

## **«Гидрология», «экология» и «геоэкология» в современных исследованиях водных объектов суши: акценты, проблемы, решения**

В.В. Дмитриев\*, И.В. Федорова, А.Н. Огурцов, С.А. Седова, А.К. Пленкина

*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*  
\*v.dmitriev@spbu.ru

**Аннотация.** Рассматривается гидрологическая, экологическая и геоэкологическая терминология, обуславливающая развитие методологии, формулировку предметов исследования и выбор методов гидрологических, водно-экологических и геоэкологических исследований водоемов. Выделяются: антропо-, био-, эко-, геоцентризм в исследовании водных объектов. Обсуждается использование терминов «гидроэкология» и «экогидрология» в современных российских и зарубежных исследованиях водных объектов.

Обсуждаются «формулы» научных специальностей «Гидрология» и «Геоэкология», объекты и предметы гидрологических и геоэкологических (гидроэкологических) исследований. Анализируются сходства, различия и основные черты современных научных и научно-квалификационных работ по данным специальностям. Обсуждаются паспорта специальностей Высшей Аттестационной Комиссии РФ (ВАК РФ) 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия и 25.00.36 Геоэкология (науки о Земле). Выявляются смежные области и предметы исследования.

Акцентируется применение методов системного анализа и системного подхода в целом в современных гидрологических, экологических и геоэкологических исследованиях водных объектов.

Рассматривается направление в исследовании сложных систем и их свойств в «гидрологии», «экологии», «геоэкологии», которое изучает сложные (неаддитивные, эмерджентные, интегративные) свойства природных и общественных систем. Современными акцентами таких исследований являются: 1 - разработка подходов к оценке эмерджентных свойств сложных систем, характеризующих систему в целом и ее подсистемы (современный или ретроспективный статус системы, ее благополучие с позиции антропо- или биоцентризма, экологическую напряженность, степень трансформации системы, устойчивость, уязвимость системы, ее целостность и др.); 2 - разработка подходов к оценке воздействия на системы и их ответной реакции на воздействие.

В статье рассматриваются теоретико-методологические основы, методы и результаты интегральной оценки экологического статуса водного объекта. Под экологическим статусом водоема авторами понимается интегративное (сложное, эмерджентное) свойство, характеризующее его способность продуцировать органическое вещество в соответствии с фазой исторического развития водоема, учитывающее качество и токсическое загрязнение воды, потенциальную устойчивость (уязвимость) водоема к изменению параметров естественного режима. Выделяется роль «гидрологии» и «геоэкологии» в оценке экологического статуса водных объектов.

Рассматриваются многокритериальные и многоуровневые оценки интегративных свойств водных объектов, учитывающие иерархичность рассматриваемых систем. Предложены подходы к интегральной оценке продукционного потенциала (трофического статуса) водоема, качества и токсического загрязнения воды, устойчивости (уязвимости)

водоема к изменению параметров естественного и антропогенного режимов, экологического (геоэкологического) статуса, экологического благополучия водного объекта.

Приводятся примеры интегральной оценки экологического и геоэкологического статуса водоема, содержащие следующие группы (блоки) характеристик: 1-трофический статус водоема; 2-качество и токсическое загрязнение воды и донных отложений; 3-потенциальная устойчивость водоема. В статье содержатся авторские шкалы, лежащие в основе интегральной оценки, приводятся результаты оценки при равновесном задании приоритетов внутри блоков и между ними.

Результаты оценки рассмотрены на примере Суздальских озер (Верхнее, Среднее, Нижнее) г. Санкт-Петербурга. Исходная информация получена в ходе проведения полевых исследований на озерах в последние годы. Расчеты интегральных показателей позволили определить сочетание составляющих экологического статуса при разных приоритетах (весах) исходных характеристик. На основе расчетов интегральных показателей появляется возможность выявления тенденций изменения экологического статуса при внешних воздействиях на водоемы.

Результаты исследований могут быть полезны для лиц, принимающих решение в области оценки состояния водных объектов и их эмерджентных свойств, охраны окружающей среды.

**Ключевые слова:** экологический статус, интегральная оценка, метод сводных показателей, трофический статус, качество и токсическое загрязнение воды, потенциальная устойчивость, интегральный показатель.

## "Hydrology", "ecology" and "geoecology" in modern research of water bodies of land: emphasis, problems, solutions

V.V. Dmitriev\*, I.V. Fedorova, A.N. Ogurtsov, S.A. Sedova, A.K. Plenkina

*Saint Petersburg State University, Russian  
\*v.dmitriev@spbu.ru*

**Abstract.** We consider the hydrological, environmental, and geoecological terminology that determine the development of the methodology, the formulation of research subjects and the choice of methods for hydrological and water-ecological studies of water bodies. The following stand out: anthropo-, bio-, eco-, geocentrism in the study of water bodies. The use of the terms "hydroecology" and "eco-hydrology" in modern Russian and foreign studies of water bodies is discussed.

The "formulas" of the scientific specialties "Hydrology" and "Geoecology", objects and objects of hydrological and geoecological (hydroecological) studies are discussed. The similarities, differences and main features of modern scientific and scientific-qualification works in these specialties are analyzed. The passports of specialties of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation (НАС РФ) are discussed 25.00.27 Hydrology of land, water, hydrochemistry and 25.00.36 Geoecology (Earth sciences). Related areas and subjects of research are identified.

The emphasis is on the application of systems analysis methods and the systems approach as a whole in modern hydrological, environmental and geoecological studies of water bodies.

We consider the direction in the study of complex systems and their properties in "hydrology", "ecology", "geoecology", which studies the complex (non-additive, emergent, integrative) properties of natural and social systems. The current accents of such studies are: 1 - development of approaches to assessing the emergent properties of complex systems that characterize the system as a whole (the current or retrospective status of the system, its well-being

from the standpoint of anthropo- or biocentrism, environmental tension, the degree of transformation of the system, stability, vulnerability of the system, its integrity, etc.); 2 - development of approaches to assessing the impact on systems and their response to the impact.

The article discusses the theoretical and methodological foundations, methods and results of an integrated assessment of the ecological status of a water body. The authors understand the ecological status of a reservoir as an integrative (complex, emergent) property that characterizes its ability to produce organic matter in accordance with the phase of the historical development of the reservoir, taking into account the quality and toxic pollution of the water, the potential resistance (vulnerability) of the reservoir to changes in the parameters of the natural regime. The role of "hydrology" and "geoecology" in assessing the ecological status of water bodies is highlighted.

Multicriteria and multilevel assessments of the integrative properties of water bodies are considered, taking into account the hierarchy of the systems under consideration. Approaches to the integrated assessment of the productive potential (trophic status) of a reservoir, the quality and toxic pollution of water, the resistance (vulnerability) of a reservoir to changes in the parameters of natural and anthropogenic regimes, ecological (geoecological) status, and ecological well-being of a water body are proposed.

Examples of an integrated assessment of the ecological and geoecological status of a reservoir are given, containing the following groups (blocks) of characteristics: 1-trophic status of a reservoir; 2-quality and toxic pollution of water and bottom sediments; 3-potential stability of the reservoir. The article contains the author's scales that underlie the integral assessment, the results of the assessment are given for the equilibrium setting of priorities within and between the blocks.

The evaluation results are considered on the example of the Suzdal lakes (Upper, Middle, Lower) of St. Petersburg.

Initial information was obtained during field studies on lakes in recent years. Calculations of integral indicators made it possible to determine the combination of environmental status components with different priorities (weights) of the initial characteristics. Based on calculations of integral indicators, it becomes possible to identify trends in environmental status with external influences on water bodies. The research results may be useful for decision makers in the field of assessing the state of water bodies and their emergent properties, and environmental protection.

**Keywords:** ecological status, integrated assessment, method of composite indicators, trophic status, quality and toxic pollution of water, potential sustainability, integral indicator.

## **Введение**

В статье анализируются гидрологическое, гидроэкологическое направления в гидрометеорологии и водно-экологическое, геоэкологическое направления в экологии и геоэкологии. Рассматриваются вопросы теории, методологии, методы оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов. Актуальность проблемы для РФ обусловлена принятием Распоряжения Правительства РФ от 27.08.2009 N 1235-р (ред. от 17.04.2012) "Об утверждении "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года", разработкой "Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642"; систематизацией знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и управлением водными объектами в связи с развитием цифровизации в науках о Земле, природе, обществе. В перечень «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» (Указ Президента Российской Федерации №899 от 7 июля 2011 г.) входят «науки о жизни» и «рациональное природопользование», а в «Перечень критических технологий Российской Федерации» вошли, п.19. «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения»; п.21. «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций

природного и техногенного характера».

