



На правах рукописи

Панютин Николай Алексеевич

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА
И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ВОДНЫХ
ОБЪЕКТОВ**

1.6.21 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
географических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Научный руководитель: **Дмитриев Василий Васильевич**, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши Института наук о Земле, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Официальные оппоненты: **Субетто Дмитрий Александрович**, доктор географических наук, декан факультета географии, заведующий кафедрой физической географии и природопользования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Шмакова Марина Валентиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования института озераедения Российской академии наук - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Защита состоится 16 сентября 2026 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, конференц-зал лаборатории спутниковой океанографии, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета: <https://www.rshu.ru/university/dissertations>.

Автореферат разослан «___»_____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Я.А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность исследования обусловлена: 1 – отсутствием в современной отечественной и зарубежной литературе общепринятых, унифицированных представлений об «экологическом статусе» (ЭС) как интегративном (эмерджентном) свойстве эко- и геосистем; к таким представлениям относятся теоретико-методологические обобщения, методы, методики, технологии оценки ЭС водных объектов и получения интегральных показателей экологического статуса (ИПЭС) на основе многокритериального и многоуровневого представления информации о продукционном потенциале системы; качестве и токсическом загрязнении воды, потенциальной устойчивости водоема к изменению параметров режимов; 2 – необходимостью разработки представлений об экологическом благополучии (ЭБ) природных и общественных систем, отсутствием общепринятых классификаций «здоровья водных экосистем» или экологического благополучия/неблагополучия водных объектов; 3 – отсутствием в ГОСТах, СНИПах, сводах правил (СП), руководящих документах (РД), ОВОСах методов оценки интегративных свойств и функций, позволяющих на интегральной основе определить ЭС и ЭБ водных объектов, причины и последствия их изменений; 4 – необходимостью выявления степени антропогенной трансформации эко- и геосистем на основе изменения их интегративных свойств (ЭС и ЭБ), получения ответной реакции на внешнее воздействие и пределов воздействия на сложные системы в природе и обществе; 5 – необходимостью совершенствования геоэкологического мониторинга водных объектов; использования алгоритма и методики интегральной оценки ЭС и ЭБ для разработки систем поддержки принятия решений.

Работа соответствует п. 19 Перечня приоритетных направлений научно-технологического развития и входит в перечень важнейших наукоемких технологий (утвержден Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. N 529): «Мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и изменения климата (в том числе ключевых районов Мирового океана, морей России, Арктики и Антарктики), технологии предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, негативных социально-экономических последствий».

Целью исследования является разработка теоретико-методологических положений об ЭС и ЭБ водоемов, моделей-классификаций их интегральной оценки, учитывающих многокритериальность, иерархичность организации природных систем, их эмерджентных свойств и функций.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие основные задачи:

1. Обобщение и разработка теоретико-методологических положений и авторского представления об ЭС и ЭБ водных объектов как интегративных свойствах водных эко- и геосистем;
2. Разработка методики интегральной оценки потенциальной устойчивости водоема;
3. Разработка моделей-классификаций интегральной оценки ЭС и ЭБ водных объектов; оценка влияния параметров моделей-классификаций на полученные результаты интегральной оценки: учет нелинейности связей, использование *ннн*-информации для расчета весовых коэффициентов;
4. Применение моделей-классификаций для интегральной оценки ЭС и ЭБ ключевых водоемов и системы «водоем+водосбор», создания типизации их интегративных свойств;
5. Выявление особенностей трансформации геосистем при внешнем воздействии на основе сценарного подхода и интегральной оценки ЭС и ЭБ ключевых объектов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе разработки представлений об ЭС и ЭБ водных объектов, моделей-классификаций для их интегральной оценки – инновационного продукта мониторинга состояния эко- и геосистем, выполнена интегральная оценка состояния водных объектов, их эмерджентных свойств и функций с учетом дефицита информации о составе и приоритетах оценивания, и оценки точности полученных результатов.

2. Методика интегральной оценки потенциальной устойчивости базируется на одновременном учете адаптационного и регенерационного типов устойчивости. Первый тип характеризует замедленное изменение свойств, параметров, функций, с сохранением элементов режимов водоема, типичных для холодного времени года. Второй тип характеризует ускорение процессов переноса и трансформации вещества, самоочищения в теплый период года. Итоговое значение интегрального показателя (ИП) устойчивости предложено определять с учетом степени проточности водоема или обоснованием приоритета одного из типов устойчивости.

3. Разработанные классификации, методика, технология построения ИПЭС прошли апробацию на водоемах Северо-Запада России и Алтая с проверкой гипотез и рекомендаций по расчету интегральных показателей. ЭБ для системы «водоем+водосбор» выполняется на интегральной основе по величинам ИПЭБ. Исследования учета нелинейности связей параметров с оцениваемым свойством позволяют сравнить результаты влияния нелинейности на полученные значения ИП. Выполнены исследования по изменению приоритетов (весов) субиндексов на последнем уровне свертки при расчетах ИПЭС. Проверена гипотеза о возможности использования искусственного интеллекта (ИИ) для расчета весовых коэффициентов и показателей ИПЭС с оценкой точности полученных результатов.

4. Оценка ответной реакции водных экосистем на естественное изменение параметров режимов и внешнее воздействие выполнена на интегральной основе по сокращенной программе с использованием субиндексов, полученных в вариантах до воздействия. Показаны возможности и условия перехода озер в более низкую категорию ЭС и ЭБ с изменением нагрузки для ответа на вопрос: способна ли система сохранить свой статус в пределах класса ЭС и/или ЭБ, в котором она находилась до воздействия.

