузка в период исследования была минимальной [11]. Дополнительно, для сравнения с эталонными створами, были выбраны участки на реках Камышла (створы 5, 6) и Сосновка (створы 7, 8), находящиеся под воздействием сельскохозяйственных стоков с полей и ферм и характеризующиеся повышенным содержанием биогенных веществ [5]. Отбор образцов макрозообентоса (1987, 1991, 2006 гг.) на гравийно-галечниковых и щебенчатых субстратах производили гидробиологическим скребком с длиной ножа 20 см, (протягивание 1м, 3 повторности). Качественные пробы отбирали путем смыва организмов с камней с учетом площади их проекции и расчета количества собранных организмов на 1 м^2 площади дна. Образцы грунта промывали через капроновый газ (размер ячеек 300-310 мкм).

Камеральную обработку собранного и фиксированного материала с последующим микроскопированием проводили в лаборатории, согласно общепринятым методам [7]. Собрано и обработано 72 пробы бентоса и обрастаний.

Для сравнительного анализа информативности методов были рассчитаны индексы и показатели, в том числе предлагаемые к использованию Европейской Рамочной Водной Директивой (WFD): *EPT Index*; *Биотический индекс р. Трент (Trent Biotic Index) (TBI)*; *индекс Biological Monitoring Working Party (BMWP)*; показатели *Dip/N* (отношение численности личинок двукрылых насекомых к суммарной численности макрозообентоса); *Ch/N* (отношение численности личинок хирономид к суммарной численности макрозообентоса) и *T/N* (отношение численности личинок трибы Tanytarsini к суммарной численности макрозообентоса) и традиционно используемые в отечественных гидробиологических исследованиях: *олигохетный индекс Пареле (D_1)*; *хирономидный индекс Балушкиной (K)*; *индекс Шеннона (H)*.

Таблица 1.

Некоторые гидрологические и гидрофизические показатели малых рек

Показатель (в момент отбора пробы)	Реки и номера створов							
	Байтуган				Камышла		Сосновка	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина, м	<u>0,2</u>	<u>0,8</u>	<u>2,5</u>	<u>3,0</u>	<u>2,0</u>	<u>2,0</u>	<u>2,0</u>	<u>1,5</u>
	1,2	1,7	3,5	6,0	3,5	3,0	3,0	2,0
Глубина, м	<u>0,05</u>	<u>0,1</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,5</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
	0,2	0,2	0,7	1,0	1,0	0,7	0,3	0,3
Скорость течения, м/с	<u>0,2</u>	<u>0,3</u>	<u>0,3</u>	<u>0,2</u>	<u>0,5</u>	<u>0,1</u>	<u>0,25</u>	<u>0,25</u>
	1,2	1,1	0,7	1,4	0,6	0,6	0,3	0,3
Прозрачность, см	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>35</u>	<u>20</u>	<u>30</u>	<u>20</u>	<u>10</u>	<u>10</u>
	10	20	40	30	35	30	20	15
Т, °С	<u>12,6</u>	<u>12,9</u>	<u>10,8</u>	<u>16,9</u>	<u>11,5</u>	<u>9,0</u>	<u>13,9</u>	<u>18,0</u>
	14,0	13,0	12,2	17,1	12,0	12,1	14,0	18,5
Тип грунта	щ+грп, гр+га гл+пс+гр, си+сп+гр +ро	щ, гр, си+пс+гр +ро	гр, гл+си	щ, пс+гл+гр,	щ, си	щ, гр+пс+си	гр+си	си+ гр, си+ро

Примечание: над чертой – минимальные значения, под чертой – максимальные; щ – щебень; га – галька а, гр – гравий, грп – гравелистый песок, кп – крупнозернистый песок, пс – песок среднезернистый, си – серый ил, чи – черный ил, гл – глина, ро – растительные остатки.

При оценке качества воды с применением индекса Шеннона использовали градацию чистоты вод, предлагаемую В.А. Яковлевым [14].