Как мы писали в 2014 гт. [9], «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 состава биоты (аут-, дэм- и синэкология) и биологических методов контроля качества воды (биоиндикация, биотестирование, биологические индексы); реже - прямых измерений и оценки скоростей процессов массообмена в водной экосистеме. За рубежом часто пишут, что в биологических оценках состояния биоты используется т.н. *интегрированный подход*. *Биологическую целостность* (Biological Integrity) зарубежные 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» (Семенченко и Разлуцкий, 2011). *Биологическая целостность* на западе часто рассматривается как способ определения *здоровья экосистемы*. Согласно Европейской Рамочной Водной Директивы (Water Framework Directive, WFD), *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 «*корегионов*» Европы (Directive 2000/60/EC of the European Parliament, 2000). Термин «*ecological integrity*», как основное понятие фигурирует в американском экологическом законодательстве (Закон о чистой воде) и используется Агентством по охране окружающей среды Environmental Protection Agency (EPA) США.

Развитие этих исследований в странах ЕС происходит на фоне принятия, доработки и адаптации Директивы Европейского парламента и Совета по установлению рамок действий Сообщества в области водной политики. Рамочная Директива и Совет по водным ресурсам (РДВ) были созданы для того, чтобы гарантировать доступность населению воды высокого качества. Первоначальный вариант РДВ обязывал все государства-члены ЕС достичь "хорошего" экологического состояния во всех поверхностных водоемах к 2015 году. Основная цель Директивы в ЕС представлялась, как достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса для всех водных систем. Основываясь на информации, предоставленной государствами-членами ЕС в первых планах управления речными бассейнами (отчетность была предоставлена в конце 2009 года), Р. Kristensen (2012) установил, что 56% рек и 44% озер в ЕС имеют «менее чем хорошее» экологическое состояние. По оценкам [29], на основе данных Европейского агентства по окружающей среде в период с 2004 по 2009 год только 38% рек были отнесены к классам «хорошего» или «высокого» экологического статуса. Современный мониторинг окружающей среды показывает, что в последние годы ситуация в значительной степени не изменилась [23]. Для более эффективного решения этих проблем ЕС запланировал пересмотр РДВ к 2019 году и отложил крайний срок достижения целевых показателей экологического состояния на 2027 год, чтобы дать больше времени для реализации пересмотренной версии РДВ [30]. Это позволяет зарубежным исследователям обсудить новые меры в рамках текущего цикла плана управления речными бассейнами в 2016-2021 гг., которые должны дополнительно учитывать также потенциальные последствия изменения климата [28]. Как и в странах ЕС, в России эти исследования связаны с развитием: 1-гидроэкологического инжиниринга (ГЭИ) и 2-водно-экологического инжиниринга (ВЭИ) [7].

## **Теоретико-методологические основы и акценты гидрологических, экологических, геоэкологических исследований.**

**Гидрологические акценты.** В России под ГЭИ понимается систематизация знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и управлением водными объектами в системе «водный объект – человек (общество)» с акцентом на антропоцентризм в научном исследовании. Это исторически нашло отражение в паспорте специальности ВАК 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (Паспорт специальности ВАК 25.00.27). Прежде всего, отметим, что в «формуле» этой специальности ВАК отсутствует термин «гидроэкология». Но в трех областях исследования №№ 4,9,10 этот термин используется. В области исследования №4 делается акцент на изучение особенностей «гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов в озерах и водохранилищах», динамических явлений в озерах, водохранилищах и прудах, генезисе и трансформации состояния водных масс, проблемах «лимнологического моделирования внутриводоемных явлений, гидроэкологической оптимизации режима водоемов суши». В область исследования №9 входят «разработка теории и методологии гидроэкологии, изучения водных экосистем, теории взаимодействия абиотических и биотических компонентов этих систем, методов оценки экологически значимых гидрологических и гидрохимических характеристик». В области исследования №10 заявлена «разработка научных основ обеспечения гидроэкологической безопасности территорий и хозяйственных объектов, экономически эффективного и экологически безопасного водопользования и водопотребления, планирования хозяйственной деятельности в областях повышенного риска опасных гидрологических процессов, защиты водных объектов от истощения, загрязнения, деградации, оптимальных условий существования водных и наземных экосистем». В целом акценты сделаны на: 1 - «гидроэкологическую оптимизацию режима водоемов суши»; 2 – «разработку теории и методологии гидроэкологии»; 3 – «обеспечение гидроэкологической безопасности территорий, экологически безопасном водопользовании и водопотреблении, планировании хозяйственной деятельности в областях повышенного риска опасных гидрологических процессов». При внимательном рассмотрении этих акцентов выясняется, что в двух первых случаях в исследованиях могут использоваться антропоцентризм, био- и эоцентризм и совмещение подходов. Поэтому такие исследования сближают гидрологическую и гидрохимическую ветви гидрометеорологии с геоэкологической ветвью экологии и природопользования.

**Гидроэкологические и водно-экологические акценты.** Только в последнем случае, на первый план выходят исследования по «разработке методологии и практических путей минимизации негативного влияния гидрологического режима, состава и свойств водных объектов на общество, а также на безопасность жизнедеятельности населения, социальных и производственных объектов в зонах существующей или потенциальной угрозы затопления, подтопления территорий, разрушения сооружений, снижения качества воды» [15]. Здесь же развиваются исследования по обеспечению экологической безопасности водных бассейнов, выявлению в них экологических рисков, поиску путей их минимизации. Антропоцентризм этих исследований обуславливает использование санитарно-гигиенических регламентов и нормативов для оценки состояния и воздействия на водный объект.

Развивая это направление, Н.Л. Фролова писала о «гидроэкологии»: «объектом этой науки являются взаимосвязанные водные объекты, их биоценозы, гидрологические процессы, население и хозяйство (природно-социальная и водохозяйственная система) в пределах малых или крупных водосборных территорий» [19]. По-видимому, автор, оставаясь на рельсах гидрологии, стремилась, как и в случае с *геоэкологией*, акцентировать междисциплинарность *гидроэкологических* исследований. Далее, *гидроэкология* ставилась

автором в один ряд с комплексом таких научных дисциплин, как *экологическая климатология*, *экологическая геоморфология* и т.п., которые объединяет *экологическая география* (или рациональное природопользование). В ней изучаются «закономерности оптимального сосуществования объектов природно-социальной среды, учет которых обеспечивает устойчивое развитие общества, сохранение среды обитания человека и природного разнообразия» [19]. Отметим, что, следуя логике рассуждений автора, такую науку следовало бы назвать *экологической гидрологией*.

В начале 2000-х гг. мы писали о том, что, если возникла необходимость введения гидролого-экологической (эколо-гидрологической) ветви гидрологии (специальность 25.00.27), базирующейся на платформе антропоцентризма, то логичнее назвать ее «экологической гидрологией» или «экогидрологией» [2]. Однако эта идея не получила дальнейшего развития. Этому препятствовали следующие обстоятельства: 1 – паспорт специальности 25.00.27, в котором отсутствовала *экологическая гидрология*, но присутствовала *гидроэкология*. Авторы-гидрологи при защитах своих научно-квалификационных работ по данной специальности ВАК вынуждены были следовать терминологии паспорта. Но тогда «биоценозы водных объектов» в большинстве работ приходилось считать объектами *водной экологии*.

В современных российских исследованиях намечается подход, предполагающий осуществление комплекса взаимосвязанных между собой мероприятий, выполнение которых позволяет в условиях отсутствия регулярных наблюдений, всесторонне оценить экологический статус водного объекта. Под экологическим статусом водного объекта в данном контексте понимается его гидрологическое состояние (водный режим), качество находящегося в нем воды и донных отложений (по различным показателям), состояние его береговой зоны; устойчивость водного объекта к изменению параметров режимов. Методология оценки экологического (геоэкологического) статуса водоемов и водотоков урбанизированных территорий включает в себя три этапа: 1 этап – инвентаризация водных объектов с уточнением их гидрографических и морфометрических показателей; 2 этап – полевые определения характеристик водного режима, трофности, качества и токсического загрязнения воды, донных отложений и состояния береговой линии репрезентативных водных объектов; 3 этап – оценка экологического (геоэкологического) статуса репрезентативных водных объектов, основанная на системе интегральных показателей, характеризующих их состояние и устойчивость.

