УДК 504.06+504.45+51-76+573.7+574.5

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ГЕОСИСТЕМ

[1]Дмитриев В.В., [2]Дмитриев Н.В., [1]Воскресенская В.А., [1]Фролова А.Д., [1]Кожеко Ю.Р.

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург;
[2]ООО ИТСК, Санкт-Петербург, e-mail: vasiliy-dmitriev@rambler.ru

Развитие авторской методологии интегральной оценки экологической целостности геосистем (ЭЦГ) рассматривается на примере интегральной оценки экологического благополучия (ЭБ) водных объектов суши. Признаки экологически благополучного водоема, учитываемые в модели: 1 – оптимальная первичная продукция, создаваемая экосистемами; 2 – высокое качество воды; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты; 4 – высокая устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5 – низкая скорость закисления; 6 – высокая скорость самоочищения; 7 – способность сохранять названные свойства в течение определенного времени. На основе метода сводных показателей (МСП) реализуется два уровня свертки информации. По величине интегрального показателя экологического благополучия (ИПЭБ) ключевой объект (малое озеро в карельском Приладожье – оз.Суури) в период с 2010 по 2013 гг. отнесен к II классу (правая граница или середина класса) ЭБ (благополучие выше среднего).

Ключевые слова: экологическая целостность, экологическое благополучие, интегральная оценка, построение моделей-классификаций, метод сводных показателей

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF INTEGRATED ASSESSMENT THE ECOLOGICAL INTEGRITY OF THE GEOSYSTEMS

[1]Dmitriev V.V., [2]Dmitriev N.V., [1]Voskresenskaya V.A., [1]Frolova A.D., [1]Kojeko Y.R.

[1]St. Petersburg State University, St. Petersburg;
[2]JSC ITSK, St. Petersburg, e-mail: vasiliy-dmitriev@rambler.ru

Development of the author's methodology of integrated assessment the ecological integrity of the geosystems is considered as an example of integrated assessment the ecological prosperity of the water area on land. Sign of ecological prosperity of the accounted in the model: 1 – optimal primary production created by ecosystem; 2 – water of high quality; 3 – the maximum specific diversity of biota; 4 – high resistance to change in the parameters of natural and anthropogenic modes; 5 – low speed of acidification; 6 – high speed of self-purification; 7 – the ability to keep the above properties during on certain times. Based on the method of summary indicators realize two levels of convolution of the information. The integrated assessment of the ecological prosperity for the lake Suuri (situated in «Karel'skii perecheek») from 2010 to 2013 years – II kind, that is prosperity higher that medium.

Keywords: ecological integrity, ecological prosperity integrated assessment, forming model-classification, method of aggregates

Для анализа состояния систем при экологической регламентации, диагностике состояния и характеристике их ответной реакции на воздействие (нормирование, экологическое нормирование) необходимо использовать кроме аддитивных характеристик и неаддитивные, среди которых в последнее время чаще других упоминаются интегративность или целостность. В англоязычной литературе это синонимы и в сочетании с прилагательными «биологическая» или «экологическая» образуют «biological integrity» или «ecological integrity», а в русском языке часто переводятся как «биологическая целостность» или «экологическая целостность». Иногда так же называются группы характеристик, отражающих интегративные свойства сложных систем, то есть свойства, присущие системам в целом, а не каким-либо их компонентам («важным», «значимым», «ключевым», «слабым», «аддитивным» и др.).

В современных зарубежных исследованиях ключевыми понятиями являются биологическая оценка (Biological Assessment) и биологическая целостность (Biological Integrity). Биологическая оценка определяется как «состояние природного объекта, на основе биологических исследований и других прямых измерений для оценки состояния обитателей биоты» [13]. В биологических оценках состояние биоты определяют для различных уровней: структура, таксономический состав, состояние особей и биологические процессы, то есть используется т.н. интегрированный подход (иногда непрофессионально переводят как «интегральный», но этот подход не имеет ничего общего с интегральной оценкой, обсуждаемой в данной публикации). Биологическую целостность (Biological Integrity) западные исследователи обычно определяют, как «способность поддерживать сбалансированное, целостное и адаптивное состояние сообщества организмов, имеющих видовую структуру, разнообразие и функциональную организацию, сравнимую с естественными внутри определенного региона» [13].