Для выбора наиболее информативных показателей рассчитывали коэффициенты вариации (C_v) индексов и статистическую значимость различий по t -критерию Стьюдента. Статистическая обработка данных выполнена с использованием стандартного пакета STATISTICA 6.0 и программы PAST - Palaeontological Statistics (ver. 1,7).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика индексов и показателей: EPT Index [18], основан на видовом богатстве чувствительных к загрязнению представителей отрядов Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera. Для расчета индекса на каждом из выделенных створов подсчитывается в отдельно взятых пробах, а затем суммируется число видов из этих отрядов.

Биотический индекс р. Трент (Trent Biotic Index, TBI) [20] основан на соотношении количества видов, устойчивых и неустойчивых к загрязнению. При увеличении степени загрязнения рек из состава донной фауны в определенной последовательности выпадают наиболее уязвимые группы гидробионтов: веснянки → поденки → ручейники → ракообразные. В таблицах, представленных в литературных источниках, дается балльная оценка качества воды в зависимости от общего числа видов в пробе и обнаруженных «индикаторных» групп.

Индекс рабочей группы биологического мониторинга (Biological Monitoring Working Party, BMWP) основан на балльной оценке подсемейств донных беспозвоночных, имеет пять градаций качества вод [17]. Широко используется в странах ЕС. Ниже приводятся табл. 2 и 3 для расчета индекса и градации качества вод. Значение индекса **BMWP** получается в результате сложения расчетных значений полученных баллов.

Таблица 2.

Таблица для расчета Biological Monitoring Working Party Index (по: [11])

Таксоны	Семейства	Баллы
Ephemeroptera	Siphonuridae, Heptageniidae, Leptophlebiidae, Ephemerellidae, Potamanthidae, Ephemeridae	10
Plecoptera	Taeniopterygidae, Leuctridae, Capniidae, Perlodidae, Perlidae, Chloroperlidae	
Heteroptera	Aphelocheiridae	
Trichoptera	Phryganeidae, Molannidae, Beraeidae, Odontoceridae, Leptoceridae, Goeridae, Lepidostomatidae, Brachycentridae, Sericostomatidae	
Decapoda	Astacidae	8
Odonata	Lestidae, Agriidae, Gomphidae, Cordulegasteridae, Aeschnidae, Corduliidae, Libellulidae	
Trichoptera	Psychomyiidae, Philopotamidae	
Ephemeroptera	Caenidae	7
Plecoptera	Nemouridae	
Trichoptera	Rhyacophilidae, Polycentropodinae, Limnephilidae	
Mollusca	Neritidae, Viviparidae, Ancyliidae	6
Trichoptera	Hydroptilidae	
Mollusca	Unionidae	
Amphipoda	Corophiidae, Gammaridae	
Odonata	Platycnemididae, Coenagrionidae	5
Heteroptera	Mesoveliidae, Hydrometridae, Gerridae, Nepidae, Naucoridae, Notonectidae, Pleidae, Corixidae	
Coleoptera	Halipilidae, Hygrobiidae, Dytiscidae, Gyrinidae, Hydrophilidae, Clambidae, Helodidae, Dryopidae, Elmidae, Chrysomelidae, Curculionidae	
Trichoptera	Hydropsychidae	
Diptera	Tipulidae	
Diptera	Simuliidae	
Triclada	Planariidae, Dendrocoelida	
Ephemeroptera	Baetidae	4
Megaloptera	Sialidae	
Hirudinea	Piscicolidae	
Mollusca	Valvatidae, Hydrobiidae, Lymnaeidae, Physidae	3
Mollusca	Planorbidae	
Mollusca	Sphaeriidae	
Hirudinea	Glossiphoniidae, Hirudinidae, Erpobdellidae	
Isopoda	Asellidae	
Diptera	Chironomidae	2
Oligochaeta (класс целиком)		1

Таблица 3.

Соответствие диапазона величин индекса *BMWP* и качества воды

Диапазон значений индекса	Качество воды
>150	Исключительное
101-150	Очень хорошее
51-100	Хорошее
26-50	Невысокое
<25	Плохое

Индекс средних значений таксонов (Average Score Per Taxon, *ASPT*) [17] является производным от *BMWP* и рассчитывается по формуле:

$$ASPT = BMWP / \text{число обнаруженных таксономических групп},$$

где *BMWP* – рассчитанное значение индекса рабочей группы биологического мониторинга.