**Экологические и геоэкологические акценты.** Целостное представление о закономерностях взаимодействия населения, хозяйства и водных объектов, их биоценозов формируется в междисциплинарной области исследований, называемой в России с начала 2000-х гг. *геоэкологией* (Паспорт специальности ВАК 25.00.36 Геоэкология). Биологическими аспектами существования «населения» водных экосистем занимается *гидробиология*. Мониторинговые гидробиологические наблюдения за компонентами экосистемы позволяют получить информацию о массах или концентрациях компонентов в определенные моменты времени. Эти показатели отражают результат жизнедеятельности экосистемы и лишь частично характеризуют протекающие в ней процессы, поскольку изменение биомасс и концентраций является видимым проявлением сложных процессов обмена веществом и энергией между компонентами системы. В связи с этим, *водная экология* выделилась из *гидробиологии* и, как формализованный целостный подход и стала самостоятельным разделом *общей экологии* в результате развития гидробиологии, современных математических методов, геоинформатики, обработки данных на ПК и т. д., а также формального упрощения и моделирования водных экосистем. Ей, чаще всего, отводилось изучение отношений в системе «водный объект — организмы гидробионты». В водно-экологическом инжиниринге (ВЭИ) речь идет о систематизации знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и

управлением водными объектами в системе «водный объект – организмы-гидробионты» с акцентом на биоцентризм в исследовании с точки зрения использования воды как среды жизни организмами-гидробионтами или с акцентом на сохранение экосистемы в целом (экоцентризм) (Дмитриев и соавт., 2018). Эти исследования Н.И. Алексеевский (МГУ) предложил называть «водно-экологическими», чтобы избежать путаницы в гидроэкологической терминологии [15]. Биоцентризм обуславливает развитие и использование методов биологического контроля в оценке качества воды, использование гидробиологических регламентов и нормативов в практике водопользования и водопотребления. Развитие биоиндикации и биотестирования создает научную базу для разработки и использования новых «экологических мишеней», методов токсикологии для учета скрининговых эффектов в изменении токсичности воды (Ostroumov, 2010; Абакумов, 2012), применения когнитивных моделей для отражения многофакторного влияния действующих на экосистему факторов в практике системного нормирования. В опубликованной в 2008 году в издательстве В&Н монографии «Гидроэкология и экогидрология: прошлое, настоящее и будущее» [27], обобщающей опыт исследований ряда стран в данной области, в будущем предлагается переход от методологии, основанной только на гидробиологических оценках, к комплексному подходу, который учитывает изменения различных компонентов водного объекта, определяющих его экологическое состояние. В рамках геосистемного подхода за рубежом получены новые результаты, позволившие получить ответы на вопросы: 1 - как изменяется качество, конфигурация и отношения связности патчей (единиц неоднородности) в пространственных и временных масштабах в водных ландшафтах; 2 - как изменения этих особенностей влияют на процессы и масштабные отношения в ландшафтах, адекватны ли они изменениям, полученным на основе экологических моделей; 3 - каким образом знания о закономерностях и процессах могут повлиять на управленческие решения по территориальному планированию, устойчивому использованию конкретных геосистем и целых ландшафтов, сохранению и предоставлению экосистемных услуг [36].

**Оценка экологических функций и услуг экосистем (УЭ).** В условиях перехода к рыночной экономике существенно возрос интерес к типологизации регионов России в зависимости от обеспеченности природно-ресурсным потенциалом и выработке подходов к управлению развитием на региональном уровне. Все большую актуальность в работах, посвященных оптимизации природопользования получает экономическая оценка природных благ и их экологических функций, учет которых включается в механизм регулирования природопользованием на межрегиональном и международном уровнях. Понятие рационального природопользования все чаще рассматривается как основа устойчивого развития регионов, о чем свидетельствуют разработки индикаторов устойчивого развития, в числе которых важное место занимают геоэкологические показатели природопользования.

Пол региональной политикой (РП) понимается комплекс государственных мер по перераспределению ресурсов для воздействия на территориальную структуру общества ради заданных целей. Смысл «региональной политики» состоит в оценке состояния сложных систем в обществе. Главные цели РП были озвучены президентом РФ в апреле 1994 г.: благосостояние граждан, целостность государства, территориальная справедливость. Основа РП - не производительные силы (это дело бизнеса), не экономика вообще, а социальные цели. Три главные проблемы, которые решает РП: выявление неравенства районов и городов, противоречий в интересах регионов (районов) и страны, территориальное разделение труда.

По определению [25] услуги экосистемы состоят из потоков вещества, энергии, и информации от естественных основных капиталов, которые объединяются с услугами производственного и человеческого капиталов, определяя человеческое благосостояние.

Осознание этого определяет необходимость развития научных подходов к моделированию скоростей массообмена (потоков вещества) между компонентами наземных и водных экосистем и их изъятие человеком для жизнеобеспечения. Узким местом экологической экономики является монетарное выражение стоимости экосистемных (геосистемных) и, в первую очередь, поддерживающих услуг. По наиболее распространенным представлениям *«поддерживающие услуги» – это услуги, необходимые для производства всех других экосистемных услуг.* Они отличаются от обеспечивающих, регулирующих и культурных услуг тем, что их воздействие на людей, зачастую, является косвенным или осуществляется в течение длительного времени, в то время как изменения в других категориях услуг имеют относительно непосредственное и кратковременное влияние на людей». К ним относят: 1 – почвообразование, поскольку, многие обеспечивающие услуги зависят от плодородия почв, скорость почвообразования оказывает влияние на благосостояние людей во многих отношениях; 2 – фотосинтез (биосинтез), при котором продуцируется кислород, необходимый многим живым организмам; 3 – первичное продуцирование органического вещества наземными и водными экосистемами; 4 - круговорот питательных веществ (около 20 питательных веществ, необходимых для жизни, включая азот и фосфор, циркулируют в экосистемах и сохраняются в различных концентрациях в компонентах экосистем); 5 - круговорот воды, поскольку вода является средой жизни многих организмов, циркулирует в экосистемах и является жизненно необходимой для живых организмов. В эту группу можно включить также теплообеспеченность, влагообеспеченность, влажность воздуха; 6 - рельеф и почвообразующую породу, которые, определяют перераспределение тепла и влаги и условия минерального питания первичных продуцентов.

Фундаментальной проблемой в рамках концепции экосистемных услуг является социально-экономическая оценка поддерживающих услуг, призванная прямо связывать основные физико-географические условия с социально-экономической активностью населения. В более широкой постановке эта проблема связана с общей теорией организации ландшафта, в котором человеческая деятельность является эволюционно одним из ландшафтообразующих процессов.

**Развитие исследований по обеспечению экологической безопасности водных бассейнов.** Эффективное изучение опасных гидрологических процессов, разработка методик, позволяющих проводить их оценку, в том числе оценку создаваемых ими ущербов, совершенствование классификаций, а зачастую – их создание, разработка и систематизация критериев и показателей, их характеризующих (их параметризация), методов и приемов прогнозирования и расчета, картографирование (составление карт на территории, крупные регионы или речные бассейны) и на их основе выявление географических закономерностей, условий развития и факторов, их определяющих, установление связей с другими гидрологическими явлениями, имеющими экстремальный или специфический характер, а так же решение многих других вопросов, требуют уточнения и широкого взгляда в отношении тех понятий, которыми оперируют в данной области науки, как в Российской Федерации, так и на Западе.

В России, под термином «опасное гидрологическое явление (ОГЯ)» понимают: 1) событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, возникающих под действием различных природных факторов, оказывающих поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственные растения и животных, объекты экономики и окружающую природную среду (ГОСТ Р 22.0.03-95); 2) внешнее отражение, внешняя форма проявления одной из стадий (как правило, экстремальной по своим характеристикам) одного или нескольких гидрологических процессов [3].

Можно также привести термин «Опасное гидрометеорологическое явление (ОЯ)» - метеорологическое, агрометеорологическое, гидрологическое и морское гидрометеорологическое явление и (или) комплекс гидрометеорологических величин,



которые по своему значению, интенсивности или продолжительности представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб объектам экономики и населению (РД 52.04.563-2002).

Приведенные выше термины объединяет подход к определению и исследованию опасных гидрологических явлений на основе антропоцентризма, в них акцентируется влияние элементов гидрологического режима на общество, а также на безопасность жизнедеятельности населения, социальных и производственных объектов в зонах существующей или потенциальной угрозы затопления территории, разрушения сооружений, ухудшения качества воды. Практический смысл данных определений заключается в обеспечении мониторинга опасных явлений, их оперативного прогноза, обнаружения, предотвращения и оповещения населения, муниципальных органов и субъектов экономики о возможности их возникновения соответствующим инструментарием, позволяющим решать эти задачи посредством сопоставления наблюдаемых и прогнозируемых значений гидрологических характеристик с их критическими величинами [11]. Таким образом, можно сделать вывод, что все исследования, исходя из определений, основываются на прогнозных моделях опасных гидрологических явлений и процессах, моделях оценки рисков и ущербов. В последнем случае часто используется термин *магнитуда* (англ. *magnitude*), который употребляется для обозначения широкого ряда измерений и понятий, это величина измерения по какой-либо оценочной шкале. Магнитуду можно считать синонимом таких русских слов как «величина», «степень», «размер» или «сила».