В США используется термин «ecological integrity». Как основное понятие он фигурирует в американском экологическом законодательстве («Закон о Чистой воде») и используется Агентством по охране окружающей среды Environmental Protection Agency (EPA).

Биологическая целостность на западе часто рассматривается как способ определения здоровья экосистемы, а «здоровье экосистемы», начиная с трудов Haskell et al. (1991); Meyer (1997); Chessman (2002) [цит. по 13] в основном связывают с ее устойчивостью, и если устойчивость нарушена, то такая экосистема, по мнению исследователей, теряет свой исходный (здоровый) статус. Согласно Европейской Рамочной Водной Директивы (Water Framework Directive, WFD), интегральный подход (правильнее переводить интегрированный подход), развивающийся в Европе, основан на следующих принципах: 1 – совместное рассмотрение всех типов геосистем с учетом их взаимодействия; 2 – экосистемный подход к объектам, учитывающий как абиотическую, так и биотическую компоненту; 3 – учет и оценка взаимодействия всех типов природопользования, включая саму экосистему. В задачи этих исследований входит также выделение так называемых «экорегионов» Европы [13].

Нами под экологической оценкой понимается параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. Такая оценка сводится к оценке химического, биологического состава и физических свойств природного объекта, обусловливающих устойчивое функционирование в нем конкретных сообществ живых организмов, сохранение определенного типа экологической сукцессии, или к оценке его пригодности для различных видов использования человеком (совмещение био- и антропоцентризма). При этом исследуются как свойства абиотической среды, так и параметры структуры и функционирования экосистем природного объекта в естественных и измененных условиях с целью их рационального использования, оптимальной эксплуатации для удовлетворения потребностей людей и жизни организмов [2-7,12].

Показано, что устойчивость является лишь одним из параметров оценки экологического благополучия и что устойчивая экосистема может являться сильно антропогенно-трансформированной системой и в этом случае не может быть признана благополучной (здоровой) [8, 9, 12].

Разработка различных методик оценки устойчивости базируется в основном на индикаторном подходе и индексах состояния, устойчивости, а также моделях-классификациях, подавляющее большинство которых построено на *балльном* или *балльно-индексном подходе* [12]. Ценность этих исследований в том, что в них выделяются основные параметры оценки устойчивости, предлагаются оценочные шкалы и обозначается весомость отдельных критериев оценивания. Слабо развита индексология устойчивости. В [8,9] нами упоминалось, что балльно-индексные системы оценки, с одной стороны, содержат, как правило, хорошую базу оценочных (нумерических, квалиметрических) шкал, которые целесообразно использовать при многокритериальном и интегральном оценивании. С другой стороны, в балльно-индексных подходах эти шкалы, составляющие фундамент «экологической квалиметрии», не используются в явном виде. В них натуральным значениям характеристик ставится в соответствие определенное количество баллов, учитываемых на следующих этапах оценочных построений. При этом иногда случается, что одна и та же шкала у разных авторов характеризуется разнонаправленностью связи i-го параметра с оцениваемым свойством: у одного автора это положительная связь, а у другого, – отрицательная (нелинейность связи не обсуждается). В оценочных исследованиях устойчивости это происходит из-за того, что один автор оценивает адаптационную устойчивость, а другой – регенерационную. Бывает и так, что в одной модели-классификации встречаются первый и второй тип устойчивости одновременно, но автор умышленно допускает или не поясняет причину и необходимость такого сочетания подходов.