Методы исследования:

Методика исследования носит оригинальный характер и основана на многокритериальном (многопараметрическом) и многоуровневом представлении показателей. При подготовке диссертации использовался дедуктивный подход, проявляющийся во введении в методологию исследования аксиологии и аксиометрии; гипотез. В работе также применялся индуктивный подход, реализующийся в разработке многокритериальной основы получения интегральных показателей трофического статуса, качества воды, потенциальной устойчивости; ЭС водоемов. При формулировке представлений об ЭС, технологии построения оценочных шкал и задания приоритетов оценивания использовались: системный подход и анализ, аксиометрия (экологическая квалиметрия), основные принципы системологии. При сборе данных и анализе результатов использовались методы мониторинговых наблюдений на водоемах, статистические методы анализа рядов наблюдений. При оценке воздействия на водоемы использовался сценарный подход, при котором было рассмотрено несколько сценариев изменения параметров на основе сокращенной и полной программ исследования.

Научная новизна исследования:

1. Созданы новые авторские определения; разработаны новые модели-классификации и методики расчета интегральных показателей ЭС и ЭБ водных объектов на основе мониторинговой информации об учитываемых параметрах с учетом дефицита информации о приоритетах оценивания.

2. Разработана новая методика интегральной оценки потенциальной устойчивости водоемов.

3. Разработана полная и сокращенная программы интегральной оценки ЭС и ЭБ.

4. Проведена апробация разработанных моделей-классификаций на водных объектах Северо-Запада России и приледниковых моренно-подпрудных озер Алтая, различающихся по размерам и морфометрическим показателям, климатическим и гидрологическим условиям, показателям состава воды и физическим свойствам водоемов, их потенциальной устойчивостью.

5. Выполнена типизация водоемов на основе разработанных моделей-классификаций ЭС и ЭБ для вариантов возможного изменения продуктивности, качества воды, потенциальной устойчивости. Предложен алгоритм оценки ответной реакции водных экосистем озер на внешнее воздействие на основе сокращенной программы расчета интегральных показателей.

Объектами исследования являются: озеро Волковское (Суури) в северо-западном Приладожье и его водосборная территория, а также два приледниковых озера Алтайских гор: оз. Лагерное в горном массиве Монгун-Тайга и оз. Барсово – в Таван-Богдо-Ола.

Теоретическая значимость полученных результатов состоит в разработке теоретико-методологических основ современного системного представления об ЭС и ЭБ водных объектов и водосборных территорий на основе широкого спектра натуральных данных, собранных в различных физико-географических и климатических условиях и разработанных моделей-классификаций для построения интегральных показателей ЭС и ЭБ. Теоретическая значимость раскрывается также в структурировании разрозненных данных, в совершенствовании представлений об объектах исследования, как о сложных системах, имеющих аддитивные, а также присущие системам в целом, т.н. эмерджентные свойства, в отказе от традиционных методов их оценки на основе покомпонентного анализа и переходе на многокритериальный и многоуровневый учет этих свойств на основе разработанных моделей-классификаций их оценки.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности применения методик и подхода в системных геоэкологических исследованиях для получения количественной информации о состоянии природно-трансформированных систем в целом, оценке их системных свойств и функций. Созданы прикладные инструменты: алгоритмы и методики, оценочные шкалы и расчетные модули, модели классификации, типизация; получены рекомендации для построения интегральных показателей. Рассмотрен пример использования ИИ для выполнения и проверки расчетов ИП, оценки точности расчетов. Намечены возможности совершенствования систем управления, мониторинга и принятия решений для включения рассмотренных алгоритмов в ГИСы; использование информационной базы и алгоритмов интегральной оценки для разработки и принятия природоохранными организациями решений по снижению негативных последствий воздействия опасных природных явлений (ОПЯ), опасных гидрологических явлений (ОГЯ) на геосистемы, человека (общество).

Важным для практического использования полученных результатов является опыт оценки точности задания приоритетов (весов) и результатов построения оценочных шкал и самих интегральных показателей, влияния на точность расчетов вида нормирующей функции и приоритетов в задании субиндексов, оценка внешнего воздействия на водные объекты; опыт и особенности оценки потенциальной устойчивости, трофического статуса, качества и загрязнения воды с точки зрения антропо- и биоцентризма.

Личный вклад автора. Личный вклад автора в создание диссертации выражается в сборе, обработке, подготовке и обобщении натуральных данных, разработке новых моделей-классификаций (классификация + алгоритмы + правила построения оценочных шкал и расчета ИП) для оценки ЭС и ЭБ водоемов. Автор самостоятельно предложил и поэтапно реализовал новые модели, получил оценочные шкалы для субиндексов, рассчитал все ИП. На основе реализации всех этапов получил оценочные шкалы последних уровней свертки для ИПЭС и ИПЭБ. Эти шкалы положены в основу методики интегральной оценки ЭС и ЭБ рассмотренных водоемов и водосборных территорий.

Автор участвовал в написании статей и публикаций по теме исследования, проявлял инициативу и желание очно выступать с обсуждением результатов работы, самостоятельно планировал поездки и издательские расходы на конференции. Все это способствовало приобретению опыта и распространению знаний о развиваемом в Институте наук о Земле СПбГУ научном направлении по интегральному оцениванию состояния сложных систем в природе и обществе, их эмерджентных свойств и функций. Автор принимал участие в грантах: грант Российского научного фонда №23–27–10011; грант РФФИ № 19–05–00535 А.

Апробация работы. Результаты данного исследования были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: XXI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» в Вологде (декабрь 2023 г.); IV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Геоэкология и рациональное недропользование: от науки к практике» в Белгороде (октябрь 2024 г.); VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры географической экологии Белорусского государственного университета «Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии» в Минске (ноябрь 2024 г.); Международной научно-технической конференции "Экология и техносферная безопасность" (RusEcoCon – 2025) в Сочи (март 2025 г.); III международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» в Казани (май 2025 г.); X Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» в Перми (май – июнь 2025 г.); Шестых Виноградовских чтениях. Гидрология нового поколения. Международная научная конференция памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова в Санкт–Петербурге (октябрь 2025 г.).

