

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДОЕМА: ОТ БАЛЛЬНО-ИНДЕКСНЫХ ОЦЕНОК К ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ИНДЕКСОВ

Овсебян А.А., Панютин Н.А., Дмитриев В.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, email: annahit2002@mail.ru

Целью исследования является разработка модели-классификации интегральной оценки потенциальной устойчивости водоема на основе построения композитных индексов. Приводятся: блок-схема модели, этапы получения интегральных показателей устойчивости, оценочные шкалы для расчета субиндексов и интегрального показателя в целом. Новизной исследования является сочетание многокритериальности и полииерархичности в построении интегральных показателей эмерджентного свойства системы. Потенциальная устойчивость (устойчивость к изменению параметров естественного режима) оценивается для теплого и холодного времени года по трем группам признаков: 1-морфометрия (4 показателя), 2-климатические и физико-географические особенности (4 показателя), 3-гидрологические условия и водный режим (7 показателей). При этом, для холодного времени года оценивается адаптационная устойчивость, а для теплого время года – регенерационная устойчивость к изменению параметров режимов. Принимается, что высокая устойчивость в холодный период года обусловлена адаптацией системы к низким температурам, наличием льда, система «спит». Физические процессы и процессы массообмена в системе проходят с низкими скоростями. Система не испытывает сильных изменений, но и слабо самоочищается. Высокая устойчивость в теплый период года обусловлена повышенными скоростями самоочищения (повышение температуры увеличивает «естественное» биохимическое самоочищение), изменчивостью климатических и гидрологических условий. Система самоочищается. На последнем уровне свертки определяется итоговое значение интегрального показателя устойчивости за год. Построение интегральных показателей выполнялось для равновесных/неравновесных условий внутри уровней (блоков) и между ними. Для апробации работы использовались результаты полевых исследований на ключевом объекте – малом оз. Суури в северо-восточном районе Карельского перешейка, собранные авторами в 2023 г. В расчетах выполнена проверка ряда рабочих гипотез для характеристики работоспособности модели и совершенствования технологии построения интегральных показателей. Выполнено сравнение результатов оценки устойчивости на основе разработанных ранее балльно-индексного подхода и других моделей-классификаций. Определены пути использования модели для построения интегральных показателей экологического статуса водоема.

Ключевые слова: адаптационная устойчивость, регенерационная устойчивость, интегральная оценка, интегральный показатель устойчивости, субиндексы устойчивости, модель-классификация

POTENTIAL STABILITY OF A RESERVOIR: FROM POINT-INDEX ESTIMATES TO AN INTEGRAL ASSESSMENT BASED ON COMPOSITE INDICES

Ovsepyan A.A., Paniutin N.A., Dmitriev V.V.

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, email: annahit2002@mail.ru

The aim of the study is to develop a model-classification of an integral assessment of the potential stability of a reservoir based on the construction of composite indices. The following are given: a block diagram of the model, the stages of obtaining integral stability indicators, evaluation scales for calculating sub-indices and the integral indicator as a whole. The novelty of the study is the combination of multi-criteria and poly-hierarchy in the construction of integral indicators. Potential stability (resistance to changes in the parameters of the natural regime) is estimated for the warm and cold seasons by three groups of signs: 1-morphometry (4 indicators), 2-climatic and physico-geographical features (4 indicators), 3-hydrological conditions and water regime (7 indicators). At the same time, adaptive stability is estimated for the cold season, and regenerative resistance to changes in regime parameters is estimated for the warm season. It is assumed that the high stability in the cold season is due to the adaptation of the system to low temperatures, the presence of ice, the system "sleeps". Physical processes and mass transfer processes in the system take place at low speeds. The system does not experience strong changes, but it is also poorly self-cleaning. High stability in the warm season is due to the increased rates of self-purification (an increase in temperature increases the "natural" biochemical self-purification), variability of climatic and hydrological conditions. At the last level of convolution, the final value of the integral stability indicator for the year is determined. The construction of integral indicators was performed for equilibrium/nonequilibrium conditions inside the levels (blocks) and between them. To test the work, the results of field research were used at a key object – the small lake. Suuri in the north-eastern region of the Karelian Isthmus, collected by the authors in 2023. In the calculations, a number of working hypotheses were tested to characterize the performance of the model and improve the technology for constructing integral indicators. The results of the stability assessment are compared on the basis of the

previously developed point-index approach and other classification models. The ways of using the model for constructing integral indicators of the ecological status of the reservoir are determined.