Индекс **ASPT** имеет 7 градаций качества воды (табл. 4). Цель введения индекса – уменьшить вклад случайных таксономических групп, обнаруженных в таксонах с высокой балльной оценкой.

Таблица 4.

Соответствие диапазона величин индекса **ASPT** и качества воды

Диапазон значений ASPT	Качество воды	Рейтинг
5+	Прекрасное	7
4,5-4,9	Очень хорошее	6
4,1-4,4	Хорошее	5
3,6-4,0	Посредственное	4
3,1-3,5	Скорее плохое	3
2,1-3,0	Плохое	2
0-2,0	Очень плохое	1

Рассчитанные метрики основаны на соотношении численностей различных таксономических групп макрозообентоса: **Dip/N**, **Ch/N**, **T/N**, где **Dip** – численность личинок двукрылых, **Ch** – численность личинок хирономид, **T** – численность личинок хирономид трибы Tanytarsini, **N** – общая численность макрозообентоса на створах рек Байтуган, Камышла и Сосновка.

Олигохетный индекс Пареле (D_1) основан на соотношении численности олигохет и суммарной численности макрозообентоса [3, 9]:

$$D_1 = N_{\text{олигохет}} / N_{\text{общая}},$$

где **N** – численность, экз./м².

Индекс широко используется в практике гидробиологического анализа при исследовании сообществ макрозообентоса в реках с высокой скоростью течения и хорошей аэрацией.

Хирономидный индекс Балускиной (K) [1] широко используется для определения качества воды. Основан на соотношении численности различных подсемейств хирономид. Индекс вычисляется по формуле:

$$K = (\bar{b}_t + 0.5\bar{b}_{ch}) / \bar{b}_o,$$

где $\bar{b}_t$, $\bar{b}_{ch}$ и $\bar{b}_o$ – смещенные относительные численности отдельных подсемейств хирономид: $\bar{b}_t$ – Tanypodinae, $\bar{b}_{ch}$ – Chironomidae, $\bar{b}_o$ – Orthocladiinae и Diamesinae; $\bar{b} = N + 10$, где **N** – относительная численность особей всех видов данного подсемейства в процентах от общей численности особей всех хирономид.

Индекс видового разнообразия Шеннона (H) [19], отражающий сложность структурной организации сообществ бентоса, вычисляли по формуле

$$H = \sum n_i / N \cdot \log_2 n_i / N,$$

где **H** – разнообразие в битах на индивидуум, n_i – численность *i*-го вида, **N** – суммарная численность всех видов; $N = \sum n_i$.

Исследования бентоса, проведенные на эталонных створах р. Байтуган показали, что число видов (включая и организмы обрастаний в верхнем течении) изменяется от 28 до 40, достигая максимальных показателей на створе 3 (табл. 5); численность и биомасса макрозообентоса находятся в пределах 6.27-68.8 тыс. экз./м² и 13.2-142.3 г/м² соответственно. Преобладающими по численности на всех участках реки являются личинки хирономид (до 57% от суммарной численности бентоса) и поденок (до 45%) (рис. 2), а основу биомассы составляют личинки поденок (до 62% от суммарной биомассы бентоса), хирономид (до 59.7%) и ручейников (до 59%). Доля реофильных видов (Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera) изменяется на эталонных створах в диапазоне 25-45% от общей численности макрозообентоса (рис. 2).

В сравнении с эталонными створами р. Байтуган, в структуре макрозообентоса створов рр. Камышла и Сосновка выявлены значимые различия. Так, число таксонов бентоса, снижается до 20-27 видов, а численность и биомасса не превышают 10.7 тыс. экз./м² и 59.3 г/м² соответственно. Преобладают личинки хирономид, составляя до 90% от суммарных величин численности и биомассы бентоса и олигохеты (до 35% и 21% соответственно). Выявлено существенное снижение численности и биомассы оксифильных и реофильных видов отрядов Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera. Их численность на створах рр. Камышла и Сосновка не превышала 0.1-4% от общей численности бентоса (рис. 2) эталонных створов р.Байтуган.

