

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.4

DOI: 10.15372/GIPR20210204

Н.В. ЗУЕВА, Е.А. ПРИМАК, А.В. БАБИН, Ю.А. ЗУЕВ, Е.С. УРУСОВА

Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79, Россия, nady.zuyeva@ya.ru,
ekaterinaprimak@yandex.ru, alex-babin@yandex.ru, yzuyev@yandex.ru, e.s.urusova@gmail.com

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ МАЛЫХ РЕК ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Предложен подход к оценке неаддитивного свойства водной экосистемы — экологического благополучия для малых водотоков. Критериями оценки экологического благополучия выступили устойчивость водного объекта к внешним воздействиям, качество вод, продукция ресурсного звена, разнообразие биоты, скорость самоочищения водной экосистемы, трофический статус. Некоторые перечисленные характеристики оцениваются многокритериально. На основании проведенной оценки с использованием таких показателей, как площадь водосбора реки, среднегодовой расход воды, продолжительность маловодной фазы, колебания уровня, биомасса кормового бентоса, устойчивость русла, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, индекс разнообразия Шеннона и др., выделено пять классов экологического благополучия по шкале от 0 до 1: низкое, ниже среднего, среднее, выше среднего, высокое. По натурным данным проведена апробация модели-классификации оценки экологического благополучия для шести водотоков Ленинградской области и Санкт-Петербурга. Расчет интегрального индекса экологического благополучия показал отсутствие малых рек с высоким экологическим благополучием. Большинство исследованных станций водотоков принадлежат к категории с благополучием «ниже среднего». Лишь несколько станций, расположенных на участках водотоков, которые удалены от крупных населенных пунктов, отнесены к категориям «среднее» и «выше среднего».

Ключевые слова: интегральная оценка, экологическое благополучие, устойчивость, водная экосистема, малые реки, биоиндикация, качество вод.

N.V. ZUEVA, E.A. PRIMAK, A.V. BABIN, YU.A. ZUEV, E.S. URUSOVA

Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, ul. Voronezhskaya, 79, Russia, nady.zuyeva@ya.ru,
ekaterinaprimak@yandex.ru, alex-babin@yandex.ru, yzuyev@yandex.ru, e.s.urusova@gmail.com

INTEGRAL ASSESSMENT OF ECOLOGICAL WELL-BEING OF SMALL RIVERS IN LENINGRAD OBLAST AND ST. PETERSBURG

This article proposes the approach to assessing the nonadditive property of the aquatic ecosystem (ecological well-being) of small streams. As the criteria for assessing ecological well-being, we used the stability of a water body to external influences, the water quality, the production of a resource link, the biota diversity, the rate of self-purification of the aquatic ecosystem, the trophic status were criteria for assessing environmental well-being. Some of these characteristics are estimated in terms of multi-criteria. The following indicators were used in the assessment: the catchment area of the river, the average annual water discharge, the duration of the low-water phase, the fluctuation of the water level, the biomass of forage benthos, the stability of the channel, the specific combinatorial water pollution index, the Shannon diversity index, etc. Five classes of environmental well-being were identified on a scale from 0 to 1: low, below medium, medium, above medium and high. On the basis of field data, a model-classification of the assessment of environmental well-being was tested for six streams of Leningrad oblast and the city of St. Petersburg. A calculation of the integral index of ecological well-being showed the absence of small rivers with high ecological well-being. Most of the stations used in the study belong to the category with well-being below medium. Only a few stations located in the sections of the streams at a distance from large settlements are categorized as medium and above medium.

Keywords: integrated assessment, ecological well-being, sustainability, aquatic ecosystem, small rivers, bioindication, water quality.

ВВЕДЕНИЕ

В практике природопользования в последние десятилетия заметно вырос интерес к изучению и оценке экологического благополучия экосистем, в том числе водных объектов. Существуют различные подходы к оценке экологического благополучия водных объектов, нередко по-разному понимается и сам этот термин [1–6]. В данной работе экологически благополучной экосистемой, вслед за В.В. Дмитриевым [1], будет считаться «хорошая» или «оптимальная» для гидробионтов и человека водная экосистема. При этом учтены принципы нормирования Н.С. Строганова: приоритетность в использовании водных объектов, достаточность самоочищения, обеспеченность условий жизни для промысловых объектов, пригодность воды для питьевых целей.