Публикации. По теме исследования опубликовано 16 статей (13 на русском, 3 на английском языке). Все статьи опубликованы в периодических изданиях: 7 статей в изданиях, включенных в список ВАК; 4 статьи в изданиях, включенных в список Web of Sciences/Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа содержит 169 страниц, включает список сокращений и обозначений, 22 иллюстрации и 23 таблицы в основном тексте, 2 таблицы в приложениях №1 и №2. Список литературы содержит 202 работы отечественных и зарубежных (34% на английском языке) авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлены цели и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, актуальность и новизна научной работы, а также ее теоретическая и практическая значимость. Приведен список публикаций и конференций по теме исследования.

В **Главе 1** приводятся теоретико-методологические основы разработки методики и выполнения интегральной оценки состояния сложных природных систем, их эмерджентных свойств и функций. Особое внимание отводится ЭС и ЭБ водоемов. В работе под экологическим статусом (ЭС) водоема понимается параметрическое

сочетание трофности, качества и токсического загрязнения воды и потенциальной устойчивости водоема. При оценке ЭБ дополнительно учитывались: разнообразие состава биоты и абиотической среды; скорость загрязнения и способность к самоочищению, социально-экономические функции и функции жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводство); способность сохранять перечисленные выше функции и свойства продолжительное время в условиях изменяющегося состава среды и биоты. На рис. 1 приведена схема субиндексов и этапов выполнения интегральной оценки ЭС водоема.



Рис. 1. Схема субиндексов и этапов выполнения интегральной оценки экологического статуса водоема.

На рис. 2 приведена схема субиндексов и выполнения этапов интегральной оценки ЭС и ЭБ системы «водоем+водосбор» с позиции антропоцентризма.

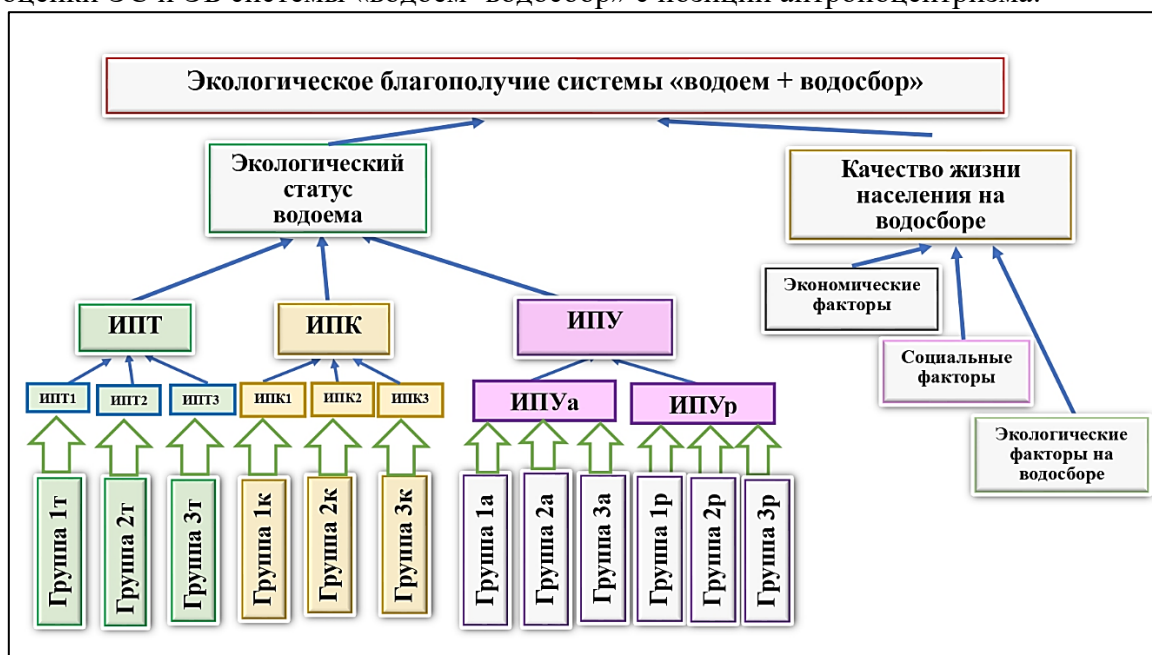


Рис. 2. Схема субиндексов и этапов интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия системы «водоем+водосбор» с позиции антропоцентризма.

В главе описана история развития методов оценки ЭС и ЭБ. Подробно раскрыта терминология, используемая автором. Проанализирована специфика объектов и предметов исследования.

Авторская методология предполагает использование моделей-классификаций для оценки ЭС, ЭБ и других эмерджентных свойств. Под моделью-классификацией в работе понимается классификация + конкретный алгоритм расчета всех ИП и шкал для них на этапах построения ИП или математическая модель, реализующая алгоритмы расчета ИП в задачах классификации на основе каких-либо данных. Это инструмент, реализующий процесс отнесения объектов исследования к определенному классу.

Оценочные шкалы по группам признаков, выбранных для оценки интегративного (эмерджентного) свойства, образуют первый уровень свертки показателей (нижняя часть рис 2). Каждая группа имеет свое название. Количество групп на первом уровне свертки, как правило, соответствует количеству субиндексов – интегральных показателей первого уровня свертки (например, на рис.1: ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3 и т.д.), которые требуют расчета оценочных шкал для субиндексов первого уровня свертки. На следующем этапе реализуется второй уровень свертки для субиндексов ИПТ1, ИПТ2, ИПТ3, рассчитывается оценочная шкала для ИПТ. Затем субиндексы ИПТ, ИПК, ИПУ образуют ИПЭС водоема, соответственно, рассчитывается оценочная шкала для него. На последнем этапе рассчитывается ИПЭБ и его оценочная шкала. На каждом уровне свертки решается проблема выбора приоритетов (весов) субиндексов, оценивается точность расчета весов и ИП.

