

ГЕОГРАФИЯ

УДК 504.54

*В. В. Дмитриев¹, И. В. Федорова¹, А. С. Бирюкова²***ПОДХОДЫ К ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ И ГИС-КАРТОГРАФИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ГЕОСИСТЕМ. ЧАСТЬ IV. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ НАЗЕМНЫХ И ВОДНЫХ ГЕОСИСТЕМ***

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Российская Федерация, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

Настоящая публикация является четвертой в серии с данным названием. Рассматриваются вопросы построения моделей-классификаций неаддитивных свойств геосистем (экологическое благополучие, «здоровье экосистемы»). Приводятся примеры моделей-классификаций интегральной оценки экологического благополучия водных объектов, наземных экосистем. Авторы предлагают модели-классификации для построения интегрального показателя экологического благополучия на основе метода сводных показателей, принципов АСПИД-методологии (анализ и синтез показателей при информационном дефиците). Библиогр. 27 назв. Ил. 1. Табл. 4.

Ключевые слова: экосистема, геосистема, эмерджентные свойства, экологическое благополучие, интегральная оценка, модели-классификации.

V. V. Dmitriev¹, I. V. Fedorova¹, A. S. Birykova²

APPROACHES TO ASSESSMENT AND GIS MAPPING OF SUSTAINABILITY AND ENVIRONMENTAL WELL-BEING OF GEOSYSTEMS. PART IV. INTEGRATED ASSESSMENT OF ECOLOGICAL WELL-BEING OF TERRESTRIAL AND AQUATIC ECOSYSTEMS

¹ Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Russian State Hydrometeorological University, 98, Malookhtinsky pr., St. Petersburg, 195196, Russian Federation

This publication is the fourth in a series with this title. It addresses issues of building classifications of models of non-additive properties of geosystems (environmental well-being, “ecosystem health”).

* Сотрудниками НИЛ «Моделирование и диагностика геосистем» факультета географии и геоэкологии СПбГУ в «Вестнике СПбГУ» в 1996–2000 гг. была опубликована серия работ под общим названием «Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей». Методы оценки эмерджентных свойств геосистем, разработанные нами за прошедшие годы, использованы в научных проектах, диссертационных работах, учебных пособиях и учебных курсах. В данной серии публикаций нами обобщен практический опыт этих работ.

Исследования выполнялись при поддержке грантов РФФИ 14-05-00787-а; 16-05-00715-а.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

Examples of classification models of integrated assessment of ecological well-being of the water bodies, terrestrial ecosystems, are given. The authors propose a model-based classification of construction of the integral index of ecological well-being based on the method of summary indicators and the principles of ASPID methodology (analysis and synthesis of information indices under conditions of informational scarcity). Refs 27. Fig 1. Tables 4.

Keywords: geosystem, integrated assessment, non-additive properties, sustainability, models classifications.

Введение

В предыдущих публикациях [1, 2, 11–16, 21] нами были показаны необходимость и возможность решения задач об *интегральной оценке* состояния сложных систем в природе и обществе и их неаддитивных (эмерджентных) свойств в современных геоэкологических и социоэкологических исследованиях. Здесь ограничимся описанием геоэкологических исследований. Главное внимание в исследованиях обращается на геоэкологическую оценку территории или окружающей человека природной и антропогенно-трансформированной среды. В то же время сам термин «геоэкологическая оценка» до сих пор не имеет четкого определения и не конкретизировано его отличие от терминов «экологическая оценка» или «эколого-географическая оценка».

Основным содержанием наших исследований является анализ элементов режимов, в основу которого положены простые параметры и единичные оценки (прямые и косвенные) сложных систем, характеризующие физико-географические условия, химический и биологический состав, биомассу, мортмассу, численность, покрытие, фиксацию и трансформацию энергии, круговорот вещества и др. или комплексные (балльные) оценки состояния геосистем. В исследованиях все еще редко встречаются оценки интегративных свойств геосистем, таких как устойчивость, благополучие, напряженность, целостность, степень антропогенной трансформации и др.

Под *экологической оценкой* нами понималось параметрическое определение состояния природной среды, обеспечивающего существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний, в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. Для оценки *экологического состояния* была предложена следующая стратегия. Вначале строился интегральный показатель состояния системы на основе репрезентативных параметров, характеризующих абиотические условия среды и физико-химические свойства исследуемой природной системы. Затем строился сводный показатель состояния компонентов биоты для тех же классов на основе биологических параметров. Экологическая оценка сводится к сопоставлению первого и второго интегральных показателей. Если оба интегральных показателя указывают на один и тот же класс состояния (качества, трофности, устойчивости, благополучия, напряженности и др.), то можно определить класс и сделать вывод о соответствии состояния среды состоянию биоты. Если же состояние среды позволяет отнести систему, например, к III классу качества, а состояние биоты — ко II, то можно определить тенденцию в изменении биоты в ближайшей перспективе. Если же состояние среды характеризуется II классом, а биоты — III, то можно предположить, что биота не является автохтонной, а, скорее всего, привнесена в систему извне [5, 10, 26].

Ю. П. Селиверстов (1994) ввел в науки о Земле понятие *эколого-географической оценки*, под которой автор понимал параметрическое определение состояния природной среды, обеспечивающего существование конкретных сообществ живых организмов, характерных для этих состояний и обусловленных природными условиями, в той или иной степени изменяющихся под воздействием антропогенных факторов. Такая оценка, по мнению автора, носит фоновый характер и может отвечать на вопросы о степени соответствия существующей биоты и наблюдающейся природной среды. Автор подчеркивал, что оценка не обязательно должна носить количественный характер, а может быть балльной (качественной, комплексной) или стоимостной [10].

Эколого-географическая оценка, оценка состояния ПТК или геосистем должна быть комплексной (системной) и ориентироваться на значимость природных географических компонентов с позиций природопользования для человека (общества). Основным ее содержанием является покомпонентное или комплексное физико-географическое районирование земной поверхности или свойств геосистем различного уровня иерархии, зонирование территорий и акваторий по результатам многокритериального и интегрального оценивания состояния геосистем на основе ГИС, выявление условий и пределов использования, охраны и улучшения природной среды.

В работе «Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля» дается следующее определение *геоэкологической оценки* — это современные методы и методики геоэкологического картирования, моделирования, геоинформационные системы и технологии, базы данных [цит. по: 23]. Перечисленные авторами методы, несомненно, необходимы для проведения геоэкологической оценки, но не тождественны ей и не заменяют ее.