Условием для построения моделей экологического благополучия является введение признаков благополучия и деление их на классы. Признаки «хорошей» водной экосистемы предложены в работах В.В. Дмитриева [1] и Е.А. Примака [2]: оптимальная продукция ресурсного звена; оптимальная биомасса ресурсного звена; максимальное видовое разнообразие гидробионтов; высокое качество воды; высокая устойчивость экосистемы к изменению параметров режимов; низкая скорость токсического загрязнения, закисления, эвтрофирования; высокая скорость самоочищения; способность сохранять указанные признаки реально неограниченное время.

Наилучшим подходом к оценке экологического благополучия можно считать интегральную оценку, которая основывается на результате многоуровневых сверток информации о состоянии системы. Реализовать ее возможно, используя метод сводных показателей [7, 8]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя как инструмент для синтеза информации о различных свойствах сложных систем в природе и обществе [9].

Таким образом, цель работы — разработка и апробация модели-классификации интегральной оценки экологического благополучия малых рек.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Натурные исследования были проведены в летний период 2016–2017 гг. на шести реках Ленинградской области и Санкт-Петербурга (рис. 1). Водотоки расположены как на Балтийском щите, так и в пределах Русской платформы. Область кристаллического щита имеет свои геологические и структурные особенности, резко отличные от остальной территории Ленинградской области. Поэтому, несмотря на ее небольшую площадь, на севере Карельского перешейка был выбран один водоток полностью в его пределах — р. Селезнёвка. Остальные реки расположены на территории Русской равнины, причем они приурочены как к низменным пространствам (Невская низменность), так и к возвышенностям (Ижорское плато и Лемболовская возвышенность). Таким образом, в число исследуемых водотоков вошли реки Селезнёвка (станции С1–С3), Охта (О1–О13, О20, О30), Оккервиль (Ок1), Лубья (Л1), Оредеж с притоком Старый Оредеж (СО1, Ор2, Ор3) (см. рис. 1).

На этих реках проводились комплексные экологические исследования, включившие в себя описание растительного покрова, изучение донного населения, определение интегральной токсичности, учет гидрохимических и гидрофизических характеристик водотоков.

На каждой станции исследованных водотоков определялись скорость течения, температура воды и прозрачность по белому диску. В перечень определяемых характеристик вошли жесткость, удельная электропроводность, минерализация, содержание растворенного кислорода, рН, концентрации железа общего, марганца, фосфатов, нитритов, нитратов, азота аммонийного, общего азота и фосфора, ХПК, БПК₅, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), содержание нефтепродуктов, общих фенолов, меди, цинка, никеля, свинца. Определение индекса токсичности вод производилось экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер» [10]. Для каждой станции реки были описаны характеристики макрофитов по известным методикам [11, 12]. Отбор и обработка проб зообентоса также проводились стандартными методами [13].

Последующим этапом обработки результатов полевых работ стали расчеты удельного комбинаторного индекса загрязненности вод (УКИЗВ) по гидрохимическим данным [14]; индекса разнообразия Шеннона [15]; сапробности по индексу Пантле–Букка в модификации Сладечека по данным о состоянии зообентоса и макрофитов [13].

Основные гидрологические характеристики водотоков (расходы, продолжительность маловодной фазы и др.) взяты из материалов Государственного водного реестра. Частный водосбор для конкретных исследованных створов был получен вычислением их площадей при помощи географических информационных систем по цифровым моделям рельефа.