Материалы и методы исследования

Нормальная (понимаемая как «хорошая») экосистема – это экосистема с оптимальной и разнообразной продукцией (удовлетворяющей экономические и эстетические потребности человека), существующая неограниченно долго в изменяющейся среде [1]. В наших работах по обоснованию критериев ЭБ признаками благополучной водной экосистемы предлагалось считать: 1 – оптимальную продукцию ресурсного звена; 2 – оптимальную биомассу ресурсного звена; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты; 4 – высокое качество воды; 5 – высокую устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 6 – низкую скорость загрязнения, закисления, эвтрофирования; 7 – высокую скорость самоочищения; 8 – способность сохранять вышеназванные признаки реально неограниченное время [7, 16]. В зарубежной литературе идея оценки экологического благополучия дискутируется под углом зрения «здоровья экосистемы» [13].

Основу, разработанной модели-классификации ЭБ составляют признаки «хорошей» (для человека

и организмов-гидробионтов) водной экосистемы и их изменение по пяти классам благополучия. При создании модели нами использовано совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов, в формировании представлений об ЭБ используются аксиология и аксиометрия. Признаки экологически благополучной водной экосистемы, учитываемые в модели: 1 – оптимальная первичная продукция, создаваемая олиготрофными экосистемами; 2 – высокое качество воды; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты (по зообентосу); 4 – высокая устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5 – низкая скорость закисления; 6 – высокая скорость самоочищения. Интегральная оценка ЭБ выполнялась на основе метода сводных показателей (МСП). В соответствие с этим были реализованы следующие основные этапы.

На первом этапе отбирается обоснованная система критериев, с использованием которых возможно диагностирование ЭБ. Эти критерии разбиваются на группы, характеризующие указанные выше признаки. Нужно стремиться к тому, чтобы каждый из параметров был необходим, а все параметры (индикаторы) вместе были достаточны для описания качества (состояния) рассматриваемого свойства геосистемы. При этом могут существовать характеристики, увеличение значений которых приводит к ухудшению качества или близки к оптимальному состоянию (первый тип), а также характеристики, увеличение значений которых приводит к его улучшению (второй тип). Кроме того, возможно существование характеристик, критические значения которых разбивают шкалу изменений характеристики на два интервала с противоположными свойствами влияния переменной на результат оценивания. Одновременно с введением признаков (критериев) оценивания вводятся классы благополучия.

На втором этапе с помощью несложных преобразований избавимся от размерности исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение равное 0, а наихудшим, равное 1 (можно наоборот). Такое преобразование, следуя [15], выполним следующим образом. Для критериев первого типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при} \quad x_i \le \min_i, \\ \left(\dfrac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^{\lambda}, & \text{при} \quad (\min_i < x_i \le \max_i), \\ 1, & \text{при} \quad x_i > \max_i \end{cases} \qquad (1)$$

В (1): q_i – преобразованное значение из табл.2; x_i – текущее значение из табл. 2; min_i – минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т.п.) значение критерия; max_i – максимальное значение критерия (лучше ориентироваться на региональные, но не абсолютные максимумы критериев). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени l, определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ – вверх.

Для критериев второго типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при} \quad x_i \le \min_i, \\ \left(\dfrac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^{\lambda}, & \text{при} (\min_i < x_i \le \max_i), \\ 0, & \text{при} \quad x_i > \max_i . \end{cases} \qquad (2)$$

Особенно просто построение нормирующих функций, получается при подстановке в формулы (1) и (2) значения параметра l=1. Далее мы будем использовать такие простейшие нормирующие функции, учитывая, что выбор линейной нормировки всегда может быть оправдан на первом этапе исследования. Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные критерии в различных шкалах измерения (абсолютные и средние величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т.п.) приводятся к безразмерным шкалам, после чего над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя ЭБ.