В этом же контексте стоит привести более «узкое» определение ОГЯ, которое дано в «Методических рекомендациях по организации и проведению мероприятий, направленных на снижение последствий весеннего половодья и паводков» (2000). В нем к ОГЯ относят только явления, сопровождающиеся высоким уровнем воды в водоемах и водотоках, превышающим величины особо опасных (критических) уровней воды для конкретных населенных пунктов и хозяйственных объектов.

Иногда в литературе встречается термин «экстремальная гидрологическая ситуация» (ЭГС). Вообще экстремальным считается любое событие в природной системе, приобретающее сравнительно большое отклонение от среднего состояния или значения [11]. В этом контексте ЭГС охватывают более широкий перечень гидрологических явлений по сравнению с ОГЯ.

Н.И. Коронкевич (2010) под *экстремальной экологической ситуацией* понимает «такое количественное или качественное состояние водных объектов, элементов гидрологического режима территории, которое кардинально отличается от общего, общепринятого, среднего». В данном определении к ЭГС авторы относят загрязнение природных вод, поскольку содержание многих ингредиентов нередко возрастает на несколько порядков, и часто появляются вещества, не имеющие аналогов в природных водах [10]. Можно отметить, что в последнем определении антропоцентризм не акцентируется, здесь возможно совмещение антропоцентризма, био- и эоцентризма в изучении ЭГС.

**Экогидрология как новое направление изучения взаимодействия между водными ресурсами и водными экосистемами.** На Западе подход к понятию ОГЯ, в отличие от России, в последние годы рассматривается с точки зрения био- и эоцентризма. Данный подход диктует использование методов биологического контроля в оценке качества воды, использования гидробиологических регламентов и нормативов в практике водопользования. К этому следует добавить научные поиски оценки интегративных свойств экосистем в целом. Поэтому на Западе, в отличие от России, на первое место стала выходить «экогидрология», объединяющая в себе гидрологические и экологические процессы водосборов, обеспечивая рамки, в которых можно исследовать сложную взаимосвязь

подсистем, например, между динамикой растительности и водными потоками [22]. В итоге, широкое применение получают т.н. *многоцелевые экогидрологические модели* (multi-objective ecohydrological model). Данные модели включают в себя моделирование производства биомассы в водной экосистеме. Главным преимуществом многоцелевых моделей является обеспечение одновременного и всестороннего рассмотрения как гидрологической, так и экологической составляющей любого исследования опасных гидрологических явлений [37].

В работе [28], впервые описаны результаты оценки влияния климатических и социально-экономических факторов на экологическое состояние водотоков (рек и ручьев) при различных сценариях сочетания факторов с использованием т.н. байесовских сетей Bayesian Belief Networks (BBN). Байесовская сеть веры (верований, убеждений) - «BBN» использовалась для моделирования экологического состояния рек и ручьев с позиций биоцентризма на примере двух европейских речных бассейнов, расположенных в различных климатических регионах: бассейне фьорда Оденсе (Дания) и бассейне Соррайя (Португалия). Следуя подходу "сценарии – стрессоры – индикаторы – состояние", используя различные источники данных (измеренные, полученные на модели, экспертные оценки), авторы объединили эффекты оценки воздействия многочисленных стрессоров на экологическое состояние рек с использованием нескольких индексов для обеспечения полной (сводной) оценки состояния. В рамках BBN интегрировались несколько инструментов моделирования, основанных на процессах и эмпирических данных. Впоследствии подход позволил учесть климатические и социально-экономические изменения в сценариях, демонстрирующих влияние этих изменений на качество речной воды. Этот метод позволил объединить различные источники данных в единую структуру для моделирования влияния множества стрессоров на несколько биологических показателей качества речных вод. В итоге был разработан достаточно простой интерактивный пользовательский интерфейс (BBN), с помощью которого авторы моделировали комбинированные сценарии климатических и социально-экономических изменений для оценки их воздействия на экологическое состояние рек. Модели BBN были разработаны с помощью программного обеспечения GeNIe, созданного компанией BayesFusion и свободно доступного для академического и научного использования [24].

На основе BBNs изучалось влияние на экосистемы рек различных сценариев изменения климата и их потенциальных сочетаний с социально-экономическими сценариями (изменения в землепользовании и управлении сельским хозяйством). Результаты моделирования показали на незначительные изменения в биотическом статусе рек в большинстве проанализированных на основе индексов BQEs. В результате было показано, что во фьорде Оденсе и в бассейне Соррайя, большая часть рек не будет соответствовать критериям первого и второго классов («хорошего» или «лучшего» экологического состояния) по РДВ. В Оденсе основную ответственность за это несут макрофиты, а в Соррайе – рыбы, учитываемые в индексах BQE. На этой основе авторами сделан вывод о том, что менеджеры должны распределять свои усилия по снижению воздействия выявленных стрессоров на индексы BQE соответственно для каждого бассейна. Авторы считают, что, несмотря на все потенциальные ограничения, прогнозы BBN могут представлять собой наилучшие из возможных результатов с учетом типичных ограничений наличия данных биоанализов у природоохранных учреждений и могут дать полезную качественную информацию для принятия решений по управлению водными ресурсами в условиях будущего изменения климата.

**Оценка устойчивости водных объектов и экосистемных ресурсов в условиях глобальных изменений климатических и гидрологических процессов, их влияние на мир и безопасность, здоровье и качество жизни населения.** Maciej Zalewski (2007) считает, что концепция междисциплинарного подхода, которую все чаще именуют «экогидрологией», создаст необходимые социально-экономические обратные связи и совмещает

(гармонизирует) гидрологические, экологические и социально-экономические процессы в масштабах бассейна для экосистем и общества. Автор подчеркивает, что в эпоху чрезмерной эксплуатации природных ресурсов, высоких выбросов загрязняющих веществ и деградации водных экосистем появляется острая необходимость ускорения прогресса в естественных науках, изучающих интегративные свойства систем, с целью создания новой парадигмы – новой точки зрения на гидрологические и экологические проблемы. Также в проблеме оценки устойчивости [34] добавляет необходимость изучения устойчивости круговорота питательных веществ, для уточнения его роли и трансформаций в водной экосистеме.

**Создание и развитие социально-гидрологических моделей.** В этих исследованиях гидрологические модели включается блок реакции человека на (опасные) гидрологические явления (наводнения, засухи). В таких моделях исследуется распределение воды между социальными и экологическими подсистемами, что является ключевым детерминантом исследования взаимодействий между этими подсистемами [38].

Современная реальность свидетельствует о необходимости широкого толкования предметов исследований перечисленных выше научных направлений. Заметим, что с точки зрения правил русского языка соединение двух прилагательных в одно возможно двумя способами. В первом способе через дефис, например, *географо-экологическая, эколого-географическая*. В этом случае сохраняется смысловое равноправие составных частей нового прилагательного. Во втором случае из двух прилагательных образуется одно с помощью соединительной гласной «о». В этом случае главной является вторая часть прилагательного, а первая часть носит подчиненный характер. Написание прилагательных, составленных из двух частей возможно двумя способами, это зависит от принятых традиций. Тогда *водноэкологическое* и *гидроэкологическое* направления должны, по нашему мнению, оставаться экологическими по существу, и, в определенном смысле, являются синонимами. Речь может идти лишь о присутствии в них *биоцентристской, экоцентристской, геоцентристской* или *антропоцентристской* позиций на изучение водных объектов (или их всех одновременно) [2].

Российские традиции позволяют нам расширить границы *гидроэкологии* в паспорте специальности 25.00.27. В последние годы мы для этого отталкивались от определения *геоэкологии*, данного ВАКом РФ. Под *гидроэкологией* нами предлагалось понимать междисциплинарное научное направление, которое объединяет в себе исследования состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей гидросферы Земли как среды обитания организмов-гидробионтов, источника ресурсов и полноценной среды обитания для человека (общества). Основной задачей *гидроэкологии* является изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов гидросферы под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной и чистой водной среды. В этом случае *гидроэкология* становится междисциплинарным научным направлением. Присутствие в ней авторских акцентов с позиций био-, эко-, геоцентризма позволяет исследователям защищать свои научно-квалификационные работы по специальности 25.00.36., а сочетание всех рассмотренных выше подходов, обосновать вклад таких исследований в специальность 25.00.27 и одновременно в специальность 25.00.36.