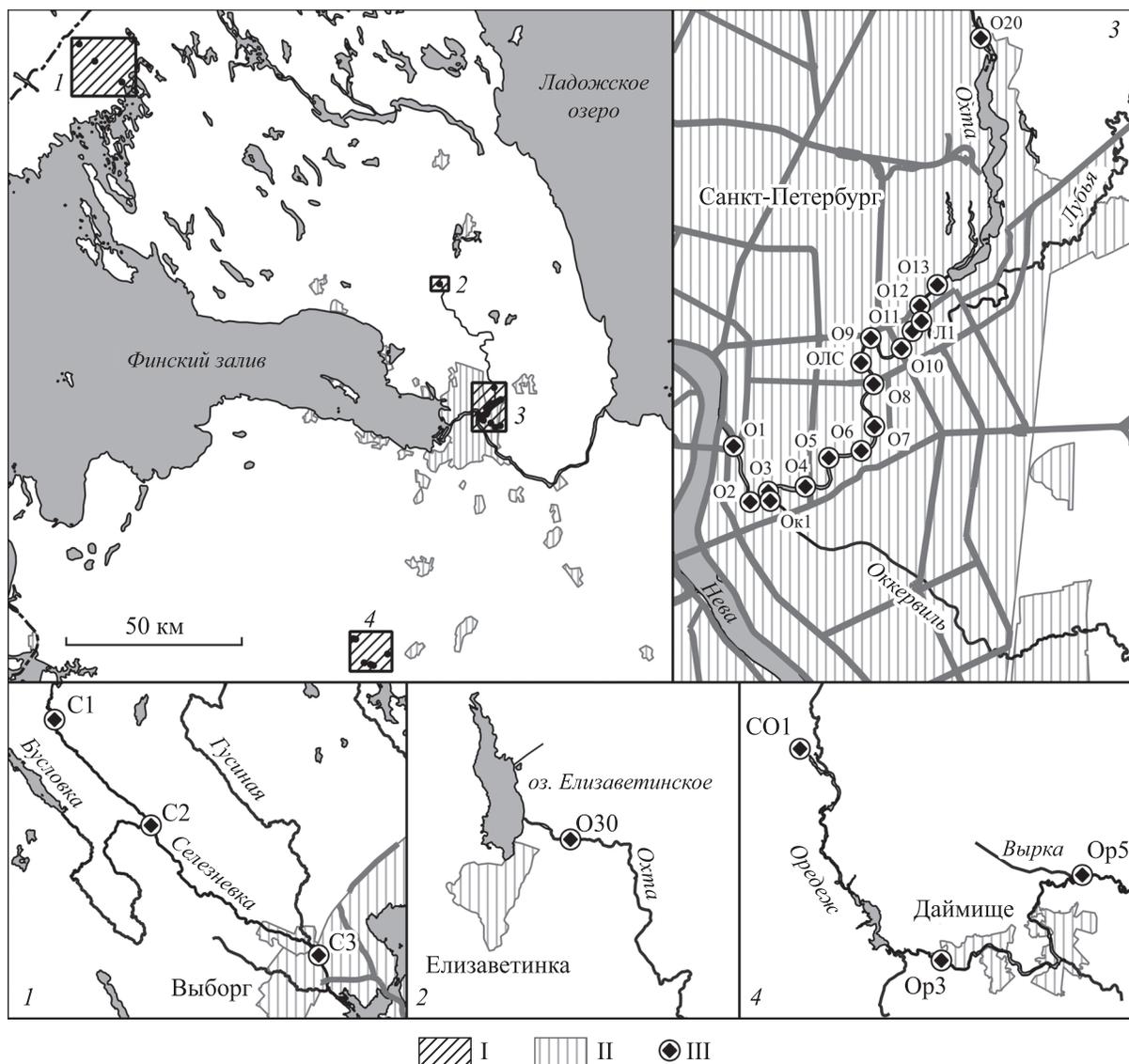


Рис. 1. Станции проведения полевых работ на реках.

I — районы исследований: 1 — р. Селезнёвка, 2 — верховья р. Охты, 3 — нижнее течение р. Охты с притоками — реками Лубья и Оккервиль, 4 — р. Оредеж с притоком — р. Старый Оредеж. II — населенные пункты; III — станции полевых работ.

Оценка экологического благополучия малых рек выполнялась на основе метода сводных показателей [7, 8], который, базируясь на существующих классификациях и типизациях, позволяет разработать модели интегральной оценки экологического благополучия для обширного и разнообразного перечня критериев [1]. На первом этапе была отобрана система критериев состояния биоты и абиотической среды, при использовании которых возможно диагностирование экологического состояния водной экосистемы. На втором этапе реализована процедура нормирования исходных характеристик таким образом, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение, равное 1, а наихудшим — 0. На третьем этапе был выбран вид интегрального индекса $I(q, p)$, который зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами p_i , сумма которых должна равняться 1 ($0 \leq p_i \leq 1$). В качестве выражения для интегрального индекса чаще всего используется линейная свертка характеристик. На четвертом этапе введены оценки весовых коэффициентов p_i . В данной работе все критерии были равновесны. На пятом этапе для левой и правой границ каждого класса рассчитано значение I и построена оценочная шкала для него.

На шестом этапе была выполнена процедура свертки информации. Далее по собранным данным рассчитаны значения интегрального показателя I.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно общим положениям о благополучной экосистеме [1, 2], в основу классификации экологического благополучия водной экосистемы были положены следующие критерии: качество воды, биомасса ресурсного звена, видовое разнообразие гидробионтов, скорость самоочищения, трофический статус, устойчивость водного объекта к внешним воздействиям.

Необходимо отметить, что выбор показателей для определения каждого критерия в предложенной модели может быть вариативен, так как в настоящее время не существует единого метода определения, например, устойчивости экосистемы или скорости самоочищения водного объекта. Различаются подходы в определении трофического статуса или качества вод и т. д. Так, лишь для распознавания трофности водного объекта В.В. Дмитриевым указывается около 65 критериев [9]. Обычно у исследователя нет такого массива данных. Поэтому данное исследование ограничивалось лишь самым необходимым набором признаков, которые возможно определить для изучаемого водотока.