Нами было предложено следующее определение. *Геоэкологическая оценка* — это параметрическое определение состояния антропогенно-трансформированных геосистем, обеспечивающего существование конкретных сообществ живых организмов и человека (общества), с целью выделения антропогенной составляющей и последствий этих изменений на фоне природных процессов. В такую оценку нами включались: геоэкологическая регламентация и геоэкологическое нормирование. *Геоэкологическая регламентация* — первый этап оценочных исследований, содержит анализ параметров состояния антропогенно-трансформированной геосистемы, определение интервалов изменений элементов ее режимов (естественного и антропогенного), выявление пороговых и критических величин этих параметров. *Геоэкологическое нормирование* есть нормирование любого антропогенного воздействия на геосистему, при котором можно оценить реакцию геосистемы в целом или какого-либо ее «критического звена» на это воздействие. Под критическим звеном понималась наиболее уязвимая подсистема. Это означало, что допустимая нагрузка на эту подсистему принималась в качестве допустимой нагрузки для геосистемы в целом [9, 10].

По определению А. Г. Осипова (2016), *геоэкологическая оценка* представляет собой пространственный многопараметрический анализ *природно-ресурсного потенциала* естественных и антропогенно-измененных ландшафтов с целью определения их возможности устойчиво выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсо-

спроизводства). Под *природно-ресурсным потенциалом ландшафта* автор понимает способность естественных и антропогенно-измененных ландшафтов устойчиво выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовспроизводства) [22]. Можно согласиться с определением автора, с оговоркой, что геоэкологическая оценка выполняется для любых систем (а не только устойчиво функционирующих), и что оценка может выполняться как с позиций антропоцентризма (для человека, общества), так и с позиций био-, эко- и геоцентризма или совмещения подходов.

Экологическое благополучие водных объектов

В научной литературе уже более 30 лет обсуждаются подходы к оценке экологического благополучия (ЭБ) сложных систем в природе и обществе [25]. Вводятся термины «здоровье экосистемы», «биологическая целостность», «экологическая целостность», «экологическое качество среды», «экологический паспорт территории (реки, объекта и др.)», «экологическое благополучие территории (акватории)». В РФ существует ГОСТ-определение экологического благополучия. Вряд ли его можно признать удачным. Согласно ГОСТ 17.1.1.01–77 *экологическое благополучие* водного объекта — нормальное воспроизведение основных звеньев экологической системы водного объекта. К основным звеньям отнесены пелагические и придонные ракообразные и рыбы.

В [14, 17, 23] нами отмечалось, что в современных зарубежных исследованиях ключевыми понятиями являются биологическая оценка (Biological Assessment) и биологическая целостность (Biological Integrity). Биологическая целостность на западе часто рассматривается как ключ к определению здоровья экосистемы, а «здоровье экосистемы», Haskell et al. (1991); Meyer (1997); Chessman (2002) [цит. по: 24] в основном связывают с ее устойчивостью, и если устойчивость нарушена, то такая экосистема, по мнению исследователей, теряет свой исходный (здоровый) статус. В противовес этому нами было рекомендовано применение аксиологического подхода и 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 считаться благополучной [10, 23, 26]. Обобщение и анализ подходов к выделению нормальной (понимаемой как хорошая, оптимальная) экосистемы позволили определить «хорошую» экосистему как экосистему с максимальной и разнообразной продукцией (удовлетворяющей экономические и эстетические потребности человека), существующую неограниченно долго в изменяющейся среде [3].

Необходимым условием для построения моделей экологического благополучия является введение признаков и классов ЭБ. Признаки «хороших» (для человека) водных систем и их изменение по классам благополучия составляют основу классификации экологического благополучия водного объекта. Наш опыт показывает, что при ее создании необходимо использовать совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов, учитывать принципы нормирования Н. С. Строганова: приоритетность в использовании водоемов, достаточность самоочищения, обеспеченность условий жизни для промысловых объектов, пригодность воды для питьевых целей.

Признаками благополучной водной экосистемы предлагаем считать: максимальное видовое разнообразие биоты; высокое качество воды; высокую устойчивость к изменению параметров режимов; низкую скорость загрязнения, закисления, эвтрофикации; высокую скорость самоочищения [10, 19].

Обобщение и анализ перечисленных признаков должны проводиться с учетом перспектив использования водной экосистемы человеком. Это обуславливает внесение необходимых для свертки информации приоритетов исходных критериев. Полученный результат оценки в этом случае может иметь не только региональную и временную привязки, но и зависеть от вида ее использования. Таким образом, одна и та же экосистема, в зависимости от планирования ее использования человеком для своих нужд может быть названа благополучной в большей или меньшей степени.

Материалы, методы, результаты

Интегральная оценка экологического благополучия (ЭБ) озера. В работах по обоснованию критериев ЭБ признаками благополучной водной экосистемы предлагалось считать: оптимальную продукцию ресурсного (слабого) звена; оптимальную биомассу ресурсного (слабого) звена; максимальное видовое разнообразие биоты; высокое качество воды; высокую устойчивость к изменению параметров естественного и антропогенного режимов; низкую скорость загрязнения, закисления, эвтрофирования; высокую скорость самоочищения; способность сохранять вышеназванные признаки реально неограниченное время [10, 19].

Состояние природной или антропогенно-трансформированной системы всегда можно описать *вектором* (или *кортежем*, если учитываются также величины, не имеющие численных значений) состояния системы. Такой вектор мы предлагаем называть «*портретом природной системы*» [6–8, 10].

Основу разработанных моделей-классификаций ЭБ составляют признаки «хорошей» (для человека и организмов-гидробионтов) водной экосистемы и их изменение по 5 классам благополучия. При создании моделей используется совмещение антропоцентрического и биоцентрического подходов. Интегральная оценка ЭБ выполнялась на основе метода сводных показателей (МСП) или метода рандомизированных сводных показателей (МРСП) [27]. В соответствии с этим реализуются следующие основные этапы, подробно описанные в наших публикациях [1, 2, 11–16, 21]:

- 1) выбрать необходимые и достаточные параметры, описывающие исследуемое свойство или состояние изучаемой системы;
- 2) ввести уровни, классы и группы для свертки показателей в исходной модели-классификации;
- 3) найти для исходных параметров соответствующие классам градации или оценочные шкалы;
- 4) выбрать правило нормирования (с учетом или без учета нелинейности связей и учетом вида связей: «прямая» или «обратная») и нормировать исходные параметры созданной модели-классификации;
- 5) решить проблему выбора весов (приоритетов оценивания);
- 6) выбрать синтезирующую функцию (вид обобщенного интегрального показателя);

- 7) выполнить первый уровень обобщения информации;
- 8) выполнить последующие уровни обобщения информации;
- 9) для мониторинговой информации, собранной в полевых условиях для тех же параметров оценивания, выполнить первый уровень обобщения информации по правилам построения исходной модели-классификации;
- 10) выполнить последующие уровни обобщения информации для получения сводных показателей благополучия.