Для оценки ЭС, ЭБ и других эмерджентных свойств предполагается использование одной или нескольких моделей-классификаций, в зависимости от цели исследования. В них оценочные шкалы по набору признаков, выбранных для оценки интегративного (эмерджентного) свойства, поэтапно объединяются в шкалы субиндексов. Оценочные шкалы могут объединяться по группам признаков (естественный режим, трофический статус, качество воды, потенциальная устойчивость и др.). Группы признаков объединяются по уровням оценивания (1-й уровень - внутри групп, 2-й уровень - между группами и т.д.).

В **Главе 2** описаны используемые данные и применяемые методы. В современной отечественной и зарубежной литературе отсутствуют теоретико-методологические положения и обобщения, методы и подходы к интегральной системной оценке ЭС и ЭБ водоемов. Имеющиеся в России разрозненные публикации основаны, как правило, на развитии балльного и балльно-индексного подходов.

Задачей данного раздела диссертационного исследования является описание авторских моделей для оценки ЭС и ЭБ водоемов. Детально описаны натурные данные и шкалы, используемые автором, современные тенденции в интегральном оценивании, а также авторская методика оценки ЭС и ЭБ водных объектов и их водосборных территорий. Исследование обусловлено острой необходимостью развития научных идей, связанных с разработкой методов оценки состояния эко- и геосистем и их ответной реакции на оказанное воздействие по совокупности параметров оценивания. Это обуславливает также необходимость развития методов получения ответной реакции системы в целом на оказанное воздействие для целей экологического (системного) нормирования. Исследование базируется на методологии экологической квалиметрии для получения оценочных шкал для гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических параметров, разработкой индексов и субиндексов продуктивности, качества воды, степени антропогенной трансформации водоемов, оценки способности экосистем водоемов адаптироваться к изменениям и сопротивляться внешнему воздействию, сохраняя свои интегративные свойства, которые они имели до воздействия.

В диссертации разработан новый инструментальный исследования эко- и

геосистем в виде моделей-классификаций интегральной оценки состояния (статуса) и благополучия/неблагополучия природной среды, который нацелен на исследование как текущего состояния, так и последствий возникновения опасных природных явлений (ОПЯ) или опасных гидрологических явлений (ОГЯ) на водных объектах (водоемы, водотоки) и водосборных территориях. Применение данного подхода рассмотрено в работе на примере ключевых районов, имеющих важное хозяйственное и рекреационное значение с позиции антропо-, био- и экоцентризма.

Первым шагом стало обоснование этапов создания моделей-классификаций. Последовательное применение этапов позволяет сформировать модель, оценивающую ЭС и ЭБ водных объектов, динамику изменений, происходящих в экосистемах и оценить результаты внешних негативных воздействий на исследуемые объекты.

Этап 1. Выбор параметров, классов и групп для построения моделей-классификаций ЭС и ЭБ экосистем водоемов. Количество групп зависит от цели исследования и имеющейся информационной базы натурных данных. Для каждого субиндекса рекомендуется использовать небольшое число (от 3 до 7) слабокоррелируемых репрезентативных параметров, агрегированных в тематические группы. В ходе этого этапа необходимо также установить предельные значения параметров (min_i и max_i) исследуемых объектов и физико-географических условий. В конечном итоге рассматриваемые группы параметров представляют из себя непрерывные оценочные шкалы выбранных характеристик по пяти классам.

Этап 2. Выбор нормирующих зависимостей с целью построения интегральных показателей и единого интегрального показателя. Для нормирования исходных параметров в работе использовались два вида функций (1) и (2):

— неубывающая кусочно-степенная функция:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq min_i \\ (\frac{x_i - min_i}{max_i - min_i})^\lambda, & min_i < x_i \leq max_i \\ 1, & x_i > max_i \end{cases} \quad (1)$$

— невозрастающая кусочно-степенная функция:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq min_i \\ (\frac{max_i - x_i}{max_i - min_i})^\lambda, & min_i < x_i \leq max_i \\ 0, & x_i > max_i \end{cases} \quad (2)$$

Этап 3. Нормирование показателей шкал, сформированных на этапе 1, с учетом вида связи (прямая или обратная), а также степени нелинейности связи параметров с оцениваемым свойством (λ). В (1) и (2) дополнительно учитываются случаи с $x_i \leq min_i$ и $x_i > max_i$. Итогом нормирования всех показателей оценочных шкал являются значения границ классов в пределах от нуля до единицы, оформленные в виде таблицы с учетом оцениваемых параметров и их изменений в классах. В таблицах диссертации эта информация традиционно приводится в виде псевдодробь, в числителе которой приведены левое и правое граничные значения натуральной шкалы для данного класса, в знаменателе – нормированные значения для границ классов.

Этап 4. Выявление приоритетности критериев для расчета субиндексов и ИПЭС, ИПЭБ. В работе используются следующие варианты задания весовых коэффициентов: равновесность; задание приоритета на основе экспертных оценок; моделирование приоритетов на основе *ннн*-информации (нечисловой, неточной, неполной). Основное правило задания веса: $0,0 \leq w_i \leq 1,0$; $\sum_{i=1}^n w_i = 1,0$.

Этап 5. Построение оценочных шкал для субиндексов и интегральных показателей последнего уровня свертки (ИПЭС и ИПЭБ) на основе значений q_i (этапы

1–3) и значений w_i (этап 4). Во всех случаях расчет интегральных показателей производился по формуле $\sum_{i=1}^n (q_i * w_i)$.

Приведенные выше основные этапы построения моделей-классификаций учитывают принципы иерархической организации сложных систем, существующие особенности их состава, системных свойств и функций, возможные тенденции их изменения в виде интегральных показателей всех уровней свертки.