Качество воды оценивается по гидрохимическим показателям — с помощью УКИЗВ, а также на основе данных о гидробионтах и интегральной токсичности воды. Обязательное использование при оценке биологических показателей указывается, например, в Рамочной директиве по воде Европейского Союза [16]. По гидробиологическим, биоиндикационным данным вычислен индекс сапробности Пантле–Букка в модификации Сладечека. По биотестовым — индекс токсичности по инфузориям-туфелькам (*Paramecium caudatum*). Задача подобной многокритериальной оценки качества вод решалась авторами ранее [17] и используется в настоящей работе (см. таблицу).

Устойчивость к изменению параметров естественного режима оценивается с помощью шести критериев (см. таблицу). По большинству из них проводится классификация водотоков согласно ГОСТу [3]. Опыт их использования при балльно-индексной оценке устойчивости водотоков пред-

Критерии и признаки для выделения степени экологического благополучия водотоков

Критерий	Признак	Степень благополучия				
		V. Высокая	IV. Выше средней	III. Средняя	II. Ниже средней	I. Низкая
Качество воды	УКИЗВ	≤1,0	1,1–2,0	2,1–4,0	4,1–11,0	>11,0
	S	≤1,50	1,51–2,50	2,51–3,50	3,51–4,00	>4,00
	T, у. е.	≤0,20	0,21–0,40	0,41–0,70	0,71–0,90	>0,90
Устойчивость к изменению параметров естественного режима	F, тыс. км ²	≥50	49–35	34–20	19–0,2	<0,2
	Q, м ³ /с	≥60	59–20	19–10	9–4	<4
	t _{маловод} , мес.	≤3	(3–4]	(4–5]	(5–6]	>6
	T _{лето} , °C	≥15,0	14,9–13,0	12,9–10,0	9,9–8,0	<8,0
	ΔL, м	≤0,6	0,7–1,1	1,2–1,6	1,7–2,0	>2,0
	Устойчивость русла	Высокоустойчивое (1)	Устойчивое (2)	Среднеустойчивое (3)	Слабоустойчивое (4)	Неустойчивое (5)
Биомасса ресурсного звена	B, г/м ²	>15,0	15,0–8,1	8,0–3,1	3,0–1,5	<1,5
Видовое разнообразие	H, бит	>4,0	4,0–3,0	3,0–2,0	2,0–1,0	<1,0
Скорость самоочищения	S _м , %	>65	65–40	40–25	25–10	<10
	O ₂ , мг/л	>8	8–7	7–6	6–3	<3
Трофический статус	P _{общ} , мкг/л	0–5	5–15	15–50	50–100	>100
	N _{общ} , мкг/л	5–0	100–5	500–100	1500–500	>1500

Примечание. S — индекс сапробности Пантле–Букка в модификации Сладечека; T — индекс токсичности для *Paramecium caudatum*; F — водосборная площадь; Q — среднееголетний расход воды; t_{маловод} — длительность маловодной фазы; T_{лето} — температура воды в летний период; ΔL — амплитуда колебания уровня в течение года; B — биомасса кормового бентоса; H — индекс Шеннона, S_м — доля (в процентах) зарастания русла макрофитами; O₂ — содержание растворенного кислорода; P_{общ} — содержание общего фосфора; N_{общ} — содержание общего азота.

ставлен в работах В.В. Дмитриева [9, 18], а введение в многокритериальную оценку выполнено в работе Ю.А. Титовой с соавторами [19]. Высокие значения таких показателей, как площадь водосбора, средняя температура воды в летние месяцы, среднегодовой расход воды, характеризуют водотоки с более высокой степенью устойчивости. В то же время большой продолжительности маловодной фазы водотока и значительным колебаниям уровня воды соответствует меньшая устойчивость. Помимо характеристик из [3], в модель-классификацию включена оценка гидрологической устойчивости русла К.М. Берковича и А.Ю. Сидорчука [20]. Чем она больше, тем выше и устойчивость водотоков к изменению параметров естественного режима.

Биомасса ресурсного звена напрямую может быть выражена ихтиомассой. Однако, поскольку такой информации по рассматриваемым рекам очень мало, более применима косвенная оценка с помощью биомассы бентоса. Несмотря на недоучет кормовой базы за счет питания рыбы планктоном, данный способ остается распространенным [21], поэтому в работе состояние ихтиоценоза оценивается через кормовую базу рыб-бентофагов. Для таких целей наиболее широко для водоемов Северо-Запада используется классификация М.Л. Пидгайко с соавторами [22]. При включении в модель-классификацию большей категории кормности соответствует большее благополучие. Границы некоторых классов были уточнены. Так, категории «среднекормные» и «выше средней кормности» отнесены к средней градации благополучия, а «малокормные» — к степени «низкое» и «ниже среднего».