Рассмотрим методические особенности оценки ЭБ. В табл. 1 приведены сведения о критериях и способах задания параметров модели для оценки ЭБ оз. Суури (малое озеро в северо-западном Приладожье). В основу количественного интегрального оценивания экологического благополучия на основе МСП положена модель-классификация ЭБ для двух уровней свертки показателей. На первом уровне реализовано построение интегральных показателей трофности (ИПТ), качества воды (ИПК), устойчивости (ИПУ) при неравновесном значении исходных параметров. Выполненные три варианта расчета интегральных показателей экологи-

Таблица 1. Параметры модели интегральной оценки ЭБ оз. Суури [18]

Критерии	Параметры
1. Трофический статус водоема	Оценивается по величине интегрального показателя трофности ИПТ для 5 классов трофности (О — олиготрофия, М — мезотрофия, Э — эвтрофия, П — политрофия, Г — гиперэвтрофия) по 4 критериям: валовая первичная продукция фитопланктона, мг С/л сут; прозрачность воды, м; отношение прозрачности к глубине (по шкале Китаева (1973) при средней глубины озера 3 м); рН воды в летнее время
2. Качество воды (интегральный показатель качества)	Оценивается по величине интегрального показателя качества воды ИПКВ для 5 классов качества по 6 критериям: прозрачность воды (была взята из модели-классификации оценки трофности); удельная электропроводность воды (мк См/см), азот NH ₄ (мг N/л), кислород в % насыщения, гидробиологический индекс BMWP, фосфор PO ₄ (мг P/л)
3. Видовое разнообразие по индексу Шеннона (H)	Оценивается по авторской шкале. В процессе построения шкалы было принято, что максимум индекса Шеннона (H) равен 5,0 и наблюдается в олиготрофных условиях. По мере увеличения трофности значения H равномерно снижались до 0. Принималось, что I-му классу ЭБ соответствует значение индекса 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	Оценивается по балльно-индексной шкале, которая нормированием переводилась в ИПУ. ИПУ рассчитывался для трех сценариев У1, У2п и У2д, в которых оценивалась устойчивость к изменению параметров естественного режима и антропогенного эвтрофирования (У1), а также естественного режима и качества воды для верхних (У2п) и придонных горизонтов (У2д)
5. Степень закисления по рН	Оценивается по шкале рН с учетом закисления воды
6. Скорость самоочищения	Оценивается по времени осветления воды зоопланктоном в сутках
Сводный показатель экологического благополучия	Оценивается в предположении равенства весов при свертке или неравенства весов (приоритетов) для второго уровня свертки

ческого благополучия (ИПЭБ) различаются оценкой параметров устойчивости. В первом случае (ЭБ-У1) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и к антропогенному эвтрофированию. Во втором варианте (ЭБ-У2п) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и качества воды в подповерхностном слое водоема. В третьем варианте (ЭБ-У2д) рассматривается устойчивость к изменению параметров естественного режима и качества воды для придонного слоя. Все варианты ориентированы на пять классов оценки устойчивости. На 2-м уровне свертки рассчитывались ИПЭБ на основе интегральных показателей первого уровня при равенстве или неравенстве приоритетов (весовых коэффициентов).

В табл. 2 приведены шкалы интегрального показателя ЭБ первого и второго уровней свертки, рассчитанные с учетом неравномерности задания приоритетов оцениваемых параметров.

Таблица 2. Оценочные шкалы первого и второго уровней свертки показателей

Признаки	Степень экологического благополучия (классы благополучия)				
	Высокая (I)	Выше средней (II)	Средняя (III)	Ниже средней (IV)	Низкая (V)
1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности)	0–0,135	0,135–0,343	0,343–0,622	0,622–0,815	0,815–1,000
2. Качество воды (интегральный показатель качества)	0–0,114	0,114–0,379	0,379–0,524	0,524–0,673	0,673–1,000
3. Максимум видового разнообразия по индексу Шеннона	0–0,200	0,200–0,400	0,400–0,600	0,600–0,800	0,800–1,000
4. Устойчивость (баллы устойчивости по индексно-балльной шкале) к изменению естественного режима и эвтрофированию (или загрязнению)	0–0,188	0,250–0,344	0,406–0,563	0,625–0,719	0,781–1,000
5. Степень закисления по рН	0–0,500	0,500–0,625	0,625–0,750	0,750–0,875	0,875–1,000
6. Скорость самоочищения (по времени осветления воды зоопланктоном в сутках)	0–0,020	0,020–0,082	0,082–0,184	0,184–0,490	0,490–1,000
Сводный показатель экологического благополучия	0–0,193	0,203–0,362	0,373–0,541	0,551–0,729	0,740–1,000

Результаты интегральной оценки ЭБ для оз. Суури по материалам наблюдений 2010–2013 гг. приведены в табл. 3.

По результатам расчетов ИПЭБ по варианту модели ЭБ-У1 (устойчивость к изменению естественного режима и антропогенному эвтрофированию) значения ИПЭБ для оз. Суури 2010–2013 гг. попадают ближе к правой границе II класса ЭБ (ЭБ «выше среднего»). По варианту модели ЭБ-У2п (устойчивость к изменению естественного режима и к изменению качества воды для поверхности) в 2010–

2011 г. значения интегрального показателя ЭБ также попадают ближе к правой границе II класса ЭБ. В 2012 и 2013 г. значения интегрального показателя попадают в левую границу III класса. По последнему варианту модели ЭБ-У2д значения интегрального показателя ЭБ 2010–2013 г. также попадают в правую границу II класса ЭБ. Только значение ИПЭБ за 2012 г. находится на границе с III классом [17, 18].

Таблица 3. Результаты интегральной оценки ЭБ оз. Суури (первый и второй уровни свертки показателей)

Признак	Год			
	2010	2011	2012	2013
1. Трофический статус водной экосистемы (интегральный показатель трофности)	0,302 (Мезотрофия, П)	0,263 (Мезотрофия, С)	0,315 (Мезотрофия, П)	0,296 (Мезотрофия, П)
2. Качество воды (интегральный показатель качества)	0,207 (II класс, С)	0,235 (II класс, С)	0,285 (II класс, П)	0,229 (II класс, С)
3. Видовое разнообразие по индексу Шеннона	0,292 (II класс, С)	0,540 (III класс, П)	0,585 (III класс, П)	0,628 (IV класс, Л)
4. Устойчивость по У1	0,563 (III–IV класс, граница)	0,563 (III–IV класс, граница)	0,656 (IV класс, С)	0,625 (IV класс, Л)
5. Степень закисления по рН	0,463 (I класс, П)	0,405 (I класс, П)	0,470 (I класс, П)	0,325 (I класс, С)
6. Скорость самоочищения (по времени осветления воды зоопланктоном в сутках)	0,265 (IV класс, Л)	0,069 (II класс, П)	0,124 (III класс, С)	0,016 (I класс, П)
Сводный показатель экологического благополучия	0,348 (II класс, П)	0,346 (II класс, П)	0,406 (III класс, Л)	0,353 (II класс, П)

Примечание. Индекс справа от номера класса, обозначенного римской цифрой, означает: С — ближе к середине класса, П — ближе к правой границе класса, Л — ближе к левой границе класса.