Зададим минимальные и максимальные значения критериев. Для этого, как правило, используются минимальное (min_i) и максимальное (max_i) значения из каждой шкалы исходных характеристик. Можно рекомендовать также использовать для этого региональные минимумы и максимумы характеристик.

На третьем этапе выбирается вид интегрального показателя $Q(q,w)$, который строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i, но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами w_i, сумма которых должна равняться 1,0 ($0 \le w_i \le 1$). В качестве выражения для интегрального показателя, следуя [15], зададим линейную свертку показателей вида:

$$Q_i = \sum_{i=1}^{n} q_i w_i, \; i = 1,...n,$$

где n – число критериев оценивания.

На четвертом этапе вводятся оценки весовых коэффициентов w_i. Как правило, уже само составление программы оценочных исследований является первичным «взвешиванием» параметров, компонентов и их свойств. Однако такое взвешивание оказывается недостаточным, так как влияние отобранных главных факторов также неравнозначно, что вызывает необходимость придавать при оценке различным критериям разные приоритеты, веса или коэффициенты значимости. Нередко при этом вес вводится без какого-либо четкого обоснования. В самом простом случае, при равенстве весов исходных параметров, вес определяется простой формулой $w_i = 1/n$, где n – количество критериев.

На пятом этапе для левой и правой границ каждого класса исходной классификации рассчитывается значение Q_i. В результате выполнения пятого этапа получаем шкалу интегрального показателя по классам состояния при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

На шестом этапе по собранным данным определим значение интегрального показателя качества жизни в определенный момент времени. Как правило, оценить состояние системы однозначно при покомпонентной оценке не представляется возможным, так как по одному критерию система относится к одному классу состояния, по другому – к другому. Встречаются еще более сложные ситуации, когда разброс значений отдельных критериев укладывается в несколько классов состояния. Это может быть связано как с несовершенством методической базы, так и с недостаточным опытом исполнителя, осуществляющего сбор фондовых, каталожных материалов и статистических данных.

По правилам построения исходной классификации рассчитываются значения интегрального показателя Q_i и, таким образом, по совокупности критериев оценивания система (или ее качество) относится к определенному классу (либо к пограничному состоянию между классами).

Можно таким же образом рассчитать значение интегрального показателя по другим натурным данным или другим моделям-классификациям, учитывающим несколько уровней свертки показателей. В более сложных примерах, учитывающих неполную, неточную и нечисловую информацию, вводятся многоуровневые свертки информации о состоянии природных систем, а весовые коэффициенты задаются на основе моделей информационного дефицита [15]. Сравнение состояния геосистем на интегральной основе дает возможность количественно оценивать пространственно-временные особенности их динамики, степень их трансформации, тенденции их изменения, степень допустимого воздействия на них.

Результаты исследования и их обсуждение

Цель работы – на основе аксиологического подхода и метода сводных показателей (МСП) выполнить интегральную оценку экологического благополучия водоема для летнего периода функционирования водной экосистемы. Перечень критериев и рекомендации по формированию оценочных шкал и показателям весомости критериев для первого уровня свертки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели и рекомендации по формированию оценочных шкал для интегральной оценки ЭБ