Видовое разнообразие гидробионтов оценивается индексом разнообразия Шеннона, получившим «большое распространение и повсеместное признание» [15, с. 165]. Высокие значения видового разнообразия признаются оптимальными с большинства точек зрения [2, 23, 24]. За «максимальное видовое разнообразие», соответствующее высокому благополучию, приняты значения индекса более 4 бит. Причем видовое разнообразие реального сообщества вряд ли превысит 6–7 бит [24]. Так, для рек, характеризующихся высоким качеством вод в работе [25], выявлены диапазоны значений индекса разнообразия для макрофитов от 3,9 до 5 бит. А для водотока, находящегося под значительным антропогенным воздействием, — 1,8. Аналогичное выделение градаций разнообразия с шагом единица (0–1, 1–2 и т. д.) апробировано при оценке экологического благополучия озер Северного Приладожья [18].

Скорость самоочищения водотока зависит от целого комплекса гидрологических, физико-химических и биологических факторов, например геометрии русла, скорости течения, жизнедеятельности гидробионтов и др. Одним из существенных параметров, определяющих скорость трансформации органических веществ, является содержание в воде растворенного кислорода. Выделение диапазонов его концентраций для различных степеней благополучия выполнено с использованием классификаций качества вод А.А. Былинкиной и С.М. Драчева [15]. В качестве границы между классами благополучия «среднее» и «ниже среднего» установлено значение рыбохозяйственного норматива содержания кислорода летом (6 мг/л).

В самоочищении водных экосистем активно участвуют гидробионты, все группы организмов важны для его протекания [27]. Для оценки этого процесса в озерах принято использовать отношение продукции к деструкции фитопланктона — индекс самоочищения/самозагрязнения [15], или время осветления воды зоопланктоном [18]. Для малых водотоков использование этих индексов часто не показательно, так как их планктон может представлять собой дрейф случайно попавших в поток видов. Однако наличие в русле реки зарослей макрофитов в значительной степени влияет на процессы самоочищения водного потока [28, 29]. Чем выше степень зарастания, тем они быстрее. Поэтому на основе классификации водного объекта по степени зарастания [30] предложена шкала для использования в оценке благополучия (см. таблицу). Причем к пяти градациям благополучия отнесены следующие категории водотоков: 1 — «очень слабо заросшие и незаросшие», 2 — «слабо заросшие», 3 — «значительно и умеренно заросшие», 4 — «сильно заросшие», 5 — «очень сильно и сплошь заросшие».

Такие важные для самоочищения показатели, как расход воды реки и температура воды в летний период, не дублируются в этом блоке, поскольку они уже включены в модель при оценке устойчивости.

Трофический статус оценивается с использованием материалов о содержании биогенных соединений: общего фосфора и азота (см. таблицу). Использование таких данных при определении уровня трофии широко распространено. Границы классов выделены по модели-классификации для оценки устойчивости водоемов к антропогенному эвтрофированию [31].

Апробация многокритериального индекса экологического благополучия выполнена на основе данных о состоянии шести рек на 23 станциях. Значения критериев, полученных для различных станций рек