Во второй серии моделей ЭБ [20] в качестве критериев оценивания были выбраны девять признаков (модель 1): качество воды по индексу загрязнения воды (ИЗВ); качество воды по гидробиологическим показателям (индексу сапробности); качество воды по органолептическим свойствам (по интенсивности запаха в баллах); замусоренность акватории (баллы); степень закисления водоема по рН; видовое разнообразие (по индексу Шеннона); трофический статус в баллах (по содержанию хлорофилла «а», прозрачности водоема и отношению биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона); скорость самоочищения водоема (по времени осветления воды зоопланктоном); устойчивость водоема к загрязнению и эвтрофированию (по индексно-балльной шкале, баллы).

В модели 2 в качестве критериев оценивания были выбраны семь признаков: качество воды по ИЗВ; качество воды по гидробиологическим показателям (по индексу сапробности); степень закисления водоема (по рН); биоразнообразие (по индексу Шеннона Н); трофический статус (балльная оценка); скорость самоочищения (по времени осветления воды зоопланктоном); устойчивость (по индексно-балльной шкале).

В качестве ключевого водоема было выбрано озеро на Кольском полуострове (Умбозеро). Интегральная оценка на моделях выполнялась по натурным данным 1995 и 2007 гг. На первом уровне свертки показателей Умбозеро в 1995 г. по модели 2 характеризуется как «слабо загрязненное» по ИЗВ; олигосапробное по индексу сапробности; мезоацидное по рН; среднеразнообразное по видовому составу; по трофическому статусу — переходное состояние от олиго-мезотрофии к мезотрофии; скорость самоочищения — высокая; водоем средне устойчив к загрязнению и эвтрофированию. На втором уровне свертки по шкале сводного показателя ЭБ водоем попадет во II класс ЭБ, что свидетельствует о благополучном состоянии его водной экосистемы — экологическое благополучие «выше среднего».

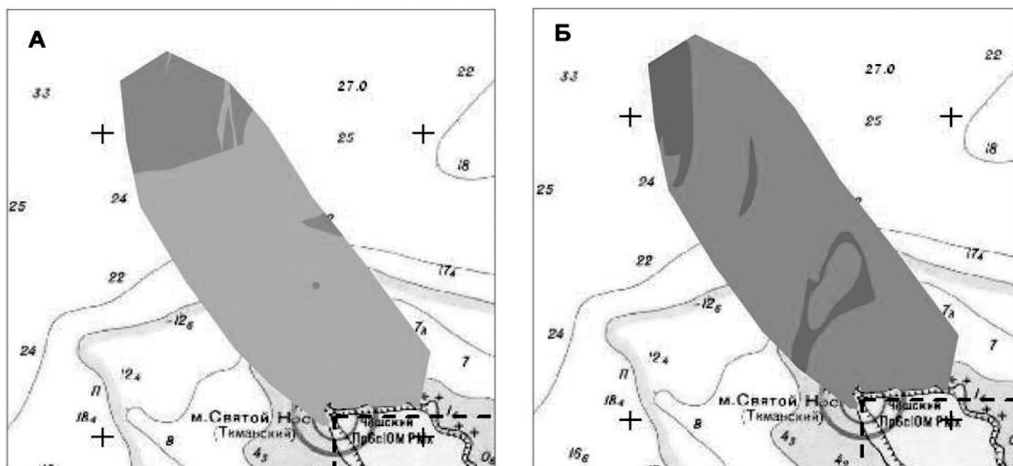
В 2007 г. по этой же модели озеро характеризуется как «слабо загрязненное» по ИЗВ; β -*m*-сапробное по индексу сапробности; олигоацидное по рН; разнообразие по видовому составу — «ниже среднего»; переходное состояние от мезотрофии к мезо-эвтрофии по трофическому статусу; скорость самоочищения высокая; водоем среднеустойчив к загрязнению и эвтрофированию. По шкале сводного показателя водоем попадет в III класс ЭБ, что свидетельствует об ухудшении состояния водной экосистемы — экологическое благополучие оценивается «средним» классом.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что за 12 лет степень экологического благополучия оз. Умбозеро снизилась на один класс. Это означает, что требуется разработка мер по предотвращению ухудшения его состояния.

Интегральная оценка ЭБ морской акватории. В другой модели-классификации интегральной оценки ЭБ [4] нами учитывались: биомасса бентоса, г/м²; видовое разнообразие бентоса по индексу Шеннона (H); степень экологического стресса испытываемого бентосом по индексу (D_E); качество воды по ИЗВ; загрязнение донных отложений по Z_c; степень геоморфологического риска (балльная оценка). Оценка ЭБ выполнялась для ключевого района Баренцева моря на участке проектирования нефтеналивного терминала в районе мыса Святой Нос (Восточный) для двух вариантов приоритетов (весов): А — равенство приоритетов и Б — неравенство приоритетов: $w_2 \geq w_1 = w_3 \geq w_5 > w_4 = w_6$. Результаты оценки ЭБ и зонирования акватории приведены на рисунке.

Интегральная оценка ЭБ системы «водоток—водосбор». По-видимому, одной из первых попыток создания «экологического паспорта реки» была попытка Т. Ватанабэ (1986) [цит. по: 25], предложившего оценивать загрязнение реки по диатомовому сообществу на основе разработанного им индекса DA_{Ipo}. Для оценки состояния (качества) водной экосистемы автором была разработана 100-балльная шкала для экологического паспорта реки, который рассчитывался на основе деления значения площади, расположенной между осью ординат (длиной реки), и значениями индекса DA_{Ipo}, полученными для разных створов по течению реки, на длину реки. Поскольку индекс DA_{Ipo} в России не «прижился» из-за отсутствия требуемых видов-индикаторов диатомового фитопланктона, в 1992 г. авторским коллективом Института охраны природы и заповедного дела [25] было предложено заменить в построениях экологического паспорта реки индекс DA_{Ipo} на индекс сапробности. Авторы утверждали, что по значению этого индекса можно сравнивать между собой экологическое состояние разных рек (а фактически качество их воды).