Другой путь - расширить толкование термина «гидроэкология», включив в него, как и ранее, антропоцентристское определение, «гидроэкология-1» (специальность ВАК 25.00.27) и добавить «гидроэкология-2» - биоцентристское определение (специальность ВАК 25.00.36). Как вариант, в содержание «гидроэкология-2» можно ввести оба определения через «и/или», но тогда придется закрепить эти определения за специальностью ВАК 25.00.36.

При этом необходимо помнить, что в западной научной литературе для этого уже используется термин *экогидрология* (как новое направление изучения взаимодействия между водными ресурсами и водными экосистемами).

## Материалы и методы исследования

Использование в РДВ т.н. *интегрированного подхода* потребовало от участников процесса в ЕС разработки методов оценки интегративных свойств водных объектов, математического аппарата и моделей оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния, выделения экорегионов и степени антропогенной трансформации водных экосистем. Он характеризуется обоснованием новых функциональных единиц эко-, гео-, социосистем, в качестве которых рассматриваются показатели нескольких уровней обобщения информации на основе учета иерархичности систем. Такой подход, обуславливающий исследование эмерджентности систем, и показатели, характеризующие последний уровень обобщения, явились в итоге основой современной систематики исследуемых объектов при оценке их эко- (и геоэкологического) статуса. Они позволили сравнивать их состояние в пространстве и времени или выявлять эффекты взаимосвязи, взаимодействия, трансформации систем, не аддитивные по отношению к локальным внутрисистемным эффектам, которые традиционно рассматривались на компонентном уровне через их состав и свойства.

Содержанием начального этапа исследований являются: 1- обоснование теоретико-методологических положений интегральной оценки экологического (геоэкологического) статуса и экологического благополучия / неблагополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния с учетом неопределенности задания критериев и приоритетов оценивания; 2 - разработка и апробация оценочных классификаций (моделей-классификаций) для интегральной оценки трофического статуса (продукционного потенциала), качества и токсического загрязнения воды (и донных отложений), потенциальной устойчивости (устойчивости к изменению параметров естественного режима); экологического благополучия / неблагополучия водных объектов; 3 - разработка математического аппарата для оценки состава и свойств водных объектов, законов и специфики их развития и моделей-классификаций интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия разномасштабных водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния или оценки тенденций и перспектив их изменения. Материалами исследования являлись наблюдения мониторингового типа, выполненные в последние годы сотрудниками и студентами СПбГУ на водоемах г. Санкт-Петербурга (Суздальские озера), озерах Ленинградской области [17].

Оценка трофического статуса выполнялась на основе покомпонентной оценки по результатам гидрохимического анализа (11 параметров, 16 шкал) и интегрального оценивания (8 параметров, 9 шкал). Покомпонентная оценка выполнялась в два этапа: с учетом данных предшествующих лет и без учета этих данных, только по данным 2019 года. Оценочные шкалы в трех случаях осреднялись по исходным шкалам нескольких авторов (прозрачность воды, максимальная концентрация общего азота, максимальная концентрация общего фосфора). Для одного параметра – общего фосфора одновременно учитывались две шкалы разных авторов.

При выполнении интегральной оценки учитывались данные 2019 года. В Табл. 1 приведена шкала, полученная в первых этапах работы и использовавшаяся для интегральной оценки трофического статуса водоемов.

**Табл. 1 Шкала интегрального показателя трофического статуса.**

Критерий	Олиготрофия	Мезотрофия	Эвтрофия
Интегральный показатель трофности (ИПТ)	<b>0,00-0,16</b>	<b>0,19-0,40</b>	<b>0,57-1,00</b>

Оценка выполнялась на основе метода композитных индексов (метод сводных показателей) для равновесного учета факторов, учитывался тип связи параметров с оцениваемым свойством (прямая или обратная связь). Нелинейность связей на данном этапе работ не учитывалась. В разработанной классификации близость интегральных показателей к 0,0 свидетельствовала о близости к низко продуктивному классу (олиготрофия), а близость интегральных показателей к 1,0 свидетельствовала о высокопродуктивном статусе водоема (эвтрофные).

На втором этапе работы оценка качества и токсического загрязнения воды в озерах выполнялась на основе классификации (Табл. 2), разработанной авторами для интегральной оценки качества воды, ориентированной на 5 классов качества. Оценка выполнялась на основе метода сводных показателей для равновесного учета факторов, учитывался тип связи параметров с оцениваемым свойством (прямая или обратная связь). В числителе в таблицах приводятся средние значения характеристик, в знаменателе – их нормированные значения. Используемые нормирующие функции приведены нами в большом количестве публикаций, например, в (Дмитриев и др., 2018) и здесь опущены.

Всего использовалось 30 параметров оценивания, разбитых на 3 группы (Табл. 2). В первую группу вошли 13 признаков по группе 1 (физические свойства + химический состав воды). Во вторую группу – 12 признаков, характеризующих токсическое загрязнение воды. В третью группу – 5 признаков, используемые в биологических методах контроля качества воды и ее микробиологического загрязнения.

В конце каждой группы в Табл. 2 приведены значения интегральных показателей по данной группе для всех исследованных озер. В Табл. 2 (последняя строка в каждой группе характеристик) дана оценочная шкала первого уровня свертки, учитывающая равновесное сочетания групп первого уровня. В скобках указан класс качества и близость интегрального показателя к левой или правой границе класса. В разработанной классификации близость интегральных показателей к 0,0 свидетельствует о высоком качестве воды (чистые), близость интегральных показателей к 1,0 свидетельствует о низком качестве воды (грязные).

**Табл. 2 Исходные данные для интегральной оценки качества и токсического загрязнения воды.**

№ п/п	Характеристика	Оценка качества воды Суздальских озер летом 2019 г.		
		Верхнее	Среднее	Нижнее
Признаки по группе 1 (физические свойства + химический состав воды)				
1	Взвешенные вещества, мг/л	40/0,1	26/0,065	15/0,038
2	Прозрачность, м	0,51/0,83	0,65/0,78	0,89/0,70
3	Цветность, град. Pt-Co	39,2/0,33	17,4/0,145	59,5/0,496
4	Водородный показатель pH	7,5/1,00	7,1/1,00	8,0/1,00
5	Азот аммонийный N=NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг N/л	1,14/0,19	1,10/0,183	0,13/0,022

6	Азот нитритный, N–NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг N/л	0,01/0,02	0,01/0,02	0,22/0,44
7	Азот нитратный, N–NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг N/л	0,04/0,007	0,06/0,01	0,55/0,092
8	Азот общий, N <sub>общ.</sub> , мг N/л	1,24/0,083	1,22/0,081	0,98/0,065
9	Минеральный фосфор P–PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг P/л	0,00/0,00	0,00/0,00	0,01/0,011
10	Общий фосфор, P <sub>общ.</sub> , мгP/л	0,069/0,046	0,022/0,015	0,053/0,035
11	Среднегодовое содержание растворённого кислорода (% насыщения)	71,9/0,281	61,0/0,39	118,4/0,0
12	ХПК, мг O/л	21,2/0,424	16,3/0,326	50,8/1,00
13	БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л	1,34/0,058	1,12/0,043	2,31/0,125
	<b>ИПК1</b>	<b>0,259 (IIIл)</b>	<b>0,235 (IIIл)</b>	<b>0,310 (IIIe)</b>
Признаки по группе 2 (токсическое загрязнение воды)				
14	Ртуть, Hg мг/л	<u>0,00001</u> 0,000001	<u>0,00001</u> 0,000001	<u>0,00001</u> 0,000001
15	Кадмий, Cd мг/л	<u>0,0001</u> 0,00001	<u>0,0001</u> 0,00001	<u>0,0001</u> 0,00001
16	Медь, Cu мг/л	<u>0,001</u> 0,00001	<u>0,002</u> 0,00002	<u>0,002</u> 0,00002
17	Цинк, Zn мг/л	<u>0,005</u> 0,000025	<u>0,001</u> 0,00005	<u>0,0</u> 0,0
18	Свинец, Pbмг/л	<u>0,001</u> 0,00001	<u>0,0001</u> 0,000001	<u>0,001</u> 0,00001
19	Хром (общ.) Cr <sub>общ.</sub> , мг/л	<u>0,0003</u> 0,000003	<u>0,0037</u> 0,00005	<u>0,0008</u> 0,00001
20	Никель Ni, мг/л	<u>0,001</u> 0,000007	<u>0,002</u> 0,00001	<u>0,004</u> 0,00002
21	Мышьяк As, мг/л	<u>0,005</u> 0,001	<u>0,005</u> 0,001	<u>0,005</u> 0,001
22	Железо общее Fe <sub>общ.</sub> , мг/л	<u>0,03</u> 0,000004	<u>0,07</u> 0,00001	<u>0,049</u> 0,000007
23	Марганец Mn, мг/л	<u>0,73</u> 0,0002	<u>2,64</u> 0,0009	<u>0,03</u> 0,00001
24	Нефть и нефтепродукты, мг/л	<u>0,021</u> 0,00002	<u>0,009</u> 0,00001	<u>0,013</u> 0,00001