1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности).	Оценивался по величине интегрального показателя трофности (ИПТ) для 5 классов трофности (О-олиготрофия, М-мезотрофия, Э-эвтрофия, П-политрофия, Г-гиперэвтрофия) по 4 критериям: 1-валовая первичная продукция фитопланктона, мг С/л сут; 2-прозрачность воды, м; 3-отношение прозрачности к глубине (по шкале Китаева, 1973 и средней глубине озера 3 м); 4-pH воды в летнее время [10, 12]. При задании весов (приоритетов) при построении ИПТ учитывалось, что: $w_1 > w_2 > w_3 = w_4$. Для расчетов использовались $w_1 = 0{,}49$; $w_2 = 0{,}29$; $w_3 = w_4 = 0{,}11$.
2. Качество воды (интегральный показатель качества)	Оценивалось по величине интегрального показателя качества воды (ИПКВ) для 5 классов качества по 6 критериям: 1-прозрачность воды (шкала взята из модели-классификации оценки трофности); 2-удельная электропроводность воды (мк См/см), 3-азот NH4 (мгN/л), 4-кислород в % насыщения, 5-гидробиологический индекс BMWP, 6-фосфор PO4 (мгP/л). При задании весов (приоритетов) при построении ИПКВ учитывалось, что: $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 > w_1 = w_6$. Для расчетов использовались $w_1 = w_6 = 0{,}112$; $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0{,}194$
3. Максимум видового разнообразия по индексу Шеннона (H)	Оценивался по авторской шкале по верхнему пределу изменчивости индекса. В процессе построения шкалы было принято, что максимум индекса Шеннона (H) наблюдается в олиготрофных условиях и равен 5,0. По мере увеличения трофности и снижения качества воды значения H равномерно уменьшаются до 0. Принималось, что I-му, наиболее высокому классу ЭБ, соответствует значение индекса H в пределах 5-4; II классу 4-3; III классу 3-2; IV классу 2-1; V классу 1-0.
4. Устойчивость (баллы устойчивости по индексно-балльной шкале) к изменению естественного и антропогенного режимов	Оценивалась по балльно-индекной шкале, которая нормированием переводилась в интегральный показатель устойчивости ИПУ [10, 17, 22]. ИПУ рассчитывался для двух сценариев У1 и У2, в которых оценивалась устойчивость к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию (У1) или к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды (У2). В случае У2 оценивалось только качество воды верхней толщи озера. По классам задавались следующие интервалы баллов устойчивости из балльно-индексной шкалы: I кл. 5-11 баллов (макс.уст.); II кл. 13-16; III кл. 18-23; IV кл. 25-28; V кл. 30-37 (мин.уст.) [10,12,14].
5. Степень закисления воды	Оценивалась по оценочной шкале pH. Принималось, что I-му классу ЭБ соответствует значение pH в пределах 8,5-6,5; II классу 6,5-6,0; III классу 6,0-5,5; IV классу 5,5-5,0; V классу 5,0-4,5.
6. Скорость самоочищения по времени осветления воды зоопланктоном	Оценивалась по времени осветления воды зоопланктоном (T) в сутках по авторской шкале. Принималось, что I-му классу ЭБ соответствует значение T в пределах от 1 до 2 сут, II классу 2-5 сут.; III классу 5-10 сут.; IV классу 10-25 сут.; V классу 25-50 сут. Методика расчета T приводится в [10].
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	ИПЭБ представляет собой сумму нормированных значений параметров 1-6 , взятых со своим весом. ИПЭБ оценивался на втором уровне свертки показателей в предположении о равновесомости шести исходных критериев первого уровня.

В табл. 2 и 3 приводятся модели-классификации для расчета ИПТ и ИПК. В числителе приведены левая и правая границы оценочных шкал, в знаменателе – нормированные значения показателей в соответствии с нормирующими функциями (1) и (2). В табл. 4 приводятся все оценочные шкалы первого уровня свертки показателей для оценки ЭБ и шкала ИПЭБ (второй уровень свертки). При построении ИПЭБ на втором уровне свертки показателей использовалась гипотеза о равновесомости всех шести оценочных критериев первого уровня.