Таблица 5.

Некоторые структурные показатели сообществ макрозообентоса на створах малых рек: Байтуган (1-4), Камышла (5,6), Сосновка (7,8)

Показатель	Номер створа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Число видов	35	28	40	29	25	27	20	25
Численность, тыс. экз./м ²	45.8	15.8	6.27	68.8	3.36	9.25	1.40	10.7
Биомасса, г/м ²	142.3	45.9	13.2	35.7	3.8	59.3	2.9	13.4
Численность (Ephemeroptera, Trichoptera, Plecoptera), тыс. экз./м ²	20.6	6.0	1.6	24.3	1.87	0.08	0.01	0.4



Рис. 2. Соотношение численности таксономических групп макрозообентоса на створах рек Байтуган (1-4), Камышла (5-6), Сосновка (7-8): I – Oligochaeta; II – Mollusca; III – Crustacea; IV – Plecoptera; V – Ephemeroptera; VI – Hemiptera; VII – Trichoptera; VIII – Coleoptera; IX – Chironomidae; X – прочие Diptera; XI – прочие (Hirudinea, Hydrachnidia, Aranei).

Полученные структурные показатели сообществ макрозообентоса легли в основу расчетов индексов и показателей, результаты которых приводятся ниже.

Рассчитанные величины индекса *EPT Index* на эталонных створах р. Байтуган изменялись от 7 до 15, а в створах рек Камышла и Сосновка они не превышали 2, что свидетельствует о загрязнении этих водотоков (рис. 3а). Наиболее массовыми в эталонных створах были оксифильные веснянки *Amphinemura standfussi*, *Capnia bifrons* и поденки *Baetis* gr. *rhodani*, *Ephemerella ignita*. Величины индекса в эталонных створах р.Байтуган были

сопоставимы с данными, полученными для ряда экорегионов Европы, где сумма числа видов трех реофильных отрядов насекомых составила 13-15.

Рассчитанные показатели **TBI** (*Trent Biotic Index*) представлены на рис. 3б. Как видно, высокое качество воды (I-II классы качества) характерно для эталонных створов – вода «очень чистая»-«чистая» (8-10 баллов). Значения показателя **TBI** в створах рек Камышла и Сосновка были в пределах 6-8 баллов, что соответствует II-III классам – вода «чистая»-«умеренно загрязненная» (рис. 3б, табл. 6).