Этап 6. Расчет интегральных показателей для объектов исследования и оценки воздействия на них. Получение результатов осуществлялось в электронных таблицах на базе программного продукта Microsoft Excel, входящего в состав Microsoft Office и выполнялось на основе этапов 1–5, рассмотренных выше. В работе приведены оценочные шкалы для композитных индексов ИПЭС и ИПЭБ при равновесном и неравновесном вариантах учета субиндексов в них. Результаты были получены с учетом точности оценки, на основе полной или сокращенной программ исследований.

В разделе 2.2 диссертации был включен подраздел с двумя примерами использования ИИ для: 1 – создания алгоритма расчета веса субиндексов при построении ИПЭС водоема с использованием *ннн*-информации о приоритетах оценивания и точности полученного результата; 2 – вычисление ИПЭС на основе примера 1 с оценкой точности полученного результата.

В главе 3 описана апробация методов исследования. В разделе 3.1 и 3.2 приведено описание ключевых систем, на которых прошла апробация метода. Приведены исходные данные для выполнения расчетов и полученные результаты интегральной оценки ЭС и ЭБ и их ответной реакции ключевых систем на воздействие.

На примере оз. Волковское, находящегося севере Карельского перешейка, относящегося к Северо-Западному региону России, апробированы четыре модели-классификации интегральной оценки ЭС и одна модель-классификация интегральной оценки ЭБ системы «водоем+водосбор». На озерах Алтая была апробирована одна модель-классификация ЭС. Данные водоемы расположены в разных физико-географических, экологических условиях и имеют разное морфометрическое строение.

На рис. 3–5 представлены объекты исследования, на которых выполнена апробация моделей-классификаций.



Рис. 3. Оз. Волковское. Фото Н.А. Панютин



Рис. 4. Оз. Лагерное. Фото Н.А. Панютина



Рис. 5. Оз. Барсово. Фото Н.А. Панютина

В разделе 3.3 представлены четыре авторские модели-классификации интегральной оценки ЭС водоемов. В оценку ЭС модели М4 входят 15 критериев оценки трофности (ИПТ), 19 критериев оценки качества и токсического загрязнения воды (ИПК) и 32 критерия оценки потенциальной устойчивости водных объектов (ИПУ), связанных с изменением параметров естественного режима (рис. 1). Продемонстрировано влияние задания приоритетов (весовых коэффициентов) для отдельных субиндексов на интегральный ИПЭС водоема на последнем уровне свертки показателей. Для расчета субиндекса ИПЭС использовалась АСПИД-методология (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) с применением *ннн*-информации для получения оценочных результатов.

Выполнена интегральная оценка ЭС по модели М4 для малых высокогорных приледниковых озер Алтая (озера Лагерное и Барсово), расположенных в разных горных массивах (Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола соответственно), испытывающих минимальную антропогенную нагрузку. Данные, используемые в расчетах, были собраны автором во время экспедиционных изысканий 2019 и 2021 гг. По данным расчетов водоемы имеют высокий ЭС. Для оз. Лагерное ИПЭС изменяется от 0,103 (Ic) до 0,320 (IIIл) при разных приоритетах свертки субиндексов ИПТ, ИПК, ИПУ на

последнем уровне свертки. Для оз. Барсово ИПЭС изменяется от 0,102 (Iс) до 0,299 (IIIл) при разных приоритетах субиндексов. Результаты расчетов ИПЭС по алтайским озерам приведены в табл. 3.3 и табл. 3.4 диссертации. ИПЭС были рассчитаны по полной и сокращенной программам интегральной оценки. В последнем случае необходимо априорное задание субиндексов ИПЭС для ключевого района. По субиндексу ИПТ озера характеризуются как ультраолиго–олиготрофные. По субиндексу ИПК озера относятся к классу очень чистых (I класс) в связи с минимальным антропогенным воздействием на них. По субиндексу ИПУ озера обладают сравнительно низкой потенциальной устойчивостью (IIIс–IIIп), так как эти озера имеют небольшие размеры и являются достаточно уязвимыми для внешних воздействий.

Интегральная оценка ЭС оз. Волковское, расположенного в северо-западном районе Приладожья, по моделям М1–М4 показала, что данный водоем в течение 6 лет сохранял свой ЭС в пределах II–III классов при разных приоритетах учета субиндексов в оценке ИПЭС. При равновесном учете параметров (модель М4) ИПЭС составляет $0,363 \pm 0,253$. Результаты расчетов ИПЭС по оз. Волковское приведены в табл. 3.6 диссертации.

Анализ ЭБ оз. Волковского и его водосбора на основе субиндексов продуктивности, качества и токсического загрязнения сред (атмосфера, водоем, почва), экономических и социальных факторов благополучия (рис. 2) проводился с использованием композитного индекса ИПЭБ. По результатам учетом равных приоритетов дает возможность отнести систему «водоем+водосбор» оз. Волковское к правой границе II класса благополучия. ИПЭБ для данного района с учетом неравных приоритетов определяется величиной $0,246 \pm 0,014$, что также позволило отнести район к правой границе – середине II класса (благополучный).

В работе проводилось исследование модели-классификации на основе сравнения результатов интегральной оценки ЭС в вариантах с учетом в нормирующих функциях нелинейных способов отображения взаимосвязи между параметрами и свойствами системы (рис. 6).