Key words: integral assessment, integral indicator, ecosystem stability sub-index, classification model, sub-indices of sustainability

Введение. Актуальность исследования подтверждается высоким интересом к разработке методов оценки эмерджентных свойств и функций сложных систем в природе и обществе, факторов на них влияющих, и механизмов формирования системных свойств и функций этих систем [1,2]. Совершенствование гео- и гидроэкологического мониторинга, оценки и выявления экологических ситуаций и экологической обстановки водных объектов в наши дни сопровождается разработкой и развитием методов: 1 – наблюдения, отбора, хранения, обработки полевых и лабораторных данных; разноаспектной геоинформационной визуализации натурной информации о природных (водных) эко- и геосистемах, явлениях и процессах, в них протекающих; 2 – моделирования физико-механических и химико-биологических процессов, происходящих в водных объектах и водных экосистемах; 3 – выявления, анализа особенностей влияния факторов на скорости процессов разной природы, проявления системных эффектов в них; 4 – оценки реакции компонентов и систем в целом на естественные изменения (глобальное потепление) и антропогенные воздействия, выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне естественного функционирования водных объектов; 5 – выявления пределов воздействия и системного нормирования нагрузок на водные объекты.

Сложные системные (интегративные, эмерджентные) свойства характеризуют геосистему [2] или социосистему [3] в целом, а не отдельный компонент или процесс, выбранный исследователем для изучения. Для этого часто, но неправомерно используется термин «слабое звено». При этом исследователь выявляет слабое звено так, что им становится измеряемый компонент системы, реже процесс, который рассматривает автор. В отечественных публикациях основными методами оценки устойчивости и других сложных свойств природных систем в наши дни остаются методы балльного и/или балльно-индексного оценивания. Реже, предлагается использовать индикаторный (индикативный) подход, в котором авторы все исследуемые параметры, имеющие натуральные оценочные шкалы, переводят в баллы по правилам, определенным авторами метода, и далее, суммируют баллы с определенным весом или, чаще, без учета приоритетов. Полученный результат выдается за косвенную оценку устойчивости или другого системного свойства. Активно развивается балльная оценка потенциала экосистемных услуг водных ресурсов с точки зрения того, может ли выявленный автором потенциал реально способствовать устойчивости регионального

развития или, например, насколько водная система удовлетворяет потребности человека и экономического развития региона [4].

Современные зарубежные исследования синтезируют знания того, как изменение климата влияет на экосистемы. Эти знания трансформируются в новые современные оценки, включая количественные воздействия изменения климата на свойства экосистем и все категории услуг [5,6]. Совершенствуются сложные динамические модели оценки устойчивости социо-эколого-экономических систем, предполагающие построение разных моделей: эконометрических, векторной авторегрессии и др., модель системы земледелия CropSyst, модель индекса стресса водоснабжения WaSSI, модель ToSIA для оценки воздействия на устойчивое развитие [4].

Целью исследования является разработка модели-классификации интегральной оценки потенциальной устойчивости (ИПУ) водоема на основе построения композитных индексов. Задачи: 1 - разработка блок-схемы, этапов получения ИПУ, оценочных шкал для расчета субиндексов и ИПУ в целом; 2 – выполнение расчетов ИПУ на основе моделей интегральной оценки и модели балльно-индексной оценки; 3 – проверка сформулированных гипотез для оценки работоспособности модели и совершенствования технологии построения ИПУ; 4 – проверка влияния задания приоритетов (весов) для учета субиндексов в оценочных исследованиях ИПУ. Новизной исследования является сочетание многокритериальности и полииерархичности в построении схем расчета ИПУ, использование в расчетах двух видов устойчивости (адаптационная и регенерационная), формирующих устойчивость системы в холодный и теплый сезоны года.

Материалы и методы. Оценочные исследования выполнены по натурным данным, полученным в период с 17 по 20 июня 2023 года в рамках полевой практики студентов кафедры Гидрологии суши СПбГУ. В результате были проведены наблюдения за химическим и биологическим составом и физическими свойствами воды малого озера Суури и их последующая обработка. Объект исследования находится на территории учебно-научной базы СПбГУ «Приладожская» (поселок Кузнечное, Ленинградская область). Карта района работ и результаты исследований приведены на рис. 1 и в другой нашей работе, заявленной на «Студенческий Форум 2024».

Для оценки экологического состояния водоема применялись: аксиология и аксиометрия, методы покомпонентного анализа состава и свойств водной экосистемы, статистические методы, методы комплексной и интегральной оценки на основе разработанных композитных индексов. Общая схема этапов построения ИПУ приведена на рис.2.