Таблица 2

Модель-классификация интегральной оценки трофности водной экосистемы

Критерии	Олиготрофия (макс. ЭБ)	Мезотрофия	Эвтрофия	Политрофия	Гиперэвтрофия (мин. ЭБ)
1. Валовая первичная продукция, мгС/л сут	0,005 – 0,05 0,000-0,0056	0,05 – 0,50 0,0056-0,062	0,50 – 4,00 0,062-0,500	4,00 – 6,00 0,500-0,750	6,00 – 8,00 0,750-1,000
2. Прозрачность воды по белому диску, м	6,00 – 4,75 0,000-0,212	4,75 – 2,50 0,212-0,593	2,50 – 2,00 0,593-0,678	2,00– 1,00 0,678-0,847	1,00 – 0,10 0,847-1,000
3. Отношение прозрачности к глубине	2,00 – 1,00 0,000-0,503	1,00 – 0,50 0,503-0,754	0,50 – 0,25 0,754-0,879	0,25 – 0,10 0,879-0,955	0,10 – 0,01 0,955-1,000
4. pH воды в летнее время	6,90 – 7,20 0,000-0,143	7,20 – 8,00 0,143-0,524	8,00 – 8,50 0,524-0,762	8,50 – 8,75 0,762-0,881	8,75 – 9,0 0,881-1,000
ИПТ	0-0,135	0,135-0,343	0,343-0,622	0,622-0,815	0,815-1,000

Таблица 3

Модель-классификация для интегральной оценки качества воды

Класс качества	I (макс. ЭБ)	II	III	IV	V (мин. ЭБ)
1. Прозрачность воды, м	3,50-3,00 0-0,145	3,00-0,50 0,145-0,870	0,50-0,30 0,870-0,928	0,30-0,10 0,928-0,986	0,10-0,05 0,986-1
2. Удельная электропроводность, мкСм/см	100-400 0-0,200	400-700 0,200-0,400	700-1100 0,400-0,670	1100-1300 0,670-0,800	1300-1600 0,800-1,000
3. Азот NH4, мгN/л	0-0,05 0-0,017	0,05-0,20 0,017-0,067	0,20-0,40 0,067-0,133	0,40-1,00 0,133-0,333	1,00-3,00 0,333-1,000
4. O2, %	100-95 0-0,071	95-80 0,071-0,286	80-70 0,286-0,429	70-60 0,429-0,571	60-30 0,571-1,000
5. BMWP	200-150 0-0,250	150-100 0,250-0,500	100-50 0,500-0,750	50-25 0,750-0,875	25-0 0,875-1,000
6. Фосфор PO4, мгP/л	0-0,005 0-0,008	0,005-0,03 0,008-0,050	0,03-0,10 0,050-0,167	0,10-0,30 0,167-0,500	0,30-0,60 0,500-1,000
ИПКВ	0-0,122	0,122-0,346	0,346-0,507	0,507-0,667	0,667-1,000

Таблица 4

Оценочная классификация интегрального показателя ЭБ

Признак	Степень экологического благополучия, классы экологического благополучия				
	Высокое I	Выше среднего II	Среднее III	Ниже среднего IV	Низкое V
1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности ИПТ).	0-0,135	0,135-0,343	0,343-0,622	0,622-0,815	0,815-1
2. Качество воды (интегральный показатель качества ИПК)	0-0,122	0,122-0,346	0,346-0,507	0,507-0,667	0,667-1
3. Максимум видового разнообразия по индексу Шеннона (H)	0-0,200	0,200-0,400	0,400-0,600	0,600-0,800	0,800-1
4.Устойчивость (баллы устойчивости по индексно-балльной шкале) к изменению естественного и антропогенного режимов	0-0,188	0,25-0,344	0,406-0,563	0,625-0,719	0,781-1
5. Степень закисления воды по pH	0-0,500	0,500-0,625	0,625-0,750	0,750-0,875	0,875-1
6. Скорость самоочищения по времени осветления воды зоопланктоном	0-0,020	0,020-0,082	0,082-0,184	0,184-0,490	0,490-1
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	0-0,194	0,205-0,357	0,367-0,538	0,548-0,728	0,738-1

В табл. 5 приведены исходные данные (средние значения или пределы изменения) для расчета ИПЭБ для оз.Суури в 2010-2013 гг. [11]. В расчетах использовались данные наблюдений мониторингового типа, собранные в период летних (июль) полевых практик студентов на озере в указанные годы. В табл. 6 и 7 приведены результаты расчетов интегральных показателей первого и второго уровней свертки соответственно с учетом равновесомости показателей второго уровня. В скобках указан класс и близость к границам между классами для показателей первого уровня и для ИПЭБ (второй уровень). При оценке устойчивости рассмотрен сценарий У1.