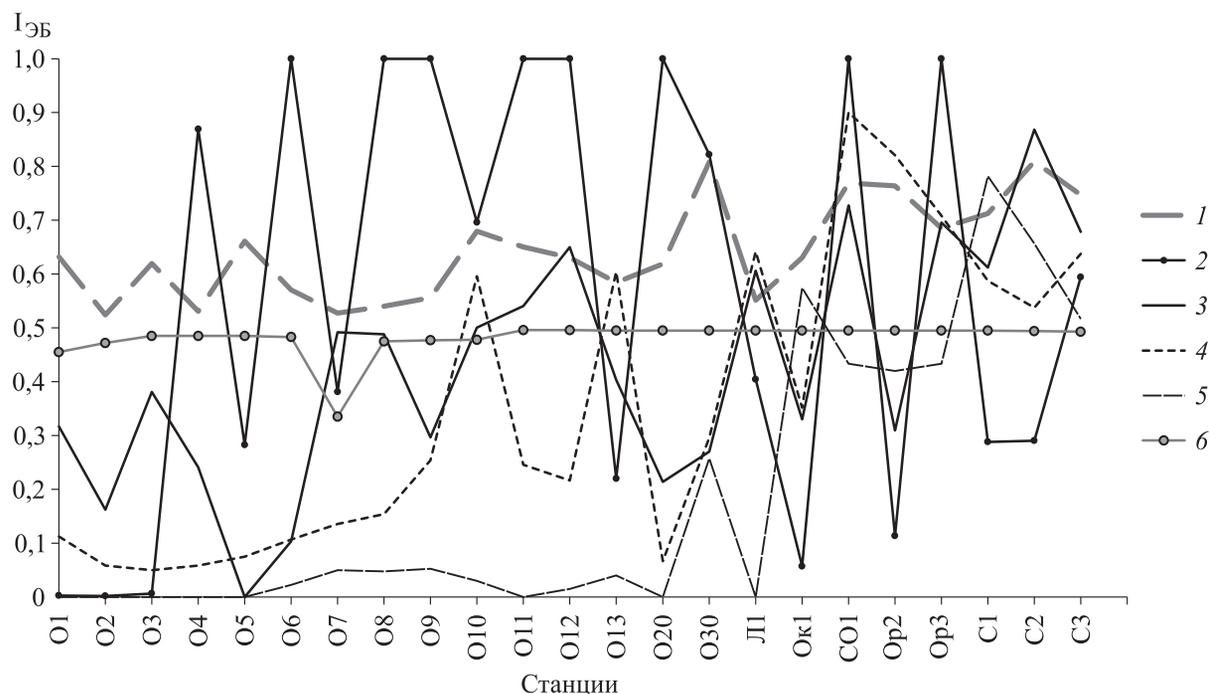


Рис. 2. Нормированные значения критериев, включенных в расчет индекса экологического благополучия ($I_{ЭБ}$) для исследованных станций рек.

Критерии: 1 — качество воды, 2 — биомасса кормового бентоса, 3 — видовое разнообразие, 4 — скорость самоочищения, 5 — трофический статус, 6 — устойчивость к изменению параметров естественного режима.

в виде графиков, приведены на рис. 2. Обращает на себя внимание, что минимальные значения характерны для станций, расположенных в городе. При этом самая негативная картина наблюдается по трофности. Станции р. Охты в пределах Санкт-Петербурга по этой характеристике попадают в градацию с низкой степенью благополучия. Причина — в очень высоком содержании общего азота и фосфора в воде. Критически низкая степень видового разнообразия фиксировалась единожды, также на р. Охте (станция О5), что связано с обнаружением лишь одного вида макрозообентоса и полным отсутствием макрофитов. В целом видовое разнообразие рек Ленинградской области выше по сравнению с городскими водотоками. Такая закономерность ожидаемо прослеживается по большинству характеристик. Самой невысокой изменчивостью выделяется индекс устойчивости водотока к изменению параметров естественного режима. Это неудивительно, так как в исследовании фигурировали участки малых рек одного региона, сходные по значениям показателей, используемых для расчета индекса. Наибольшее варьирование характерно для биомассы кормового бентоса, даже для городской части р. Охты нормированные значения этой характеристики изменяются практически от 0 до 1, в реках Ленинградской области разброс значений также высок.

В результате расчета интегрального индекса экологического благополучия установлено, что большинство исследованных участков водотоков принадлежат к категории «ниже среднего» (рис. 3). Станции на участках рек, удаленных от крупных населенных пунктов и промышленных зон (р. Селезнёвка, р. Оредеж (верховья) и р. Старый Оредеж), в основном продемонстрировали «среднее» благополучие. Лишь один участок охарактеризован как имеющий благополучие «выше среднего» (С2 — р. Селезнёвка), причем он находится близко к нижней границе этого класса. Самые низкие значения индекса благополучия характерны для нижнего течения р. Охты в Санкт-Петербурге (О2, О5, О6).

Обращает внимание отсутствие экологически благополучных станций на малых водотоках. Причиной этого является, во-первых, средняя устойчивость малых рек к изменению параметров естественного режима из-за характерных для этих водотоков небольших значений площади водосбора и расхода воды. Вторая причина — расположение рек в районе с высокой антропогенной нагрузкой, что закономерно приводит к ухудшению ряда критериев (видового разнообразия, трофического статуса и др.).