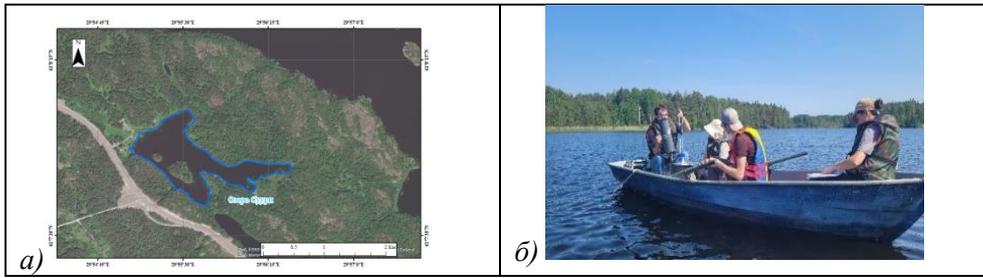


Рис. 1. Примеры результатов полевых исследований ключевого водоема и схема построения оценочных шкал интегральных показателей устойчивости оз. Суури в 2023 г в Ленинградской области: а) – район работ в северо-западном Приладожье; б) рабочие моменты отбора проб воды;

№ этапа	Содержание этапа и необходимые пояснения
1	Выбор и обоснование типов устойчивости, используемых для интегральной оценки устойчивости водоема: А – адаптационная устойчивость, Р – регенерационная устойчивость.
2	Отбор исходных критериев X_1, \dots, X_m , которые образуют группы показателей для построения субиндексов ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3, отражающих связь X_1, \dots, X_m с устойчивостью водоема. ИПУ1 учитывает морфологию водоема, ИПУ2 – физико-географические условия и климат, ИПУ3 – гидрологические условия. Определяются предельные значения $X_{1min}, \dots, X_{mmax}$, вид и монотонность связи всех параметров с устойчивостью водоема. Значения X_1, \dots, X_m используются для расчета субиндексов адаптационной и регенерационной устойчивости. Построение ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3 для модели адаптационной устойчивости (М1) и регенерационной устойчивости (М2) выполняется с учетом вида связи (прямая/обратная) и линейности/нелинейности связей. Для снижения мультиколлинеарности предусмотрено использование небольшого числа слабо коррелируемых критериев в каждой группе. Определяется количество классов, формируются оценочные шкалы для всех критериев для левой и правой границы каждого класса для М1 и М2.
3	Для каждого субиндекса проводится нормирование показателей на основе нормирующих функций (1) и (2). Выбор нормирующей функции зависит также от предпочтения исследователя в формировании шкал нормированных значений (слева 0 или 1). Неубывающая кусочно-степенная функция: $q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i}\right)^j, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 1, & x_i > \max_i, \end{cases} \quad (1)$ Неубывающая кусочно-степенная функция: $q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i}\right)^j, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 0, & x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$ В результате нормирования получаются показатели $q_1, \dots, q_m, 0 \leq q_i \leq 1$. Каждый q_i является функцией исходной характеристики $q_i = q_i(x_i)$ и позволяет оценить ИИ с точки зрения i -го критерия. При этом близость величины q_i к нулю может характеризовать устойчивость как низкую, а близость q_i к 1, как высокую. Здесь возможны две ситуации, в зависимости от предпочтения автора, который может принять близость q_i к нулю за высокую устойчивость, а близость q_i к 1 за низкую или наоборот. Это отразится на выборе нормирующей функции при расчетах ИИ и направлении оценочных шкал (от 0 к 1 или от 1 к 0).
4	Вводится синтезирующая функция $Q(q) = Q(q^1, \dots, q^m)$, агрегирующая нормированные показатели q_1, \dots, q_m в единый интегральный показатель $Q = Q(q)$, сопоставляя j -му свойству (т.е. его оценке $q^j = (q_1^j, \dots, q_m^j)$) некоторую числовую оценку $Q^j = Q(q^j) = Q(q_1^j, \dots, q_m^j)$. На синтезирующую функцию, определяющую интегральный показатель, накладываются ограничения: $Q(0, \dots, 0) = 0, Q(1, \dots, 1) = 1, 0 \leq Q \leq 1$. Простейшей синтезирующей функцией является линейная функция вида: $Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i \cdot w_i$.
5	Задание весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_m)$ – неотрицательные веса, задающие приоритетность (важность, значимость) нормированных показателей (критериев оценивания) для оценки устойчивости водоема. Сумма весов = 1. Учет информации (экспертной информации) о весах: 1 – ординальная (порядковая) информация – ОИ: $OI = \{w_r > w_s, w_r = w_s, \dots, r, s, u, v \in \{1, \dots, m\}\}$; 2 – интегральная информация о весах – И: $I = \{0 \leq a_i \leq w_i \leq b_i \leq 1, i \in \{1, \dots, m\}\}$; 3 – итоговая информация: $I = OI \cup I$.
6	Выполняется построение всех интегральных показателей ИПУ для левой и правой границ классов для всех субиндексов и затем для всех уровней свертки. Ниже, на рисунке 3 представлена схема построения ИИ, которая реализуется на основе суммирования нормированных значений выбранных характеристик со своими весами для левых и правых границ классов. Вектор весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_m)$, определяет приоритет (значимость) нормированных показателей для интегральной оценки.
7	Переход к средним значениям интегральных показателей и оценка точности: Переход к $Q(q; I) = MQ(q; I): \bar{Q}^{(j)}(I) = \bar{Q}(q^{(j)}; I) = \bar{Q}(q^{(j)}, \bar{w}(I)) = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{i=1}^{N(m, n; I)} Q^{(j)}(q^{(i)}).$ Оценка точности $Q(q; I): [S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{i=1}^{N(m, n; I)} [Q^{(j)}(q^{(i)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2$.