25	Фенолы, мг/л	$\frac{0,024}{0,00027}$	$\frac{0,026}{0,00029}$	$\frac{0,045}{0,0005}$
	<b>ИПК2</b>	<b>0,00013 (Iл)</b>	<b>0,00020 (Iл)</b>	<b>0,00013 (Iл)</b>
Признаки по группе 3 (биологические характеристики качества воды)				
26	Биомасса фитопланктона, мг/л	$\frac{2,8}{0,018}$	$\frac{3,3}{0,021}$	$\frac{11,1}{0,073}$
27	Хлорофилл а, мкг/л в фитопланктоне	$\frac{13,60}{0,022}$	$\frac{13,84}{0,022}$	$\frac{57,67}{0,133}$
28	Хлорофилл а, мкг/л в перифитоне	$\frac{91,0}{0,218}$	$\frac{401,9}{1,00}$	$\frac{187,6}{0,462}$
29	Индекс сапробности по зоопланктону	$\frac{1,31}{0,147}$	$\frac{1,39}{0,162}$	$\frac{1,58}{0,196}$
30	Степень токсичности проб воды (значение токсичности для проб природной и питьевой воды без разбавления А, %)	$\frac{36}{0,36}$	$\frac{16}{0,16}$	$\frac{13}{0,13}$
	<b>ИПК3</b>	<b>0,153 (IIIл)</b>	<b>0,273 (IIIс)</b>	<b>0,199 (IIIл)</b>

Обоснование и примеры использования метода сводных показателей для интегральной оценки качества природных вод приводятся в большом количестве наших работ, например, в работе [8].

В Табл. 3 приведены интегральные показатели качества для первого и второго уровней свертки. Построение ИПК включало в себя следующие этапы:

1-отбор необходимых и достаточных критериев оценивания; введение классов качества;

2-выбор или построение оценочных шкал для каждого параметра оценивания;

3-выбор нормирующих функций с учетом вида связи параметров с оцениваемым качеством воды (прямая/обратная) и линейности/нелинейности связи. Задание значений min и max характеристик в шкалах;

4-выбор синтезирующей функции (вида интегрального показателя), например, в нашем случае, сумма нормированных значений параметров, взятых со своим весом;

5-построение оценочных шкал ИПК для всех групп показателей и на втором уровне свертки (между группами). Решение проблемы задания весов (приоритетов) для характеристик внутри групп и между группами. В рассмотренном примере была принята равновесность учета параметров внутри групп и равный вес групп на втором уровне свертки показателей;

6-расчет ИПК для групп характеристик и на последнем уровне свертке (между группами) по правилам построения обучающей классификации;

7-выявление классов качества, динамики временного изменения ИПК, зонирование акваторий по величинам ИПК и т.п.

**Табл. 3. Оценочные шкалы интегрального показателя качества воды (ИПК) для первого (внутри групп) и второго (между группами) уровней свертки показателей.**

Шкала интегрального показателя качества воды по группе 1 (ИПК1)	0,00-0,174	0,174-0,237	0,237-0,448	0,448-0,753	0,753-1,00
Шкала интегрального показателя качества воды по группе 2 (ИПК2)	0,00-0,014	0,014-0,058	0,058-0,308	0,308-0,675	0,675-1,00
Шкала интегрального показателя качества воды по группе 3 (ИПК3)	0,00-0,092	0,092-0,165	0,165-0,392	0,392-0,609	0,609-1,00
<b>Шкала интегрального показателя качества воды по всем группам (ИПК)</b>	<b>0,00-0,093</b>	<b>0,093-0,153</b>	<b>0,153-0,383</b>	<b>0,383-0,679</b>	<b>0,679-1,00</b>

На третьем этапе работы выполнялась оценка устойчивости к изменению параметров, характеризующих физико-географические свойства, климатические параметры, гидрологический режим (потенциальная устойчивость). Оценка выполнена на основе балльно-индексного подхода и на интегральной основе.

Первый метод оценки устойчивости (уязвимости) водоемов к изменению параметров режимов, использованный для оценки устойчивости Суздальских озер, разработан на основе балльно-индексного подхода.

В этом подходе параметры устойчивости (уязвимости) водных экосистем объединены нами в экспертную балльно-индексную систему, которая учитывает региональные особенности водных объектов и дает возможность в пределах изменения заложенных в них параметров, провести сравнительную оценку устойчивости (уязвимости) водных экосистем к воздействию.

Оценка устойчивости (уязвимости) водоемов проводилась путем последовательного суммирования индексов для соответствующих признаков оценивания, разрядов и баллов по таблицам; получения суммарной балльной оценки и нахождению в итоге класса и подкласса устойчивости (уязвимости водоема) [8]. Таким образом, сначала необходимо было последовательно просуммировать индексы, затем разряды, в соответствии с примечаниями к каждой таблице. После этого по сумме разрядов найти баллы уязвимости (семейство уязвимости), прибавить к ней баллы трофности или баллы качества вод (род уязвимости) и по полученной сумме баллов найти класс и подкласс уязвимости водоема (комбинация семейств и родов). По нашим представлениям устойчивость к антропогенному эвтрофированию и устойчивость к изменению качества воды и токсическому загрязнению необходимо оценивать отдельно, не смешивая эти понятия.

Второй метод оценки устойчивости основан на интегральной оценке потенциальной



устойчивости по следующим характеристикам: 1 - площадь поверхности водоема, км<sup>2</sup>; 2 – объем водоема, км<sup>3</sup>; 3 - максимальная глубина, м; 4 - средняя температура воды в летний период, °С; 5 - продолжительность ледостава, месяцы; 6 - наличие сезонной стратификации, баллы; 7 - вертикальное перемешивание, кол-во раз за год; 8 - внутригодовая амплитуда колебаний уровня воды в водоеме, м; 9 - условия проточности водоема, баллы; 10 - характер регулирования, баллы; 11 - коэффициент водообмена. Первому классу соответствует максимальная устойчивость (характеризуется близостью интегрального показателя к 0,0). Пятому классу соответствует минимальная устойчивость (характеризуется близостью интегрального показателя к 1,0). При нормировании показателей использовались те же функции, что и при оценке трофического статуса и качества воды. В таблице 4 приведена шкала интегрального показателя устойчивости, рассчитанная по 11 параметрам оценивания для равновесного задания характеристик.

На основе Табл. 4 и исходных данных по озерам рассчитывались ИПУ озер, и делался вывод о классе потенциальной устойчивости по величине интегрального показателя, а также близости ИПК к левой или правой границе классов.

**Табл. 4** Оценочная шкала интегральной оценки потенциальной устойчивости

водоемов.	Классы устойчивости				
	I	II	III	IV	V
	устойчивый (низко уязвимый)	устойчивость выше среднего	средне устойчивый	устойчивость	неустойчивый (высокоуязвимый)
<b>Шкала интегрального показателя устойчивости (ИПУ)</b>	<b>0-0,240</b>	<b>0,240-0,473</b>	<b>0,473-0,705</b>	<b>0,705-0,845</b>	<b>0,845-1</b>

### Результаты исследования и их обсуждение

**Оценка трофического статуса озер.** Покомпонентная оценка трофического статуса озер, выполнялась: 1 - по результатам предыстории изучения озер и 2 - наблюдений 2019 г. за химическим составом воды и ее физическим свойствами.

В первом случае Верхнее Суздальское озеро по 3 шкалам отнесено к классу «олиготрофия», по 7 шкалам – к классу «мезотрофия», по 6 шкалам – к классу «эвтрофия». Среднее Суздальское озеро по 5 шкалам отнесено к классу «олиготрофия», по 5 шкалам – к классу «мезотрофия», по 6 шкалам – к классу «эвтрофия». Нижнее Суздальское озеро по 2 шкалам отнесено к классу «олиготрофия», по 1 шкале – к классу «мезотрофия», по 13 шкалам – к классу «эвтрофия» и выше. Подтвердилась известная в оценочных исследованиях ситуация: многокритериальность порождает несравнимость результатов оценивания.