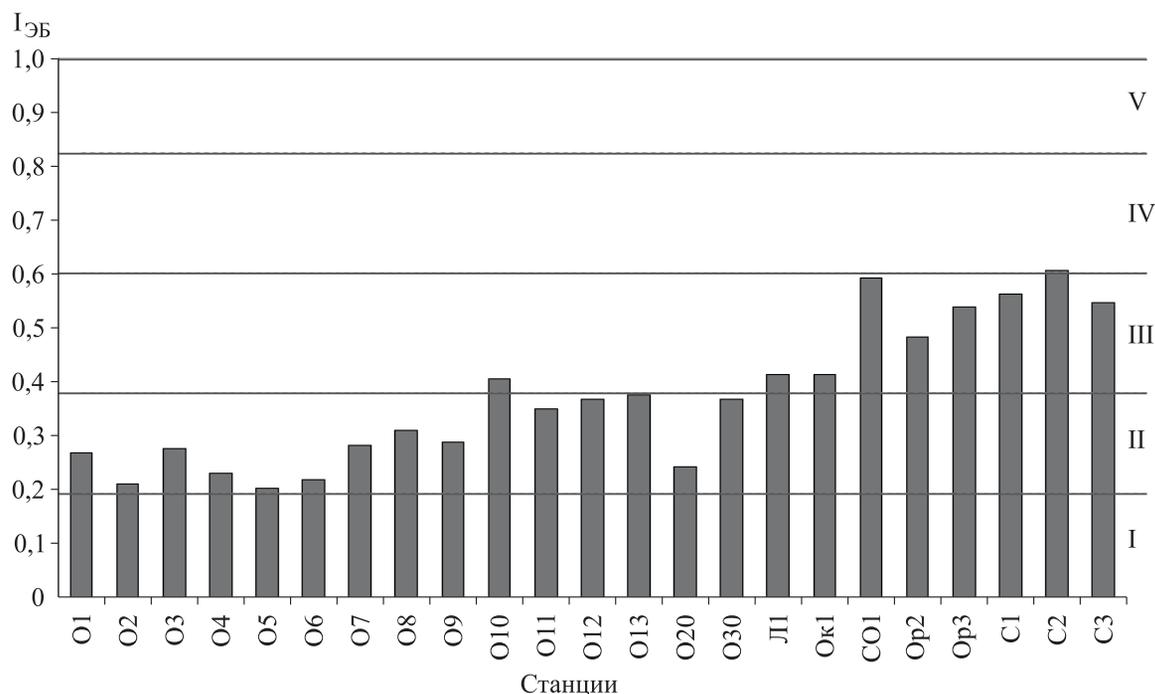


Рис. 3. Значения индекса экологического благополучия ($I_{ЭБ}$) для исследованных станций рек. Степень благополучия: I — низкая, II — ниже средней, III — средняя, IV — выше средней, V — высокая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к оценке экологического благополучия. По натурным данным проведена апробация модели-классификации для шести рек, протекающих по территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Исходя из представления об экологически благополучной водной экосистеме как системе с максимальной и разнообразной продукцией, удовлетворяющей экономические и эстетические потребности человека, существующей неограниченно долго в изменяющейся среде, выбраны семь критериев, положенных в основу классификации. Каждый из них оценивается разным числом показателей (от 1 до 6) так, что в итоговую модель-классификацию их вошло 15. Это различные характеристики водотока, его водосбора, речной биоты и т. д. На их основе был получен интегральный индекс. Он представляет собой непрерывную оценочную шкалу, которая позволяет получать численные значения для реальных водных экосистем с учетом приоритетов исходных характеристик. Самое высокое благополучие равно 1, а предельно низкое — нулю. Следовательно, данный индекс дает возможность на количественной основе проследить динамику пространственно-временных изменений экологического благополучия водных объектов.

Расчет интегрального индекса показал, что большинство исследованных станций водотоков, расположенных в городской черте, принадлежат к категории с благополучием «ниже среднего». Лишь несколько станций, расположенных на участках рек, удаленных от крупных населенных пунктов, отнесены к категориям «среднее» и «выше среднего».