Разработка моделей интегрального оценивания ЭБ реки в нашем понимании предполагает учет состояния ее водосборной территории. При этом размеры реки



Оценочная шкала
индекс экологического благополучия

■	0,93–1,00	«высокое»
■	0,70–0,93	«выше среднего»
■	0,48–0,70	«среднее»
■	0,26–0,48	«ниже среднего»
■	0,00–0,26	«низкое»

Результаты зонирования акватории района Баренцева моря по величине ИПЭБ акватории [4]

и водосбора имеют важное значение для количественной оценки ЭБ и определяют методику оценивания. Мы рассмотрели первую модель-классификацию интегральной оценки ЭБ (для малой реки). Все параметры оценивания (72) на первом этапе были разбиты на следующие группы: 1 — продуктивность (продукционный потенциал водотока); 2 — качество и токсическое загрязнение по химическому составу воды и органолептическим критериям; 3 — качество воды по гидробиологическим критериям; 4 — устойчивость водотока к изменению физико-географических, климатических, гидрологических параметров и изменению качества воды в реке; 5 — социально-экономические факторы ЭБ реки и водосбора. В состав групп вошли следующие характеристики. По группе 1: взвешенные вещества, мг/л; прозрачность, м; цветность по Pt-Co шкале, град. цв.; Нобщ, мгN/л; Робщ, мгP/л; O₂, % насыщения; валовая продукция фитопланктона, гС/м²; чистая продукция фитопланктона, гС/м²; индекс трофности. По группе 2: качество и токсическое загрязнение воды по химическому составу воды и органолептическим критериям: запах, баллы; вкус, баллы; содержание токсических веществ 1-го класса опасности (по бенз(а)перену, мг/л); содержание токсических веществ 2-го класса опасности (по кадмию); содержание токсических веществ 3-го класса опасности (по никелю); рН; жесткость, ммоль/литр; ИЗВ; растворенный в воде кислород, % нас.; БПК₅, мгО/л; окисляемость, мгО/л; аммонийный азот, мгN-NH₄/л; концентрация Cl, мкг/л; концентрация нефти и нефтепродуктов, в долях ПДК; СПАВ, в долях ПДК; фенолы, в долях ПДК; ртуть, в долях ПДК; медь, в долях ПДК; тяжелые металлы в донных отложениях, мкг/кг; хлорорганические пестициды в беспозвоночных, по отношению содержания в организмах к содержанию в воде; хлорорганические пестициды

в рыбах фитофагах, по отношению содержания в организмах к содержанию в воде; хлорорганические пестициды в хищных рыбах, по отношению содержания в организмах к содержанию в воде; хлорорганические пестициды в рыбоядных птицах, по отношению содержания в организмах к содержанию в воде. По группе 3: индекс сапробности по Пантле и Букку (в модификации Сладечека); отношение числа олигохет к общему числу донных организмов, %; биотический индекс Вудивисса, баллы; общее количество бактерий, млн кл. в мл; количество сапрофитных бактерий; отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий; кишечная палочка, титр; яйца гельминтов в 1 см³; биологический показатель загрязненности; возбудители кишечной инфекции; общее число колиформных бактерий, КОЕ в 100 мл; термотолерантные колиформные бактерии, КОЕ в 100 мл; колифаги КОЕ в 100 мл; индекс сапротоксности Яковлева; олигохетный индекс, %; хиромидный индекс Балушкиной; биотестирование на дафниях, гибель тест-культур, баллы; индекс Шеннона; тип биоценоза, баллы.

По группе 4: устойчивость водотоков к изменению физико-географических, климатических, гидрологических параметров, баллы; балльная оценка устойчивости водотоков к изменению качества среды (род устойчивости по качеству воды), баллы.

По группе 5: тип угодий, баллы; коэффициент фильтрации грунтов, м/сут; уклон земной поверхности, град; густота речной сети, км/км²; электропроводность воды, мкСм/см; длина реки, км; площадь водосбора, км²; внутригодовой сток, м³/с; частота опасных гидрологических явлений (ОГЯ), баллы; наличие опасных ледовых явлений (заторы, зажоры), баллы; наличие наводнений, баллы; численность населения, чел. на 1 км²; сельскохозяйственное использование территории водосбора, баллы; промышленное использование территории водосбора, баллы; развитие речного водного транспорта, баллы; расселение коренных народов, баллы; охраняемый статус, баллы; наличие ценных видов рыб, баллы; экологический потенциал ландшафта по индексу биологической эффективности климата по Н. Н. Иванову.

В табл. 4 приведены оценочные шкалы первого и второго уровня свертки показателей. Для второго уровня получены две шкалы сводного показателя (для условия равновесности критериев и неравновесного задания приоритетов). Пробные расчеты на модели, выполненные для водосбора и малой реки в Северо-Западном регионе РФ, позволили отнести систему «водоток—водосбор» к II классу ЭБ. Изменение приоритетов оценивания не изменило класса ЭБ.

Интегральная оценка ЭБ наземных геосистем. Для оценки ЭБ наземных геосистем были выбраны следующие параметры оценивания: 1 — закисление почв по рН; 2 — содержание гумуса в почве %; 3 — индекс загрязнения атмосферы; 4 — индекс загрязнения почвы; 5 — продуктивность (урожайность); 6 — устойчивость доминирующих фаций; 7 — биологическое разнообразие растительности (по индексу Шеннона). По расчетам интегрального показателя экологического благополучия наземной геосистемы, ключевой район в Ленинградской области в 1996 г. был отнесен к III классу ЭБ, степень благополучия — «средняя». В 2010 г. степень благополучия этой территории характеризовалась классом «выше среднего» — II класс ЭБ. Полученный результат свидетельствовал о том, что за 14 лет степень экологического благополучия геосистемы возросла. Это объяснялось улучшением качества атмосферного воздуха (уменьшение индекса загрязнения атмосферы) в связи

Таблица 4. Оценочные шкалы для интегральной оценки ЭБ системы «водоток—водосбор»