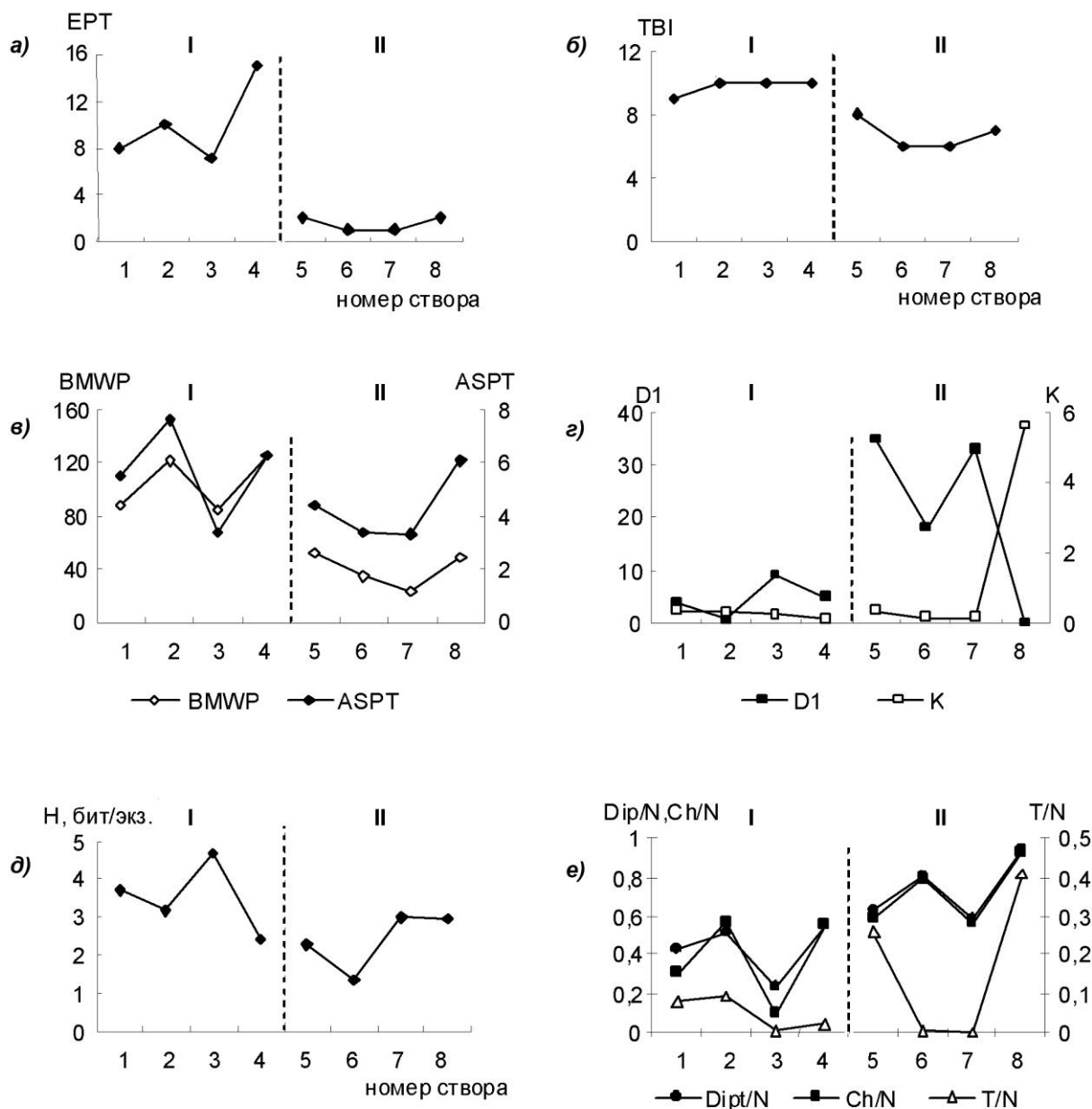


Рис. 3. Изменение значений индексов и показателей на эталонных (I) и загрязненных (II) створах рек. Индексы: а) EPT, б) TBI, в) BMWP и ASPT, г) D₁ и K, д) H, е) показатели Dip/N, Ch/N и T/N.

Апробация индекса *Biological Monitoring Working Party* (BMWP), показала, что значения индекса на эталонных створах соответствуют 85-126 баллам, что характеризует качество воды эталонного створа как «хорошее» и «очень хорошее». В створах рек Камышла

и Сосновка (рис. 3в, табл. 6) значения индекса варьировали в диапазоне от 53 баллов – («хорошее» качество воды) до 23 баллов – («плохое» качество).

Согласно расчетам индекса **ASPT**, на эталонных створах 1, 2, 4 его значения характеризуют качество воды как «прекрасное», изменяясь в пределах 5,5–7,6 баллов, а на створе 3 – как «скорее плохое» (3,4 балла). В реках Камышла и Сосновка (рис. 3в) показатели индекса оценивают качество воды на створе 5 как «очень хорошее» (4,4 балла), на створах 6 и 7 – как «скорее плохое» (3,3–3,4 балла), а на створе 8 – как «прекрасное» (6,1 балла). В целом индекс **ASPT** в градиенте загрязнения изменялся в соответствии с оценками качества воды, рассчитанными с помощью показателя **BMWP**.