По нашему мнению, в условиях отсутствия единого, общепринятого метода оценки экологического благополучия водных объектов предложенный подход по сравнению с другими лучше обеспечен необходимой информацией и позволяет дать наиболее адекватную оценку для рассматриваемого водного объекта или его участка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16–35–00382 мол_а, 19–05–00683 а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дмитриев В.В.** Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — СПб., 2000. — 52 с.
2. **Примак Е.А.** Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук.— СПб., 2009. — 24 с.
3. **ГОСТ 17.1.1.01–77.** Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. — <https://files.stroyinf.ru/Index/33/33582.htm> (дата обращения 01.03.2019).
4. **Экологический паспорт водоема: Экологический паспорт городского водоема. Васильевские озера. Озеро Пляжное /** Науч. рук. Г.С. Розенберг. — Тольятти: Изд-во Ин-та экологии Волж. бассейна РАН, 2000. — 105 с.
5. **Минина Л.И., Хоружая Т.А., Мартышева Н.А.** Обоснование к методике оценки экологического благополучия водохранилищ // Материалы V Междунар. водного форума «Водные ресурсы и климат». — Минск, 2017. — Ч. 2. — С. 184–190.
6. **Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.** Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). — Екатеринбург: Наука, 1994. — 280 с.
7. **Хованов Н.В.** Математические модели получения и обработки нечисловой информации: теория квалиметрических шкал: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М., 1988. — 28 с.
8. **Хованов Н.В.** Анализ и синтез показателей в условиях информационного дефицита. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 1996. — 195 с.
9. **Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т.** Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. — СПб.: Наука, 2004. — 294 с.
10. **ФР.1.39.2015.19242.** Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». — СПб.: Спектр-М, 2015. — 21 с.
11. **Катанская В.М.** Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. — Л.: Наука, 1981. — 187 с.
12. **Бобров А.А., Чемерис Е.В.** Изучение растительного покрова ручьев и рек: методика, приемы, сложности // Материалы VI Всерос. школы-конф. по водным макрофитам «Гидробиотаника–2005». — Рыбинск, 2005. — С. 181–203.
13. **Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем /** Под ред. В.А. Абакумова. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 320 с.
14. **РД 52.24.643-2002.** Руководящий документ. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. — СПб.: Гидрометиздат, 2002. — 49 с.
15. **Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.** Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. — Тольятти: Изд-во Ин-та экологии Волж. бассейна РАН, 2003. — 463 с.
16. **Water Framework Directive 2000/60/EC** [Электронный ресурс]. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:l28002b> (дата обращения 08.04.2019).
17. **Зуева Н.В., Козлова А.В., Куличенко А.Ю.** Опыт использования токсикологических характеристик в интегральной оценке экологического состояния водного объекта // Труды Карел. науч. центра РАН. — 2018. — № 3. — С. 43–56.
18. **Дмитриев В.В., Федорова И.В., Бирюкова А.С.** Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Ч. 4: Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. Геология. География. — 2016. — № 2. — С. 37–53.
19. **Титова Ю.М., Примак Е.А., Зуева Н.В.** Разработка интегрального индекса для оценки устойчивости водотоков к изменению параметров естественного режима // Сб. докл. Междунар. конф. «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии». — СПб., 2018. — С. 467–471.
20. **Беркович К.М., Сидорчук А.Ю.** Оценка устойчивости русел рек Европейской России и ее оценка в связи с антропогенными нагрузками на реки и их бассейны // Проблемы оценки экологической напряженности европейской территории России: факторы, районирование, последствия. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. — С. 77–87.
21. **Китаев С.П.** Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центр РАН, 2007. — 395 с.
22. **Пидгайко М.Л., Александров Б.М., Иоффе Ц.И., Максимова Л.П., Петров В.В., Саватеева Е.Б., Салазкин А.А.** Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР // Изв. Гос. НИИ озер и речного хозяйства. — 1968. — Т. 67. — С. 205–228.
23. **Loreau M., Naeem S., Inchausti P., Bengtsson J., Grime J.P., Hector A. Hooper D.U., Huston M.A., Raffaelli D., Schmid B., Tilman D., Wardle D.A.** Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges // Science. — 2001. — Vol. 294. — P. 804–808.
24. **Протасов А.А.** Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикоэкология. — Киев, 2002. — 105 с.
25. **Зуева Н.В., Гальцова В.В., Дмитриев В.В., Степанова А.Б.** Использование структурных характеристик сообществ макрофитов как индикатора экологического состояния малых рек запада Ленинградской области // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. Геология. География. — 2007. — № 4. — С. 60–71.

26. Синельников В.Е. Механизм самоочищения водоемов. — М.: Стройиздат, 1980. — 111 с.
27. Остроумов С.А. Роль биоты в экологических механизмах самоочищения воды. — М.: МАКС Пресс, 2016. — 124 с.
28. Васенко А.Г., Захарченко М.А., Рижикова И.А. Методика расчета самоочищающей способности малых рек [Электронный ресурс]. — <http://www.phytoremediation.com.ua/publkacz/52-metodika-rascheta-samoochishhayushhej-sposobnosti-malux-rek.html> (дата обращения 08.04.2019).
29. Кокин К.А. Экология высших водных растений. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. — 158 с.
30. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. — Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. — 214 с.
31. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Ч. 2: Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. Геология. География. — 2013. — № 3. — С. 88–103.

Поступила в редакцию 17.07.2019

После доработки 14.01.2020

Принята к публикации 25.12.2020