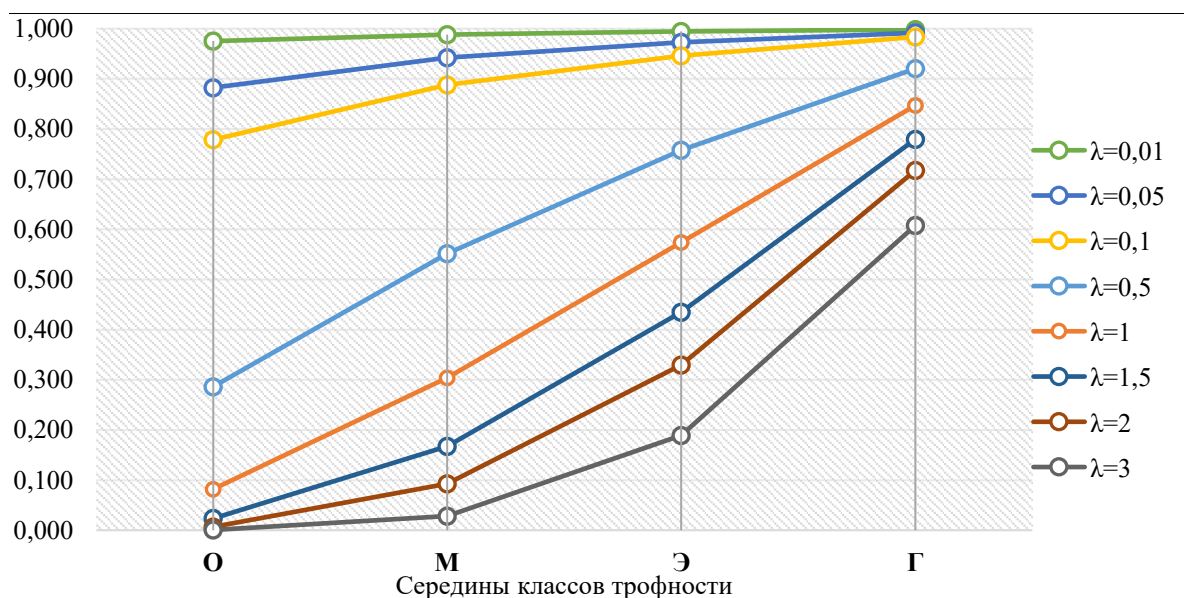


Рис. 6. Кривые нормированных значений для середин классов трофности при различных λ.

Сравнение было выполнено на уровне количественной оценки субиндексов и итогового значения интегрального показателя ЭС водоема (ИПЭС). В качестве ключевого водоема было выбрано оз. Волковское. Исследованием было установлено,

насколько сильно изменятся значения ИПЭС с введением нелинейной связи между критериями трофности оценки и индексом ИПТ. При этом для других учитываемых субиндексов (субиндекс качества воды ИПК и субиндекс потенциальной устойчивости ИПУ) сохранялась линейная связь параметров с оцениваемым свойством на всех этапах свертки показателей. Варианты изменения значений, учитывающих степень нелинейности λ в нормирующих функциях, включали только положительные значения λ : 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0. Параметр λ задавался одним значением для всех критериев, входящих в субиндекс ИПТ. Расчеты представлены в графической форме. Анализ полученных результатов показал, что изменение параметра λ в сторону его уменьшения дает в итоге сдвиг вправо значений ИПЭС по оценочной шкале ИПЭС (в сторону снижения ЭС). При увеличении этого параметра отмечено, что значения ИПЭС сдвигаются влево по оценочной шкале (в сторону повышения ЭС).

В разделе 3.4 рассмотрена возможность оценки ответной реакции на внешнее воздействие на основе построения интегральных показателей экологического статуса при равновесном варианте оценки ИПЭС с поэтапным снижением субиндексов ИПК, ИПТ, ИПУ воды относительно начального (до воздействия) состояния на 10%, 30%, 50%, 75% и 100% по сокращенной программе. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки воздействия на водную экосистему оз. Волковское за теплый период года по величине ИПЭС

Начальное состояние водной экосистемы	Снижение субиндексов на 10 %	Снижение субиндексов на 30 %	Снижение субиндексов на 50 %	Снижение субиндексов на 75 %	Снижение субиндексов на 100 %
<u>0,362</u> IIIл	<u>0,396</u> IIIл	<u>0,462</u> IIIп	<u>0,556</u> IVл	<u>0,663</u> IVп	<u>0,667</u> IVп

Выполнена оценка ответной реакции на внешнее воздействие на основе построения интегральных показателей экологического благополучия водоема и его водосборной территории при равновесном варианте оценки ИПЭБ с поэтапным снижением субиндексов относительно начального состояния на 10%, 30%, 50%, 75% и 100% по сокращенной программе. В этом случае рассчитывались субиндексы качества жизни населения на основе трех субиндексов: состояния окружающей среды (ИПЭБ1), экономического (ИПЭБ2), социального (ИПЭБ3). Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки воздействия на водную экосистему оз. Волковское за теплый период года по величине ИПЭБ

Начальное состояние водной экосистемы	Снижение субиндексов на 10 %	Снижение субиндексов на 30 %	Снижение субиндексов на 50 %	Снижение субиндексов на 75 %	Снижение субиндексов на 100 %
<u>0,304</u> IIIп	<u>0,390</u> IIIл	<u>0,556</u> IVл	<u>0,725</u> Vл	<u>0,877</u> Vп	<u>0,917</u> Vп

Итог выполненных расчетов демонстрирует, что водоем и его водосборная территория при внешнем воздействии на него могут перейти в другой класс ЭС и в другую категорию ЭБ при увеличении нагрузки. Результат ответной реакции системы

во многом определяется тем, какое значение внутри класса имеет ИПЭС или ИПЭБ до воздействия. Если интегральный показатель (ИП) до воздействия был близок к правой границе класса, то даже при 10% увеличении нагрузки, может быть получен переход в более высокий класс, характеризующийся снижением статуса или благополучия системы. В других случаях (середина или левая граница класса) необходимо увеличение нагрузки на 30-50%. В экспериментах также выявлено, что величина воздействия и ответная реакция системы на него нелинейно связаны между собой.