Значения индекса **D₁** на всех эталонных створах не превышали 9%, что позволяет оценить воду как «очень чистая» (I класс качества). На участках рек, находящихся под воздействием сельскохозяйственных стоков (реки Камышла, Сосновка), разброс показателей был существенным: от 0,1% – вода «очень чистая» до 35% – «умеренно загрязненная» (рис. 3г, табл. 6). Данные показывают, что, применение этого индекса для малых рек с высокой скоростью течения приводит к искаженным результатам. Это обусловлено тем, что состав олигохет (даже если их численность высока) не может служить обязательным показателем загрязнения вод из-за преобладания в быстротоках представителей семейства Naididae, ряд видов которых, например *Pristinella rosea*, требовательны к качеству воды.

Рассчитанные значения индекса **K** в створах малых рек изменялись незначительно, находясь в диапазоне 0,12–0,35, и характеризовали воду как «чистая». Исключение составил створ VIII на р. Сосновка (рис. 3г), где показатели индекса оценивали воду как «умеренно загрязненная» (**K** = 5,63). Следует отметить, что данные расчета индекса **K** не согласуются с результатами, полученными при расчете вышеперечисленных индексов. Соотношения численности толерантных видов хирономид и численности ортокладин, в исследованных умеренно загрязненных реках имеют априори сходные значения в силу обитания практически на всех створах фитореофильных и оксифильных видов на твердых субстратах.

Как видно на рис. 3д, рассчитанные нами значения индекса **H** на эталонных створах находились в пределах 2,4–4,7 бит/экз., характеризую воду в диапазоне «умеренно загрязненная» – «очень чистая». На участках рек Камышла и Сосновка значения индекса изменялись от 1,4 до 3,0 бит./экз., т.е. качество воды менялось от «загрязненной» до «чистой» (рис. 3д; табл. 6).

Расчет индекса **ЕТО**, включающего фаунистическое богатство отрядов Ephemeroptera, Trichoptera и Odonata, на малых реках лесостепной зоны Самарской области не выявил его результативности для оценки качества воды в связи с отсутствием в летних пробах личинок стрекоз.

При применении различных метрик, используемых в странах ЕС (**Dip/N**; **Ch/N**; **Tanytarsyni/N**), были получены следующие результаты: показатели соотношений **Dip/N** и **Ch/N** в створах возрастают с увеличением степени загрязнения рек, имея близкие значения и сходную динамику (рис. 3е). Последнее объясняется тем, что среди двукрылых насекомых по численности в малых реках преобладают личинки хирономид. Использование показателя **T/N** для оценки качества воды рек достаточно проблематично в силу ряда причин, таких как неопределенная индикаторная значимость псаммофильных видов трибы Tanytarsyni и биотопическая локальность их обитания на песчаных грунтах в створах рек Камышла и Сосновка.

Оценка состояние качества воды для различных створов малых рек, представленная в таблице 6 показывает, что большинство индексов дают сходные значения для одного и того же створа. Отличия отмечены для индексов **K** и **D₁**, которые на створах 6, 7 и 8 завышали качество воды, для индекса **ASPT**, изменявшегося не согласованно с остальными на створах 3 и 8 и индекса **H**, занижавшего качество воды на створе 4.

Результаты статистического анализа для различных индексов приведены нами в табл. 7.

Таблица 6.

**Оценка качества воды исследованных створов малых рек
по различным биотическим индексам**

Индекс	Номер створа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>BMWP</i>	хорошее	очень хорошее	хорошее	очень хорошее	хорошее	невысокое	плохое	невысокое
<i>ASPT</i>	прекрасное	прекрасное	скорее плохое	прекрасное	очень хорошее	скорее плохое	скорее плохое	прекрасное
<i>TBI</i>	чистая	очень чистая	очень чистая	очень чистая	чистая	умеренно загрязнен.	умеренно загрязнен.	умеренно загрязнен.
<i>H</i>	чистая	чистая	очень чистая	умеренно загрязнен.	чистая	загрязненная	умеренно загрязнен.	умеренно загрязнен.
<i>D1</i>	очень чистая	очень чистая	очень чистая	очень чистая	умеренно загрязнен.	чистая	умеренно загрязнен.	очень чистая
<i>K</i>	чистая	чистая	чистая	чистая	чистая	чистая	чистая	умеренно загрязнен.