Таблица 5

Исходные данные для оценки экологического благополучия оз. Суури по материалам натурных наблюдений 2010-2013 гг.

Признак	2010	2011	2012	2013
1. Валовая первичная продукция в подповерхностном слое воды, мг С/л сут	0,0125	0,111	0,28	0,15
2. Средняя прозрачность воды по белому диску, м	1,4	2,01	1,65	1,80
3. Отношение прозрачности к глубине при средней глубине 2,2 м (использовалось среднее значение)	0,64	0,91	0,48	0,82
4. pH воды в летнее время на поверхности (использовалось среднее значение)	6,4-6,9	6,71-7,06	6,45-6,79	7,00-7,40
5. Удельная электропроводность, мкСм/см на поверхности (использовалось среднее значение)	70-76	79,4-87,9	60-66	55-58
6. Средняя концентрация азота NH4, мгN/л на поверхности, среднее	0,143	0,697	0,798	0,219
7. Процентное насыщение воды кислородом на поверхности (использовалось среднее значение), %	104-112	117-151	91-105	93-101
8. Индекс BMWP по зообентосу (использовалось среднее значение)	44-88	51-60	16-41	45
9. Фосфор PO4, мгP/л на поверхности, среднее	0,013	0,003	0,004	0,01
10. Индекс Шеннона (по правой границе предела изменчивости)	3,40-3,68	1,71-2,89	1,77-2,38	1,86
11. Устойчивость в баллах по У1	23	23	26	25
12. Устойчивость в баллах по У2 для поверхн.	26	26	30	30
13. Время осветления воды зоопланктоном, сут	14	4,4	7,1	1,78

Таблица 6

Оценка экологического благополучия оз.Суури по материалам натурных наблюдений 2010-2013 гг (первый уровень свертки показателей)

Признак	2010	2011	2012	2013
1. ИПТ	0,301 (Мезотрофия, П)	0,264 (Мезотрофия, С)	0,315 (Мезотрофия, П)	0,296 (Мезотрофия, П)
2. ИПКВ	0,21 (II класс, С)	0,30 (II класс, П)	0,284 (II класс, П)	0,23 (II класс, С)
3. Индекс Шеннона для зообентоса	0,292 (II класс, П)	0,54 (III класс, П)	0,584 (III класс, П)	0,63 (IV класс, Л)
4. Устойчивость в баллах по У1	0,563 (III-IVкласс, граница)	0,563 (III-IVкласс, граница)	0,66 (IVкласс, С)	0,625 (III-IV класс, граница)
5. pH воды	0,463 (I класс, П)	0,404 (I класс, П)	0,47 (I класс, П)	0,325 (I класс, С)
6. Время осветления воды зоопланктоном	0,265 (IV класс, С)	0,069 (II класс, П)	0,124 (III класс, П)	0,016 (I класс, П)

Примечание. Символ справа от номера или названия класса означает: С – ближе к середине класса, Л – ближе к левой границе класса; П – ближе к правой границе класса.

Таблица 7

Оценка экологического благополучия оз.Суури по материалам натурных наблюдений 2010-2013 гг (второй уровень свертки показателей)

Показатели / год	2010	2011	2012	2013
Интегральный показатель экологического благополучия (ИПЭБ)	0,349 (II класс, П)	0,357 (II класс, П)	0,406 (II класс, С)	0,354 (II класс, П)

Примечание. Символ справа от номера класса означает: С – ближе к середине класса, Л – ближе к левой границе класса; П – ближе к правой границе класса.