Интегральные показатели первого и второго уровней свертки	Высокое (I)		Выше среднего (II)		Среднее (III)		Ниже среднего (IV)		Низкое (V)	
	Олиготрофные		Мезотрофные		Эвтрофные		Политрофные		Гиперэвтрофные	
	Устойчивые		Устойчивые выше среднего		Среднеустойчивые		Устойчивые ниже среднего		Неустойчивые	
ИП 1. Продуктивность (продукционный потенциал)	0,000	0,231	0,238	0,366	0,371	0,536	0,540	0,797	0,798	1,000
	0,000	0,151	0,154	0,254	0,255	0,435	0,437	0,634	0,644	1,000
ИП 2. Качество и токсическое загрязнение воды по химическому составу и органолептическим критериям	0,000	0,222	0,229	0,411	0,420	0,576	0,577	0,770	0,782	1,000
	0,000	0,500	0,500	0,714	0,714	0,857	0,857	1,000	1,000	1,000
ИП 3. Качество воды по гидробиологическим критериям	0,000	0,199	0,224	0,408	0,415	0,616	0,623	0,829	0,836	1,000
	0,000	0,261	0,269	0,431	0,435	0,604	0,607	0,806	0,812	1,000
ИП 4. Устойчивость водотока к изменению физико-географических, климатических, гидрологических параметров и изменению качества воды в реке	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997
	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997
ИП 5. Социально-экономические факторы ЭБ реки и водосбора	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997
	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997
Сводные показатели ЭБ для вариантов с разными приоритетами: w2=w3>w1=w4=w5 w2=w3>w1=w4=w5	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997
	0,000	0,223	0,229	0,380	0,385	0,553	0,555	0,751	0,760	0,997

со снижением объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и другими причинами.

По расчетам интегрального показателя ЭБ для ключевого района исследования в Новгородской области, в 1996 г. территория была отнесена к IV классу ЭБ, степень благополучия ниже среднего. Для 2010 г. интегральные показатели характеризовали степень ЭБ как среднюю — III класс. Полученный результат также свидетельствует об увеличении степени экологического благополучия ключевого района в Новгородской области.

По расчетам интегрального показателя экологического благополучия ключевой район исследования в Псковской области в 1996 и в 2010 гг. относился к III классу, степень благополучия — средняя. Интегральный показатель благополучия за 1996 г. находился ближе к правой границе III класса, а за 2010 г. — ближе к левой границе класса [20].

В заключение отметим перспективность использования рассмотренного подхода для оценки интегративных свойств геосистем. Преимущества рассмотренных моделей-классификаций заключаются в том, что исследователь, используя аксиологический подход и аксиометрию (экологическую квалиметрию), работает с натуральными оценочными шкалами репрезентативных критериев оценивания ЭБ, хотя может использовать для оценки и балльные шкалы; вводит классы ЭБ, формирует оценочные шкалы ЭБ, может вводить несколько уровней свертки показателей, задает или моделирует веса (приоритеты) оценивания внутри групп, уровней и между ними и может изменять их при необходимости; обосновывает вид интегрального показателя, решает проблему нормирования исходных данных с учетом вида связи (прямая, обратная) и ее нелинейности, учитывает количественную и качественную информацию о приоритетах оценивания.

Использование моделей возможно на основе МСП или МРСР (АСПИД-методологии) в среде ГИС. Это позволяет выполнять районирование или зонирование территорий (акваторий) по значениям интегральных показателей ЭБ; проследить временную динамику и пространственные различия интегральных показателей, делать вывод о способности системы сохранять или менять класс благополучия во времени. Опыт исследований показывает, что гибкость модельных алгоритмов позволяет эффективно организовывать иерархическую систему многоуровневого оценивания благополучия геосистем при наличии неопределенности на каждом уровне иерархии, а картирование интегральных показателей приводит к созданию серии синтетических карт экологического благополучия геосистем.

Литература

1. Александрова Л. В., Васильев В. Ю., Дмитриев В. В., Мякишева Н. В., Огурцов А. Н., Терехина Н. В., Третьяков В. Ю., Уфимцева М. Д. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. V. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2000. Вып. 4, № 31. С. 34–47.
2. Алимов А. Ф., Дмитриев В. В., Чистобаев А. И. и др. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / под ред. А. К. Фролова. СПб.: СПбНЦ РАН, 1999. 253 с.
3. Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Изд. УИФ «Наука», 1994. 280 с.

4. Васильев В. Ю., Дмитриев В. В., Огуцов А. Н., Жиров А. И., Зеленков В. М., Мискевич И. В., Машкин Ю. Л. Геоинформационный анализ и зонирование акватории Баренцева моря по степени экологического благополучия на участке проектирования нефтеналивного терминала в районе мыса Святой нос (Восточный) // ИнтерКарто/Интер ГИС 15: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: материалы Международной конференции, Пермь, Гент 29 июня — 5 июля 2009 г. С. 403–410.
5. Гальцова В. В., Дмитриев В. В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем. СПб.: Наука, 2007. 364 с.
6. Дмитриев В. В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. 2010. Т. 2, № 3. С. 507–520.
7. Дмитриев В. В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие. 2009. № 4 (12). С. 146–165.
8. Дмитриев В. В. Устойчивость природных объектов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов // Дмитриев В. В., Фруммин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем: учеб. пособие. СПб.: Наука, 2004. С. 241–278.
9. Дмитриев В. В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 1994. Вып. 2, № 14. С. 60–70.
10. Дмитриев В. В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2000. 419 с.
11. Дмитриев В. В., Мякишева Н. В., Третьяков В. Ю., Хованов Н. В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 1997. Вып. 1, № 23. С. 51–67.
12. Дмитриев В. В., Мякишева Н. В., Хованов Н. В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. I. Качество природных вод // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 1996. Вып. 3, № 21. С. 40–52.
13. Дмитриев В. В., Огуцов А. Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2013. Вып. 3. С. 88–103.
14. Дмитриев В. В., Огуцов А. Н. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014. Вып. 4. С. 114–129.
15. Дмитриев В. В., Огуцов А. Н. Подходы к оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2012. Вып. 3. С. 65–78.
16. Дмитриев В. В., Огуцов А. Н., Васильев В. Ю., Третьяков В. Ю. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. IV. Токсическое загрязнение воды и грунтов // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 1999. Вып. 1. С. 40–53.
17. Дмитриев В. В. Интегральная оценка экологического благополучия геосистем // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право: сб. тр. Международной научно-практической конференции «Инфого 2013» / под ред. Е. П. Истомина, В. Е. Марлей, И. П. Скобелевой, И. А. Соболев. Вып. 2 (11). СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2013. С. 36–39.
18. Дмитриев В. В. Современное экологическое состояние водных объектов карельского Приладожья и его сравнение с ретроспективными данными // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 33. С. 102–118.
19. Дмитриев В. В., Алексеева О. Н., Примак Е. А., Скрыгина В. К. Оценка устойчивости и экологического благополучия наземных и водных геосистем // Материалы международной конференции, посвященной 165-летию создания Русского географического общества и 85-летию организации географического факультета в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете / под общ. ред. Т. А. Алиева, В. В. Дмитриева, Н. В. Каледина, К. В. Чистякова. СПб.: ВВМ, 2011. С. 165–171.
20. Дмитриев В. В., Огуцов А. Н., Васильев В. Ю., Примак Е. А., Лобачева Ю. В., Скрыгина В. К. Оценка эмерджентных свойств сложных систем в природе и обществе на основе моделей инте-

грального оценивания // Сборник трудов VI международной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон, ЭКОГИДРОМЕТ-2012». 2–4 июля 2012 г. / под ред. Л. Н. Карлина, В. Н. Воробьева, В. А. Шелутко, В. В. Дмитриева. СПб.: Изд. РГГМУ, 2013. С. 25–34.