Рис. 2. Основные этапы построения субиндексов ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3 и интегрального показателя устойчивости ИПУ.

Результаты исследования и их обсуждение. Выполнены расчёты ИПУ по данным 2023 года для озера Суури и этапам, приведенным на рис.2. Все параметры, необходимые для промежуточных и итоговых расчётов, собраны лично авторами в период полевых работ, некоторые параметры заданы по справочным или фоновым материалам. На первом этапе были рассмотрены два варианта оценки ИПУ экосистемы: 1) адаптационная устойчивость (Ma), характеризующая высокую устойчивость в холодный период года; 2) регенерационная устойчивость (Mp), характеризующая высокую устойчивость в тёплый период года. На втором этапе был определен набор параметров, которые составили перечни характеристик для расчета субиндексов. Вторым этапом заключался в формировании оценочных шкал к исходным параметрам. На третьем этапе обосновывался выбор нормирующих функций. Для

нормирования исходных параметров использовались два вида функций: неубывающая степенная функция (1) и невозрастающая степенная функция (2) (рис. 2). Для моделей Ма и Мр использовались 3 группы критериев, формирующих субиндексы ИПУ1, ИПУ2, ИПУ3 и агрегирующие в себе различные признаки, обобщенные на рис.3.

Рассмотрим обоснование учета критериев и шкал в Ма и Мр. При оценке адаптационной устойчивости для субиндекса ИП1а высокая устойчивость в холодный период года обусловлена «стагнацией» процессов зимой (система «спит»). Физические процессы и процессы массообмена в системе проходят с низкими скоростями. Система слабо самоочищается. Бóльшей площади водного зеркала водоема соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему объему водной массы соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей максимальной глубине соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей площади водосбора соответствует бóльшая устойчивость водоема. Принимается, что эта группа параметров не будет изменяться при переходе от холодного периода года к теплему. Для субиндекса ИП2а для водоема берем одну шкалу влияния ветрового режима. Для М1а - чем больше дней со штилями, тем выше адаптационная устойчивость. Меньшей средней температуре воды в холодный период года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей продолжительности ледостава соответствует бóльшая устойчивость водоема. Более холодному периоду года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Сезоны года: зима (М1а) -1 балл. Для субиндекса ИП3а отсутствию сезонной стратификации соответствует один балл, наличие сезонной стратификации соответствует два балла. Наличие сезонной стратификации соответствует меньшая устойчивость водоема. По характеру регулирования многолетнему регулированию соответствуют 1 – 3 балла, сезонному регулированию – 3 – 4 балла, недельно-суточному регулированию – 4 – 6 баллов. Более сильному вертикальному перемешиванию соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшей внутригодовой амплитуде колебания уровня соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту проточности соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту водообмена соответствует меньшая устойчивость водоема. Бóльшей скорости течения соответствует меньшая устойчивость водоема.