В Заключение приведены основные выводы диссертационной работы:

1. Предложены авторские определения ключевых терминов диссертационного исследования. Под экологическим статусом (ЭС) предложено понимать параметрическое сочетание трофности, качества и токсического загрязнения воды и потенциальной устойчивости водоема, выполненное на интегральной основе. Под устойчивостью в работе понимается интегративное свойство водного объекта, отражающее его способность сохранять свои свойства и параметры режимов при внешнем и внутреннем воздействии на него. Под потенциальной устойчивостью понимается способность системы сохранять свои свойства и элементы естественных режимов (устойчивость к изменению морфометрических, климатических и гидрологических параметров). Под экологически благополучной понималась система, способная: 1 – сохранять свой ЭС; 2 – выполнять социально-экономические условия и функции жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводство) для человека и общества (антропоцентризм); 3 – сохранять оптимальные условия жизни организмов-гидробионтов (биоцентризм).

2. Разработана новая методика оценки потенциальной устойчивости водного объекта (ИПУ), включающая в себя оценку адаптационной устойчивости в холодный период года (индекс ИПУа) и регенерационной устойчивости в теплый период года (индекс ИПУр). На последнем этапе рассчитывается индекс потенциальной устойчивости (ИПУ) с учетом приоритетов ИПУа и ИПУр в ИПУ.

3. На основе обобщения и разработки теоретико-методологических положений и представлений об ЭС и ЭБ для водоемов, различающихся физико-географическими, климатическими условиями, особенностями водного режима, продуктивности, формирования качества и токсического загрязнения, а также потенциальной устойчивостью к изменению параметров естественного режима были разработаны модели-классификации интегральной оценки ЭС водоемов, и модель-классификация интегральной оценки ЭБ для системы «водоем + водосбор», с учетом экономических и социальных факторов, влияющих на ЭБ. Разработаны 4 модели-классификации (М1 – М4) для оценки ЭС, и модель-классификация для оценки ЭБ, ориентированные на 5 классов, от водоема первой (высшей) категории – I класс до водоема пятой категории – V класс.

4. Разработана методика расчета ИПЭС водоема, этапы, алгоритмы и рекомендации для построения интегральных показателей (ИП) на основе методологии анализа и синтеза показателей на основе информационного дефицита (АСПИД-методологии). Показана применимость использования ИИ «AI» для получения весовых коэффициентов, расчета ИПЭС, оценки точности расчета, с использованием нечисловой (порядковой, ординальной), неточной (интервальной) и неполной информации о приоритетах учета субиндексов.

На примере оз. Волковское и озер Алтая: (оз. Лагерное и оз. Барсово) выполнена оценка современного состояния водоемов по величинам ИПЭС. По 4 моделям с разным количеством учитываемых параметров при равновесном учете параметров и субиндексов на всех уровнях свертки для оз. Волковское по всем моделям попадает в III класс, середину или левую границу класса. Для малых озер Алтая при равноприоритетных вариантах учета параметров и субиндексов в интегральной оценке ЭС значение ИПЭС оз. Лагерное составило 0,186 (III). Значение

ИПЭС для оз. Барсово 0,176 (Шл).

Разработана типизация водоемов по пяти классам ЭС (125 типов). Выявлены типы водоемов с разным сочетанием размеров, трофности, качества и токсического загрязнения воды, устойчивости к изменению параметров естественного режима.

Разработана методика расчета ИПЭБ. Выполнена апробация моделей–классификаций интегральной оценки ЭБ по величине ИПЭБ для водосбора оз. Волковское. Получено, что для оз. Волковское ИПЭБ составляет $0,246 \pm 0,014$ (Шс). Подтверждается способность системы сохранить свой статус и благополучие за последние 10 лет.

5. На основе сокращенной программы расчета ИПЭС были выполнены исследования по изменению приоритетов (весов) субиндексов на последнем уровне свертки показателей. В экспериментах рассматривались 5 вариантов задания приоритетов: 1 – равновесность; 2 – приоритет трофность; 3 – приоритет качество воды; 4 – приоритет устойчивость; 5 – приоритет ИПУ>ИПК>ИПТ. Придание большего приоритета субиндексам трофности или качества воды привело к смещению результатов в сторону повышения ЭС озер примерно на полкласса. Придание большего приоритета субиндексу потенциальной устойчивости привело к смещению результатов в сторону снижения ЭС озер примерно на один класс. Например, для оз. Барсово происходит переход из середины и правой границы I класса во II класс, а в случае с оз. Лагерное, в левую границу III класса.

Исследование рекогносцировочного задания субиндексов в сокращенной программе интегральной оценки ИПЭС показало, что для алтайских озер с заданием трофического статуса как ультраолиготрофного (уменьшение величины субиндекса ИПТ на $\frac{1}{4}$ ширины первого класса) привело к тому, что ИПЭС перешел из левой границы II класса в правую границу I класса.

6. Проведены исследования учета нелинейности связи между параметрами и оцениваемым свойством на этапе расчета отдельных субиндексов. Основным вариантом, с которым сравнивались результаты других вариантов был выбран вариант с значением показателя $\lambda=1$. В экспериментах параметр λ в нормирующих функциях задавался одним положительным значением для всех критериев, входящих в субиндекс трофности оз. Волковское. Первый класс и близость ИПЭС к нулю характеризует высокий статус, а пятый класс и близость ИПЭС к единице характерны для низкого статуса. Выполнены две серии экспериментов: в первую серию вошли значения λ от 0,01 до 0,5, во вторую серию вошли значения λ от 1,5–3,0. Для случаев малых значений λ (0,01; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5) оз. Волковское попадает в более низкий класс ЭС (из IIIл озеро переходит в Шс). Во второй серии, при увеличении λ , в случае сильно выраженной нелинейности, для больших значений параметра λ ($\lambda=3$) озеро по величине ИПЭС попадает в более высокий класс ЭС (Iс–IIс классы).

7. В экспериментах с моделями–классификациями была выполнена рекогносцировочная оценка ответной реакции водной экосистемы на внешнее воздействие на основе ИПЭС и ИПЭБ на примере оз. Волковское. Значения субиндексов после воздействия не рассчитывались, как в полной программе, а увеличивались по абсолютной величине на определенный %, разный, в каждом эксперименте, но одинаковый для отдельных субиндексов. Задачей этих экспериментов было показать, как изменения субиндексов могут повлиять на переход системы в другой (другие) классы.