21. Огурцов А. Н., Хованов Н. В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. III. Оценка степени благоприятности природных условий макрорегионов Северо-Запада РФ для жизни людей // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 1997. Вып. 2. С. 55–62.

22. Осипов Г. К. Теория и практика оценки пригодности земель природных ландшафтов для аграрного и рекреационного освоения: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2016. С. 285.

23. Примак Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2009. 24 с.

24. Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Беларуская навука, 2010. 329 с.

25. Снакин В. В., Мельченко В. Е., Бутовский Р. О. и др. Оценка состояния и устойчивости геосистем. М.: ВНИИ природа, 1992. 127 с.

26. Федорова И. В. Современное состояние и устойчивость к воздействию внутренних водоемов Антарктиды: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003. 19 с.

27. Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.

Для цитирования: Дмитриев В. В., Федорова И. В., Бирюкова А. С. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем Часть IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016. Вып. 2. С. 37–53. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.204

References

1. Alexandrova L. W., Vasilyev V. Y., Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Ogurtsov A. N., Terekhina N. V., Tretyakov V. Y., Ufimtseva M. D. Mnogokriterial'naiia otsenka ekologicheskogo sostoiianiia i ustoichivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. V. Integral'naiia otsenka ekologicheskogo sostoiianiia i kachestva sredi urbanizirovannykh territorii [Multicriterion assessment of the environmental status and sustainability of geosystems based on the method aggregates. V. Integrated assessment of the environmental condition and quality of environment in urban areas]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geography*, 2000, issue 4, no. 31, pp. 34–47. (In Russian)

2. Alimov A. F., Dmitriev V. V., Chistobaev A. I. et al. *Mnogokriterial'naiia otsenka ekologicheskogo sostoiianiia i ustoichivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. V. Integral'naiia otsenka ekologicheskogo sostoiianiia i kachestva sredi urbanizirovannykh territorii* [The integrated assessment of the environmental condition and quality of environment in urban areas]. Ed. A. K. Frolova. St. Petersburg, SPbNTs Russian Academy of Sciences, 1999. 253 p. (In Russian)

3. Vorobeichik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G. *Ekologicheskoe normirovanie tekhnogennykh zagriaznenii nazemnykh ekosistem (lokal'nyi uroven')* [Environmental regulation of technogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level)]. Ekaterinburg, Publ. UIF "Science", 1994. 280 p. (In Russian)

4. Vasilyev V. Y., Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Zelenkov A. I., Miskevich V. M., Mashkin J. L. [Geoinformation analysis and zoning of the Barents Sea on the degree of environmental well-being in the area of designing an oil terminal in the vicinity of Cape St. nose (East)]. *InterKarto/Inter GIS 15: Ustoichivoe razvitie territorii: teoriia GIS i prakticheskii opyt: materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, Perm', Gent 29 iunია — 5 iulīa 2009 g.* [InterCarto / GIS Inter 15: Sustainable Development of Territories: GIS Theory and practical experience of the International Conference, Perm, Gent June 29 — July 5, 2009], pp. 403–410. (In Russian)

5. Galtsova V. V., Dmitriev V. V. *Praktikum po vodnoi ekologii i monitoringu sostoiianiia vodnykh ekosistem* [Workshop on Aquatic Ecology and monitoring of aquatic ecosystems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2007. 364 p. (In Russian)

6. Dmitriev V. V. Integral'nye otsenki sostoiianiia slozhnykh sistem v prirode i obshchestve [Integrated assessment of the state of complex systems in nature and society]. *Biosfera [Biosphere]*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 507–520. (In Russian)

7. Dmitriev V. V. Opredelenie integral'nogo pokazatelia sostoiianiia prirodnogo ob'ekta kak slozhnoi sistemy [Determination of the integral index of the natural state of the object as a complex system]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie [Society. Wednesday. Development]*, 2009, no. 4 (12), pp. 146–165. (In Russian)