Во втором случае Верхнее Суздальское озеро по 1 шкале оценивания отнесено к классу «олиготрофия», по 3 шкалам – к классу «мезотрофия», по 4 шкалам – к классу «эвтрофия». Среднее Суздальское озеро по 3 шкалам отнесено к классу «олиготрофия», по 2 шкалам – к классу «мезотрофия», по 3 шкалам – к классу «эвтрофия». Нижнее Суздальское озеро по 1 шкале отнесено к классу «олиготрофия», по 1 шкале – к классу «мезотрофия», по 6 шкалам – к классу «эвтрофия». На этом основании, с оговоркой, что учитывались только весенне-летние данные 2019 г., сделан вывод о том, что Верхнее Суздальское озеро можно отнести к классу мезотрофных водоемов на 44% или мезотрофно-эвтрофному типу на 80% (по 16 шкалам с учетом предыстории за другие годы) или к мезотрофно-эвтрофному типу на 87,5% (по 8 шкалам с учетом только данных 2019 г.).

Среднее Суздальское озеро с равным основанием (31-32%) можно отнести к олиго-, мезо- и эвтрофному типу (по 16 шкалам) или с вероятностью 37,5-25-37,5% к тем же классам (по 8 шкалам).

Нижнее Суздальское озеро с вероятностью 81% по 16 шкалам можно отнести к классу эвтрофных водоемов или на 75% к классу эвтрофных водоемов по 8 шкалам.

На следующем этапе выполнено построение интегрального показателя трофического статуса озер (ИПТ) по 9 шкалам для 2019 г. Получены следующие результаты: оз. Верхнее Суздальское: ИПТ= 0,63 (Эл); оз. Среднее Суздальское: ИПТ= 0,39 (Мп); оз. Нижнее Суздальское: ИПТ= 0,58 (Эл).

По совокупности критериев оценивания при интегральной оценке Верхнее и Нижнее Суздальские озера могут быть отнесены к левой границе класса эвтрофных водоемов, а оз.Среднее Суздальское можно отнести к правой границе мезотрофного класса. Можно отметить, что эти результаты не противоречат результатам покомпонентного оценивания, рассмотренным для Верхнего и Нижнего Суздальских озер, и проясняют ситуацию со Средним Суздальским озером.

**Оценка качества и токсического загрязнения озер.** В Табл. 5 приведены сводные данные по всем группам признаков оценки качества воды (Табл. 2,3) и сделан вывод о результатах интегральной оценки качества по величине ИПК.

В целом было получено, что основной вклад в сводную оценку дают параметры первой и третьей групп. По первой группе (13 параметров) качество воды в Суздальских озерах характеризуется величинами ИПК1: Верхнее ИПК1=0,259 (Шл); Среднее ИПК1=0,235 (Шл); Нижнее ИПК1=0,310 (Шс).

Оценка токсического загрязнения воды озер (вторая группа параметров) позволила отнести воду (по 12 характеристикам) к I классу качества. Отсутствие токсического загрязнения воды озер в период наблюдений летом 2019 года обусловило низкие значения ИПК2.

По третьей группе характеристик (5 характеристик) на результаты ИПК2 повлияла величина содержания хлорофилла «а» в перифитоне Среднего Суздальского озера 401,9 мкг/л. Учет этого значения обусловил оценку ИПК2 = 0,273 (Шс) при ширине III-го класса по величине ИПК 0,165-0,392.

По второму уровню свертки показателей Верхнее Суздальское озеро в летний период 2019 по совокупности всех 30 параметров отнесено к правой границе II класса качества («слабо загрязненные») ИПК=0,137 (Шп) при ширине класса 0,093-0,153.

Среднее Суздальское озеро в летний период 2019 по совокупности всех 30 параметров отнесено к левой границе III-го класса («загрязненные») ИПК=0,169 (Шл) при ширине класса 0,153-0,383.

Нижнее Суздальское озеро в летний период 2019 по совокупности всех 30 параметров отнесено также к левой границе III-го класса качества воды (загрязненные) ИПК=0,170 (Шл) при ширине класса 0,153-0,383.

Наибольший вклад в формирование качества воды в Верхнем и Нижнем озерах вносит первая группа факторов, в Среднем Суздальском озере – третья группа.

**Табл. 5 Результаты интегральной оценки качества воды (второй уровень свертки).**

№ п/п	ИПК по группам	Оценка качества воды Суздальских озер летом 2019 г.		
		Верхнее	Среднее	Нижнее
1	ИПК1	0,259 (Шл)	0,235 (Шл)	0,310 (Шс)
2	ИПК2	0,00013 (Лл)	0,00020 (Лл)	0,00013 (Лл)
3	ИПК3	0,153 (Шп)	0,273 (Шс)	0,199 (Шл)
4	<b>Интегральный показатель качества воды по всем группам (ИПК)</b>	<b>0,137 (Шп)</b>	<b>0,169 (Шл)</b>	<b>0,170 (Шл)</b>

Далее целесообразно выявить также сезонные изменения качества воды по ИПК и возможное изменение вклада отдельных групп параметров в итоговую оценку. При выявлении повышенного загрязнения озер весной (осенью, зимой) можно будет определить величину изменчивости ИПК внутри года. Оценка качества воды можно выполнить также с учетом токсического загрязнения донных отложений озер. При наличии их высокого загрязнения результаты сводной оценки изменятся в сторону большего загрязнения. Уточнение оценки возможно также на основе привлечения дополнительных характеристик и групп характеристик для интегральной оценки качества воды, например, привлечение параметров, отражающих состояние его береговой зоны. Использование в дальнейших исследованиях гидробиологических данных позволит выполнить интегральную оценку по большему числу параметров и получить более надежные результаты.

**Интегральная оценка устойчивости озер.** Выполнена интегральная оценка потенциальной устойчивости озер. Для этого была получена оценочная шкала для интегральной оценки устойчивости водоемов (Табл. 6).

Сделан вывод о том, что Суздальские озера характеризуются величинами интегральных показателей потенциальной устойчивости (ИПУ): Верхнее ИПУ=0,601 (IIIп); Среднее ИПУ=0,629 (IIIл); Нижнее ИПУ=0,545 (IIIл). Таким образом, все Суздальские озера по результатам интегральной оценки также относятся к III классу потенциальной устойчивости и являются среднеустойчивыми (интервал изменения ИПУ для класса 0,473-0,705). Последующие расчеты интегральных показателей устойчивости позволят определить класс устойчивости и величины ИПУ при оценке потенциальной устойчивости + устойчивости к антропогенному эвтрофированию водоемов или потенциальной устойчивости + устойчивости к изменению качества воды в них. На основе расчетов таких ИПУ можно будет выявить, способны ли экосистемы озер к сохранению того класса (трофности, качества воды, устойчивости), в котором они находились до оказанного (планируемого) воздействия или перейдут в другие классы, характеризующие большую уязвимость водоемов.

**Табл. 6 Исходные данные для интегральной оценки потенциальной устойчивости Суздальских озер.**

Признаки	Оценка качества воды Суздальских озер летом 2019 г.		
	Верхнее	Среднее	Нижнее
<b>ИПУ</b>	<b>0,601 (IIIп)</b>	<b>0,629 (IIIл)</b>	<b>0,545 (IIIл)</b>

### **Выводы**

Рассмотрены теоретико-методологические основы и акценты гидрологических, экологических, геоэкологических исследований водных объектов в России и зарубежом, разработаны основы интегральной оценки экологического статуса водоемов. Под экологическим статусом водоема понимается интегративное (сложное, эмерджентное) свойство, характеризующее его способность продуцировать органическое вещество в соответствии с фазой исторического развития водоема, его качество и токсическое загрязнение воды, потенциальную устойчивость (уязвимость) водоема к изменению параметров естественного режима. Для оценки геоэкологического статуса рекомендуется дополнительно оценивать качество и токсическое загрязнение донных отложений, и состояние береговой зоны.

Рассмотрены примеры, в которых интегральная оценка составляющих экологического статуса водоемов выполнялась по следующим группам (блокам) характеристик: 1 - трофический статус водоема (8 параметров); 2 - качество и токсическое загрязнение воды (три группы характеристик, содержащих 13, 12 и 5 характеристик); 3-

потенциальная устойчивость водоема (11 параметров).