Было получено, что переход оз. Волковское в более низкую категорию (класс) ЭС произойдет при увеличении нагрузки, задаваемой по субиндексам ИПТ, ИПК и ИПУ на 30–50%. При дальнейшем увеличении нагрузки озеро переходит в четвертую (IV класс) категорию ЭС и остается в этом классе вплоть до 100%-го увеличения нагрузки по субиндексам. Выявлено, что величина воздействия и ответная реакция системы на него нелинейно связаны между собой.

Аналогичные эксперименты выполнены для оценки ответной реакции социо-эколого-экономической системы на увеличение нагрузки (снижение абсолютных величин всех ИП субиндексов ЭБ). Было показано, что увеличение нагрузки на 10% может привести к тому, что водоем и его водосборная территория переходят в более низкую категорию ЭБ. Это зависит от того, где находилась система до воздействия. Увеличение нагрузки на 50% и более приводит к тому, что ИПЭБ района переходит в самый низкий класс (V класс) ЭБ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Dmitriev V., Sedova S., Plenkina A., Khomiakova V., Avdeevich D., Ladanova V., Ukis A., **Paniutin N.**, Makarieva O., Post D. Development of monitoring of water bodies ecological status by the example of small lakes in the North-Western Ladoga region. E3S Web of Conferences. 4th Vinogradov Conference "Hydrology: from Learning to Worldview" in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov. 2020, V. 163, doi:10.1051/e3conf/202016303002 (Scopus, WoS).

2. Распутина В.А., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Пряхина Г.В., Вуглинский В.С., Свирепов С.С., **Панютин Н.А.**, Волкова Д.Д., Николаев М.Р., Сыроежко Е.В. Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 3. С. 487 – 509. DOI: 10.21638/spbu07.2021.304 (Scopus, WoS, Белый список, ВАК).

3. Распутина В.А., Пряхина Г.В., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., **Панютин Н.А.** Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, юго-восточный Алтай). Лёд и снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 441 – 454. DOI: 10.31857/S2076673422030143 (Scopus, WoS, Белый список, ВАК).

4. **Панютин Н.А.** Особенности оценки устойчивости и экологического благополучия водной среды территории. Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы XXI Международной научно-технической конференции. 2023. С. 93 – 96. (РИНЦ).

5. Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Примак Е.А., Седова С.А., Васькова Е.А., Дудоркин Е.С., **Панютин Н.А.**, Акулич Э.В. Системное нормирование воздействий на водный объект: экологический статус водоема и его изменение при естественном и антропогенном воздействии. Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2023. С. 163–168. (РИНЦ).

6. Rasputina V.A., Pryakhina G.V., Ganyushkin D.A., Bantcev D.V., **Paniutin N.A.** Features of the Level Regime of Periglacial Moraine-Dammed Lakes in the Growth Stage (Based on the Example of Lakes of the Tavan-Bogdo-Ola Mountain Range, South Eastern Altai) // Water Resources. 2023. Т. 50. № S1. P. S109–S120. DOI: 10.1134/s0097807823700343 (Scopus, WoS, Белый список, ВАК).

7. Овсепян А.А., **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В. Потенциальная устойчивость водоема: от балльно-индексных оценок к интегральной оценке на основе композитных индексов. Международный студенческий вестник. 2024. №1. С. 45. doi:10.17513/msnv.21434. (РИНЦ)

8. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В. Интегральная оценка устойчивости системы "водоем+водосбор", Геоэкология и рациональное недропользование: от науки к практике, сборник материалов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2024. С. 27 – 33. (РИНЦ).

9. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В. Моделирование экологического статуса водных объектов. Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию

кафедры географической экологии Белорусского государственного университета, 2024. С. 155 – 159. (РИНЦ).

10. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В., Щетинина В.В. Экологический статус водоема: методика, оценка, перспективы. Озера Евразии. Материалы 3-й Международной конференции. 2025. С. 178 – 183. (РИНЦ).

11. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В. К вопросу об интегральной оценке экологического статуса и экологического благополучия водоемов. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2025, С. 456 – 460. (РИНЦ).

12. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В., Примаков Е.А. Интегральная оценка экологического статуса с учетом нелинейности взаимосвязи между параметрами и эмерджентными свойствами водного объекта. Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Серия Лимнология и океанология. 2025. №6. С. 119 – 130. doi:10.17076/lim2210. (ВАК, К1).

13. Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Тихонова Д.А., **Панютин Н.А.**, Краснова В.В., Андреева Д.О., Пономарева Е.В., Васильева Н.С., Спицын М.Н. Оценка первичной продукции и деструкции органического вещества по результатам наблюдений и моделирования скоростей процессов массообмена в мелководной экосистеме. Шестые Виноградовские чтения. Гидрология нового поколения. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. 2026, С. 269 – 278 (РИНЦ).

14. **Paniutin N.A.**, Dmitriev V.V., Shchetinina M.M. Classification of Water Bodies Based on Integral Assessment of Their Ecological Status. In: Radionova, L.V., Yatsenko, E.A., Maltseva, I.N. (eds). Advances in Ecology and Environmental Engineering II. RusEcoCon 2025. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Conference paper. 2026. P. 311 – 320. doi:10.1007/978-3-031-99762-4_28.

15. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В., Манвелова А.Б. Учет дефицита информации в интегральной оценке экологического благополучия природной системы. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Серия Естественные и точные науки. 2026. Т. 20. № 1. (ВАК, К3).

16. **Панютин Н.А.**, Дмитриев В.В. Интегральная оценка экологического статуса высокогорных озер Алтая. Экосистемы. 2026. № 45. С. 45 – 63 (ВАК, К2).