Таблица 7.

Результаты статистического анализа применения биотических индексов

Индекс	C_v для эталонных створов (1-4)	t	p
<i>EPT</i>	35.6	5.1	0.01
<i>Dipt/N</i>	32.2	-7.2	0.006
<i>Ch/N</i>	58.4	-6.3	0.008
<i>BMWP</i>	20.7	5.7	0.01
<i>ASPT</i>	30.9	1.46	0.24
<i>TBI</i>	5.1	4.24	0.02
<i>H</i>	18.6	2.4	0.1
<i>D1</i>	74.4	-2.2	0.11
<i>K</i>	38	-0.94	0.41

Примечание: C_v - коэффициент вариации для эталонных створов 1-4; t - критерий Стьюдента; p – вероятность нулевой гипотезы при сравнении эталонных и загрязненных створов

Как видно из данных табл. 7, значения апробированных индексов, рассчитанных для эталонных створов, разделились на три группы в соответствии с их коэффициентом вариации. Наибольшим постоянством в «эталонных» условиях характеризуются индексы ***TBI*** ($C_v = 5,1$), ***H*** ($C_v = 18,6$) и ***BMWP*** ($C_v = 20,7$). Определенная изменчивость отмечена для следующих индексов: ***ASPT*** ($C_v = 30,9$), ***Dipt/N*** ($C_v = 32,2$), ***EPT*** ($C_v = 35,6$), ***K*** ($C_v = 38$). Максимальные значения коэффициентов вариации свойственны метрике ***Ch/N*** ($C_v = 58,4$) и величинам олигохетного индекса ***D1*** ($C_v = 74,4$).

Различия в оценке качества воды между эталонными и загрязненными створами являются достоверными или значимыми (при $p < 0,05$) для рассчитанных значений следующих индексов и показателей: ***Dipt/N***, ***Ch/N***, ***EPT***, ***BMWP***, ***TBI*** (табл. 7).

Сходство показателей индексов и метрик на изменение качества воды отражает корреляционная матрица этих связей. Величины коэффициентов корреляции индексов, использованных нами для их сравнительной оценки в практике гидробиологического мониторинга, показали, что максимальные значения коэффициентов корреляции (табл. 8) получены для следующих пар индексов: ***EPT-BMWP*** (0,96), ***BMWP-TBI*** (0,86), ***EPT-TBI*** (0,81), ***TBI-H*** (0,77), ***EPT-H*** (0,74), ***BMWP-H*** (0,76), ***BMWP-ASPT*** (0,72), ***Ch/N-Dipt/N*** (0,98).

Таблица 8.

Величины коэффициентов корреляции между различными индексами и метриками

Показатели	EPT	Dipt/N	Ch/N	BMWP	ASPT	TBI	H	D1	K
EPT	1.00								
Dipt/N	-0.51	1.00							
Ch/N	-0.41	0.98	1.00						
BMWP	0.96	-0.51	-0.4	1.00					
ASPT	0.62	0.11	0.22	0.72	1.00				
TBI	0.81	-0.69	-0.62	0.86	0.33	1.00			
H	0.74	-0.54	-0.54	0.76	0.31	0.77	1.00		
D1	-0.6	0.06	0.04	-0.66	-0.69	-0.43	0.31	1.00	
K	-0.3	0.65	0.58	-0.24	0.29	-0.56	-0.56	-0.37	1.00
T/N	-0.33	0.61	0.55	-0.2	0.34	-0.48	-0.03	-0.11	0.83

Примечание: Выделены значения, достоверные при $p < 0.05$.