По результатам интегральной оценки трофического статуса водоемов Верхнее и Нижнее Суздальские озера отнесены к левой границе класса эвтрофных водоемов, а оз. Среднее Суздальское - к правой границе мезотрофного класса. По результатам интегральной оценки качества и токсического загрязнения воды Верхнее Суздальское озеро отнесено к правой границе II класса («слабо загрязненные»), Среднего – к левой границе III класса («загрязненные»), Нижнего – также к левой границе III класса («загрязненные»). По результатам интегральной оценки потенциальной устойчивости все Суздальские озера отнесены к III классу потенциальной устойчивости и являются среднеустойчивыми.

Последующие расчеты интегральных показателей позволят определить сочетание составляющих экологического статуса при разных приоритетах (весах) для первого и последующих уровней свертки показателей, подтвердят возможность учета информации для оценки весов [20; 31]. На основе расчетов ИПУ всех уровней свертки показателей появится возможность выявить, способны ли экосистемы озер к сохранению того класса (трофности, качества воды, устойчивости), в котором они находились до оказанного (планируемого) воздействия или перейдут в другие классы, определится ближайшая тенденция изменения экологического статуса водоемов.

#### **Благодарности**

Авторы выражают признательность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за поддержку исследований в рамках выполнения гранта №19-05-00683-а, а также Оргкомитету Международной конференции «ЧЕТВЕРТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ. ГИДРОЛОГИЯ: ОТ ПОЗНАНИЯ К МИРОВОЗЗРЕНИЮ» за организацию работ и проведение конференции.

#### **Acknowledges**

The authors express their gratitude to the Russian Foundation for Basic Research for supporting research under grant no. 19-05-00683-a, as well as to the organizing Committee Of the international conference "FOURTH VINOGRADOV READINGS. HYDROLOGY: FROM COGNITION TO THE WORLDVIEW" for the organization of work and conduct of the conference.

#### **Список литературы**

1. *Абакумов, В.А.*, 2012. Новое в изучении современных проблем наук об окружающей среде и экологии, включая исследования водных экосистем и организмов. Успехи наук о жизни. №5, с.121-126.
2. *Александрова, Л. В., Васильев, В. Ю., Дмитриев, В. В., Мясникова, Н. В., Огурцов, А. Н., Третьяков, В. Ю., Хованов, Н. В.*, 2000. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. ВИНТИ 2342V00. URL: <https://clck.ru/G5sC2> (дата обращения: 17.05.2019).
3. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций, 2010. М., 636 с.
4. ГОСТ 22.0.03-97, 2000. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные и чрезвычайные ситуации. Термины и определения. Минск, ИПК Издательство стандартов, 12 с.
5. ГОСТ Р 22.0.02-94., 2000. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. М.: ИПК Издательство стандартов, 13 с.
6. ГОСТ Р 22.0.11-99., 2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Предупреждение природных чрезвычайных ситуаций. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 6 с.
7. *Дмитриев, В.В., Зуева, Н.В., Огурцов, А.Н., Примаков, Е.А.*, 2019. Экологический статус и экологическое благополучие водного объекта: аксиология и оценка. Труды III

Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: ХИМИЗДАТ, с. 297-300.

8. *Дмитриев, В.В., Огуцов, А.Н., Васильев, В.Ю., Третьяков, В.Ю.*, 1999. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. IV. Токсическое загрязнение воды и грунтов Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. №1, с. 40-53.

9. *Дмитриев, В.В., Огуцов, А.Н.*, 2014. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем. Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география 4, с. 114-130.

10. *Коронкевич, Н.И., Барабанова, Е.А., Зайцева, И.С.*, 2010. Наиболее опасные проявления экстремальных гидрологических ситуаций на территории России., 7 с.

11. *Магрицкий, Д.В.*, 2018. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: Вопросы терминологии и классификации, 28 с.

12. Методические рекомендации по организации и проведению мероприятий, направленных на снижение последствий весеннего половодья и паводков – Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2000. Москва, 113 с.

13. Паспорт специальности ВАК 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. Электронный ресурс: URL: <https://teacode.com/online/vak/p25-00-27.html> (дата обращения: 05.03.2020).

14. Паспорт специальности ВАК 25.00.36 Геоэкология (Науки о Земле). Электронный ресурс: <https://teacode.com/online/vak/p25-00-36.html> (дата обращения 04.03.2019).

15. Проблемы гидрологии и гидроэкологии, 1999. Под ред. Н.И. Алексеевского Сборник статей МГУ им. М.В.Ломоносова. Геогр. фак. М. Вып.1, 399 с.

16. РД 52.04.563-2002., 2003. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. СПб.: Гидрометеониздат, 31 с.

17. *Седова, С.А., Дмитриев, В.В., Четверова, А.А.*, 2019. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621679 «База данных для выявления экологического статуса и факторов массообмена в водной экосистеме на примере озера «Суури» (LAKE-SUURI-ECOSYSTEM). Дата регистрации: 26.09.2019: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41182581>.

18. *Семенченко, В.П., Разлуцкий, В.И.*, 2011. Экологическое качество поверхностных вод. Беларуская навука, Минск.

19. *Фролова, Н.Л.*, 2012. Гидроэкологическая безопасность водопользования. Дисс. на соиск. уч. ст. докт. геогр. наук по спец. 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. М. МГУ, 328 с.

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

21. Экстремальные гидрологические ситуации, 2010. Отв. ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. М.: Москва-ПРЕСС, 464 с.

22. *Asbjornsen, H., Goldsmith, G.R., Alvarado-Barrientos, M.S., Rebel, K., van Osch, F.P., Rietkerk, M., Chen, J., Gotsch, S., Tobon, C., Geissert, D.R.*, 2011. Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. J. Plant Ecol. 4, pp. 3–22.

23. *Barton, D.N., Andersen, T., Bergland, O., Engebretsen, A., Jannicke Moe, S., Orderud, G.I., et al.*, 2016. Eutropia – integrated valuation of Lake Eutrophication abatement

decisions using a bayesian belief network. In: Neal, Z.P. (Ed.), Handbook of Applied System Science. Routledge, pp. 297–320.

24. *BayesFusion, L.L.C.*, 2019. GeNie Modeler: Complete Modelling Freedom. (Accessed 4 September 2019). <https://www.bayesfusion.com/genie/>.

25. *Costanza, R., d'Arge, R. de Groot et al*, 1997. The value of the worlds ecosystem services and natural capital // *Nature*, Vol. 386, pp. 253–260.

26. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327 , 22/12/2000, pp. 0001 – 0073.

27. *Hydroecology and Ecohydrology, Past, Present and Future*, 2008. Ed. P.J. Wood, D.M. Hannah, J.P. Sadler, p. 460.

28. Eugenio, Molina-Navarro, Pedro, Segurado, Paulo, Branco, Carina, Almeida, Hans E., Andersen, 2020. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks. *Limnologica*, p. 80.

29. *Grizzetti, B., Pistocchi, A., Liquete, C., Udias, A., Bouraoui, F., van de Bund, W.*, 2017. Human pressures and ecological status of European rivers. *Sci. Rep.* 7, p. 205.

30. *Hering, D., Carvalho, L., Argillier, C., Beklioglu, M., Borja, A., Cardoso, A.C., et al.*, 2015. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — an introduction to the MARS project. *Sci.Total Environ.* 503–504, pp. 10–21.

31. *Hovanov, N., Hovanov, K., Yudaeva, M.* 2009. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert nonnumeric, non-exact and non-complete knowledge. *European Journal of Operational Research*, 195(3), pp 857-863.

32. *Kristensen, P.*, 2012. *European Waters: Assessment of Status and Pressures*. European Environmental Agency, Copenhagen.

33. *Maciej, Zalewski*, 2007. *Ecohydrology in the face of the Anthropocene*, pp. 99-100.

34. *Maciej, Zalewski, Michael, McClain, Saeid, Eslamian*, 2016. *Ecohydrology – the background for the integrative sustainability science*, pp. 71-73.

35. *Ostroumov, S.A.*, 2010. Biocontrol of water quality: Multifunctional role of biota in water self-purification. *Rus. J. Gen. Chem.*, 80 (13): 2754-2761. DOI: 10/1134/51070363210130086.

36. *Tibor, Erős, Winsor, H. Lowe*, 2019. *The Landscape Ecology of Rivers: from Patch-Based to Spatial Network Analyses Current Landscape Ecology Reports* <https://doi.org/10.1007/s40823-019-00044-6>, pp.103–112.

37. *Yating, Tang, Lucy, Marshall, Ashish, Sharma, Hoori, Ajami*, 2018. A Bayesian alternative for multi-objective ecohydrological model specification.

38. *Yongping, Wei, Ray, Ison, Andrew, W, Western, Zhixiang, Lu*, 2018. *Understanding ourselves and the environment in which we live*, pp. 161-166.