Заключение

Разработаны признаки экологически благополучной водной экосистемы, для которой сформулирована модель-классификация экологического благополучия (ЭБ). В перечень признаков включены: 1 – оптимальная первичная продукция, создаваемая в олиготрофных экосистемах; 2 – высокое качество воды; 3 – максимальное видовое разнообразие биоты; 4 – высокая устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; 5 – низкая скорость закисления; 6 – высокая скорость самоочищения. На основе метода сводных показателей (МСП) выполнена интегральная оценка экологического благополучия оз.Суури. Учитывалась разновесомость показателей на первом уровне свертки и равновесомость на втором уровне. Для 2010-2013 гг экологическое благополучие озера оценено II-м классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ в 2010-2013 гг. незначительно изменялись внутри II-го класса: от 0,35 до 0,41 (IIс-IIп). Это доказывает, что озеро было способно сохранить класс ЭБ на протяжении рассмотренного 4-летнего временного интервала.

Исследования выполнялись при частичной поддержке грантами РФФИ 13-05-10046-к, 13-05-00648-а, 14-05-00787-а.

Список литературы

1. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонтов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. – Екатеринбург, 1994, – 280 с.

2. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем (учебное пособие) – СПб.: Наука, 2007. – 267 с.

3. Дмитриев В.В. Методологические аспекты параметрической оценки состояния природных и антропогенно-трансформированных систем // География и современность. Вып.10. Сборник статей под ред. В.В. Дмитриева, Д.В. Севастьянова, К.В. Чистякова. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. – С. 21-46.

4. Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы. Научно-теоретический журнал «Общество. Среда. Развитие». №4 (12), 2009, – С.146-165.

5. Дмитриев В.В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера, 2010, т.2, №3, – С.507-520.

6. Дмитриев В.В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Вестник СПбГУ, сер.7, 1994, вып. 2. (№14), – С.60-70.

7. Дмитриев В.В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов. Автореф. ... дисс. – СПб, 2000. – 38 с.

8. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем. Вестник СПбГУ, сер.7 (геология, география), 2013, вып.3, – С.88-103.

9. Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем. Вестник СПбГУ, серия 7, вып.3, 2012, – С.65-78.

10. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пряхина Г.В. Методические указания по учебно-производственной практике «Экологическое состояние водных объектов»: Учебно-метод. пособие. – СПб.: ВВМ, 2010. – 116 с.

11. Дмитриев В.В., Панов В.Е., Пуленко Н.А., Шарафутдинова Г.Ф., Бурцев С.Н., Боброва О.Н., Буршева О.А., Евдокимов А.А., Зезюльчик Т.С., Кашина В.В. Экологическое состояние водных объектов карельского приладожья по результатам экспедиционных исследований 2011 г. и его сравнение с ретроспективными данными // Современные проблемы географии и геоэкологии. Материалы международной научной конференции, посвященной 90-летию почетного профессора СПбГУ, доктора географический наук, профессора А.Г. Исаченко / Под общ. ред. Т.А. Алиева, Г.Н. Белозерского, В.В. Дмитриева, В.Н. Мовчана, А.И. Чистобаева. – СПб., 2012, – С.220-233.

12. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Учебное пособие. Наука., – СПб., 2004, – 294 с.

13. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. «Экологическое качество поверхностных вод», – Минск, изд. «Беларуская навука», 2010, – 329 с

14. Снакин В.В., Мельченко В.Е., Буковский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. – М., 1992. – 127 с.

15. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб, изд. СПбГУ, – 195 с.

16. Alexeeva O.N., Guzheva I.N., Dmitriev V.V. The development of approach to the water reservoir ecological prosperity assessment / 3rd Symposium «Quality and Management of Water Resources» Saint Petersburg, Russia, June 16-18, 2005. Book of proceedings. Scientific Editors V.V. Dmitriev, V.I. Sergeev Saint Petersburg, Изд. ГУП «Типография «Наука», – СПб.: изд-во «Наука», 2005, pp. 9-17.