8. Dmitriev V. V. [Stability of natural objects to change the parameters of natural and anthropogenic conditions]. Dmitriev V. V., Frumin G. T. *Ekologicheskoe normirovanie i ustoychivost' prirodnykh sistem: ucheb. posobie* [Environmental regulation and the stability of natural systems: Textbook]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004, pp. 241–278. (In Russian)
9. Dmitriev V. V. Ekologicheskoe normirovanie sostoianii i antropogennykh vozdeistvii na prirodnye ekosistemy [Environmental regulation of the status and human impacts on natural ecosystems]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 1994, issue 2, no. 14, pp. 60–70. (In Russian)
10. Dmitriev V. V. *Ekologo-geograficheskaya otsenka sostoianii vnutrennikh vodoemov*. Dokt. Diss. [Ecological and geographical assessment of inland waters. Disc. Dr. Geogr. Sciences]. St. Petersburg, 2000. 419 p. (In Russian)
11. Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Tretyakov V. Y., Hovanov N. V. Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoianii i ustoychivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. II. Troficheskii status vodnykh ekosistem [Multi-criteria assessment of the environmental status and sustainability of geosystems based on the method aggregates. II. The trophic status of aquatic ecosystems]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 1997, issue 1, no. 23, pp. 51–67. (In Russian)
12. Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Hovanov N. V. Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoianii i ustoychivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. I. Kachestvo prirodnykh vod [Multi-criteria assessment of the environmental status and sustainability of geosystems based on the method aggregates. I. Quality of natural waters]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 1996, issue 3, no. 21, pp. 40–52. (In Russian)
13. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. Podkhody k integral'noi otsenke i GIS-kartografirovaniu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchii geosistem. II. Metody integral'noi otsenki ustoychivosti nazemnykh i vodnykh geosistem [Approaches to integrated assessment and GIS mapping of sustainability and environmental well-being of geosystems. II. Integrated assessment methods for sustainable land and water geosystems]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2013, issue 3, pp. 88–103. (In Russian)
14. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. Podkhody k integral'noi otsenke i GIS-kartografirovaniu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchii geosistem. III. Integral'naya otsenka ustoychivosti pochvy i nazemnykh geosistem [Approaches to integrated assessment and GIS mapping of sustainability and environmental well-being of geosystems. III. Integral assessment of the stability of the soil and land geosystems]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2014, issue 4, pp. 114–129. (In Russian)
15. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. Podkhody k otsenke i GIS-kartografirovaniu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchii geosistem. I. Integral'naya otsenka ustoychivosti nazemnykh i vodnykh geosistem [Approaches to assessment and GIS mapping of sustainability and environmental well-being of geosystems. I. Integral assessment of the sustainability of terrestrial and aquatic geosystems]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2012, issue 3, pp. 65–78. (In Russian)
16. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Vasilyev V. Y., Tretyakov V. Y. Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoianii i ustoychivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. IV. Toksicheskoe zagryaznenie vody i gruntov [Multi-criteria assessment of the environmental status and sustainability of geosystems based on the method aggregates. IV. Toxic contamination of water and soil]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 1999, issue 1, pp. 40–53. (In Russian)
17. Dmitriev V. V. [Integral assessment of environmental well-being of geosystems]. *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo: sb. tr. Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Infogeo 2013"* [Information Technologies and Systems: management, economics, law: Coll. tr. International scientific-practical conference "Infogeo 2013"]. Eds. Istomin E. P., Marley V. E., Skobeleva I. P., Sobol I. A. Issue 2 (11). St. Petersburg, LLC "Andrew's Publishing House", 2013, pp. 36–39. (In Russian)
18. Dmitriev V. V. [Modern ecological state of water bodies Karelian Ladoga region and its comparison with historical data]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific theory journal Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University], 2014, no. 33, pp. 102–118. (In Russian)
19. Dmitriev V. V., Alekseeva O. N., Primak E. A., Skrygina V. K. [Evaluation of sustainability and environmental well-being of terrestrial and aquatic geosystems]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii, posviashchennoi 165-letiiu sozdaniia Russkogo geograficheskogo obshchestva i 85-letiiu organizatsii geograficheskogo fakul'teta v Sankt-Peterburgskom (Leningradskom) gosudarstvennom universitete* [Proceedings of the international conference dedicated to the 165th anniversary of the Russian Geographical Society and the 85th anniversary of the organization of the Faculty of geography at St. Petersburg (Leningrad) state University]. Eds. T. A. Aliyev, V. Dmitriev, N. V. Kaledin, K. V. Chistyakov. St. Petersburg, DBM Publ., 2011, pp. 165–171. (In Russian)

20. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Vasilyev V. Y., Primak E. A., Lobachyova Y. W., Skrygina V. K. [Evaluation of emergent properties of complex systems in nature and society on the basis of an integrated model evaluation]. *Sbornik trudov VI mezhdunarodnoi konferentsii «Ekologicheskie i gidrometeorologicheskie problemy bol'shikh gorodov i promyshlennykh zon, EKOGIDROMET-2012»*. 2–4 iuliia 2012 g. [Proceedings of the VI international conference “Ecological and hydrometeorological problems of big cities and industrial zones, EKOGIDROMET-2012”. July 2–4, 2012]. Eds. L. N. Karlin, V. Vorobyov, V. A. Shelutko, Vladimir Dmitriev. St. Petersburg, Publ. Russian State Hydrometeorological University, 2013, pp. 25–34. (In Russian)

21. Ogurtsov A. N., Hovanov N. V. Mnogokriterial'naia otsenka ekologicheskogo sostoiianiia i ustoichivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. III. Otsenka stepeni blagopriiatnosti prirodnykh uslovii makroregionov Severo-Zapada RF dlia zhizni liudei [Multi-criteria assessment of the environmental status and sustainability of geosystems based on the method aggregates. III. Assessment of the favorable natural conditions of macro-regions northwest of the Russian Federation for human life]. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 1997, issue 2, pp. 55–62. (In Russian)

22. Osipov G. K. *Teoriia i praktika otsenki prigodnosti zemel' prirodnykh landshaftov dlia agrarnogo i rekreatsiionnogo osvoeniia*. Dokt. Diss. [Theory and practice of integrated assessment of natural landscapes of the suitability of land for agricultural and recreational development. Doct. Diss.]. St. Petersburg, 2016. (In Russian)

23. Priymak E. A. *Integral'naia otsenka ustoichivosti i ekologicheskogo blagopoluchiiia vodnykh ob'ektov*. Avtoref. Kand. Diss. [Integral assessment of sustainability and environmental well-being water facilities. Thesis of PhD Diss.]. 2009. 24 p. (In Russian)

24. Semenchenko V. P., Razlutsky V. I. *Ekologicheskoe kachestvo poverkhnostnykh vod* [Environmental quality of surface waters]. Minsk, Belarusian Nauka, 2010. 329 p. (In Russian)

25. Snakin V. V., Melchenko V. E., Butovsky R. O. et al. *Otsenka sostoiianiia i ustoichivosti geosistem* [Assessment of the status and stability of geosystems]. Moscow, Institute of Nature Publ., 1992. 127 p. (In Russian)

26. Fedorova I. V. *Sovremennoe sostoianie i ustoichivost' k vozdeistviu vnutrennikh vodoemov Antarktidi*. Avtoref. Kand. Diss. [Current status and resistance of inland waters of Antarctica. Thesis of PhD Diss.]. St. Petersburg, 2003. 19 p. (In Russian)

27. Hovanov N. V. *Analiz i sintez pokazatelei pri informatsionnom defitsite* [Analysis and synthesis of indicators in an information deficit]. St. Petersburg, St.-Petersburg Univ. Press, 1996. 196 p. (In Russian)

For citation: Dmitriev V. V., Fedorova I. V., Birykova A. S. Approaches to assessment and GIS mapping of sustainability and environmental well-being of geosystems. Part IV. Integrated assessment of ecological well-being of terrestrial and aquatic ecosystems. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 2, pp. 37–53. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.204

Статья поступила в редакцию 1 марта 2016 г.

Контактная информация

Дмитриев Василий Васильевич — доктор географических наук, профессор;
vasiliy-dmitriev@rambler.ru

Федорова Ирина Викторовна — кандидат географических наук, доцент; umnichka@mail.ru

Бирюкова Анна Сергеевна — студент; anna_birykova2212@mail.ru

Dmitriev Vasily V. — Doctor of Geographic Sciences, Professor; vasiliy-dmitriev@rambler.ru

Fedorova Irina V. — PhD, Associate Professor; umnichka@mail.ru

Birykova Anna S. — student; anna_birykova2212@mail.ru