Исходя из результатов корреляционного анализа, индексы *EPT*, *BMWP*, *TBI* и *H* показывают согласованную реакцию и могут быть в ряде случаев взаимозаменяемыми или дополнять друг друга.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ различных индексов позволил установить, что наиболее надежными методами для оценки качества вод малых рек бассейна Нижней Волги являются: Биотический индекс Вудивисса (*TBI*); *EPT Index* и показатель *Biological Monitoring Working Party (BMWP)*. Значения индексов, полученные для р. Байтуган, могут быть использованы в качестве эталонных для последующих расчетов мультиметрических показателей Ecological Quality Ratio (*EQR*) типологически сходных рек.

В заключении следует отметить, что Европейская Рамочная Водная Директива тесно связана с европейской системой EURO-WATERNET, то есть с информационными данными о водных ресурсах регионов, которая необходима для ответов на вопросы их потребителей. Эта система использует данные из существующих национальных баз данных мониторинга, выполняет решение конкретных задач о состоянии экологического качества поверхностных вод. [12]. Согласно EURO-WATERNET, как эталонные, так и репрезентативные створы должны охватывать практически все водные объекты регионов. Каждая страна ЕС привязывает результаты, полученные в рамках национальной системы мониторинга, к интеркалибровочной сети. К сожалению, подобная система в регионах Российской Федерации отсутствует.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 13-04-00740, №15-04-03341и №15-34-51088.

Литература

1. Балушкина Е.В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука, 1987. 179 с.
2. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / Под ред. О.В. Бухарина, Г.С. Розенберга. М.: Наука, 2007. 403 с.
3. Гидробиологический режим малых рек в условиях антропогенного воздействия / Под ред. Г.П. Андрушайтиса, О.Л. Качаловой. Рига: Зинатне, 1981. С. 88-100.
4. Зинченко Т.Д. Методологический подход к проведению мониторинговых исследований природных гидросистем (на примере Волжского бассейна) // Чтения памяти В. Я. Леванидова. Владивосток. 2008. вып.4. С. 25-30.
5. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Изменение состояния бентоса малых рек бассейна Средней Волги // Известия Самарского НЦ РАН. 2000. Т. 2, № 2 (4). С. 257-267.
6. Левич А.П. Биотическая концепция контроля природной среды //Докл. РАН.1994. Т. 337.№ 2. С. 257-259.
7. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.

8. Особенности пресноводных экосистем малых рек Волжского бассейна / Под редакцией Розенберга Г.С., Зинченко Т.Д. Тольятти: Кассандра, 2011. 322 с.
9. Пареле, Э.А. Тубифициды (*Oligochaeta*, *Tubificidae*) – индикаторы качества водоемов / Э. А. Пареле, Е. Б. Астопенюк // Изв. АН Латв. ССР. 1975. № 9. С. 44–46.
10. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.
11. Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текущих вод. Мн.: Орех, 2004. 125 с.
12. Семенченко, В.П., Разлуцкий В.И. Экологическое качество поверхностных вод / 2-е изд., испр. Минск : Беларус. навука, 2011. 329 с.
13. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: Изд-во Самарского НЦ РАН, 2003. 463 с.
14. Яковлев В.А. Оценка качества поверхностных вод Кольского Севера по гидробиологическим показателям и данным биотестирования (практические рекомендации). Апатиты, 1988. 27 с.
15. Directive 2007/60/ec of the European Parliament and of the council of 6.11. 2007 on the assessment and management of flood risks//Official Journal of the European Union. L 288. P. 37.
16. Karr J.R. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management // *Ecol.Appl.*1991. Vol. 1. P. 66-84.
17. Leeds-Harrison P.B., Quinton J.N., Walker M.J. Harrison K.S., Tyrrel S.F., Morris J., Mills H.T. Buffer Zones in headwater catchments // Report on MAFF/English Nature Buffer Zone Project CSA 2285. Cranfield University, Silsoe, UK, 1996. 22 p.
18. Plafkin, J. L., Barbour M.T., Porter K.D. et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: Benthic macroinvertebrates and fish. // U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, Washington, D.C. EPA 440-4-89-001. 1989.
19. Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication.-Urbana. Univ. of Illinois. Press., 1949. 117 p.
20. Woodiwiss F.S. The biological system of stream classification used by the Trent Board // *Chem. And Ind.* 1964. V 11. P. 443-447.