При оценке регенерационной устойчивости для ИП1р высокая устойчивость в теплый период года обусловлена повышенными скоростями самоочищения (повышение температуры в отсутствии антропогенного воздействия увеличивает «естественное» самоочищение). Бóльшей площади водного зеркала водоема соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему объему водной массы соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей максимальной глубине соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей площади водосбора соответствует бóльшая устойчивость водоема. Эта группа параметров не

изменяется при переходе от холодного периода года к теплomu: изменяется шкала влияния температуры воды на устойчивость по сравнению с М1а. Бóльшей средней температуре воды в летний период соответствует бóльшая устойчивость водоема (бóльшая регенерация и самоочищение). Более теплomu сезону года соответствует бóльшая устойчивость водоема. Сезоны года: лето-осень (М1р) - 2 балла. Для ИП2р для водоема берем другую шкалу влияния ветрового режима. Для М1р - чем больше дней с сильными ветрами, тем выше регенерационная устойчивость. Для ИП3р наличие сезонной стратификации соответствует бóльшая устойчивость водоема (2 балла). По характеру регулирования многолетнему регулированию соответствуют 1 – 3 балла, сезонному регулированию – 3 – 4 балла, недельно-суточному регулированию – 4 – 6 баллов. Более сильному вертикальному перемешиванию соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей внутригодовой амплитуде колебания уровня соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту проточности соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшему коэффициенту водообмена соответствует бóльшая устойчивость водоема. Бóльшей скорости течения соответствует бóльшая регенерационная устойчивость водоема.

Иллюстративно (см. рис 3.) все рассмотренные группы представляют собой таблицы изменения выбранных характеристик по 5 классам устойчивости. В таблицах приводится псевдодробь, в которой в верхней строке приведены левая и правая границы класса по соответствующей характеристике (или их нормированные значения) для границ классов. В оценочных шкалах ИПУа, ИПУр, ИПУ в верхней строке даны границы нормированных значений ИПУ, ниже приводится Δ - ширина диапазона для класса, еще ниже – ИПУ для середины класса.

Адаптационная устойчивость (Ма)						Регенерационная устойчивость (Мр)							
<div style="text-align: center;"> </div>						<div style="text-align: center;"> </div>							
<i>Группа 1. Морфометрия, батиметрия (субиндекс ИП1а)</i>						<i>Группа 1. Морфометрия, батиметрия (субиндекс ИП1р)</i>							
Площадь поверхности, км ²						Площадь поверхности, км ²							
Объем, км ³						Объем, км ³							
Максимальная глубина, м						Максимальная глубина, м							
Площадь водосбора, км ²						Площадь водосбора, км ²							
№ п/п	Признаки	Классы устойчивости					№ п/п	Признаки	Классы устойчивости				
		I min	II	III	IV	V max			I min	II	III	IV	V max
1	Площадь поверхности, км ²	0,1-5 0,000-0,002	5-10 0,002-0,005	10-100 0,005-0,050	100-1000 0,050-0,500	1000-2000 0,500-1,000	1	Площадь поверхности, км ²	0,1-5 0,000-0,002	5-10 0,002-0,005	10-100 0,005-0,050	100-1000 0,050-0,500	1000-2000 0,500-1,000
2	Объем, км ³	0,01-0,25 0,000-0,012	0,25-0,5 0,012-0,024	0,5-1 0,024-0,050	1-10 0,050-0,500	10-20 0,500-1,000	2	Объем, км ³	0,01-0,25 0,000-0,012	0,25-0,5 0,012-0,024	0,5-1 0,024-0,050	1-10 0,050-0,500	10-20 0,500-1,000
3	Максимальная глубина, м	1-2,5 0,000-0,015	2,5-5 0,015-0,040	5-10 0,040-0,091	10-50 0,091-0,495	50-100 0,495-1,000	3	Максимальная глубина, м	1-2,5 0,000-0,015	2,5-5 0,015-0,040	5-10 0,040-0,091	10-50 0,091-0,495	50-100 0,495-1,000
4	Площадь водосбора, км ²	500-2000 0,000-0,029	2000-3000 0,029-0,049	3000-25000 0,049-0,476	25000-50000 0,476-0,961	50000-22000 0,961-1,000	4	Площадь водосбора, км ²	500-2000 0,000-0,029	2000-3000 0,029-0,049	3000-25000 0,049-0,476	25000-50000 0,476-0,961	50000-22000 0,961-1,000
	Интегральный показатель устойчивости ИПИ	0,009-0,014 Δ= 0,014 0,007	0,014-0,029 Δ=0,015 0,022	0,029-0,167 Δ=0,138 0,098	0,167-0,614 Δ=0,447 0,390	0,614-1,000 Δ=0,386 0,807		Интегральный показатель устойчивости ИПИ	0,009-0,014 Δ= 0,014 0,007	0,014-0,029 Δ=0,015 0,022	0,029-0,167 Δ=0,138 0,098	0,167-0,614 Δ=0,447 0,390	0,614-1,000 Δ=0,386 0,807
<i>Группа 2. Физико-географические условия, климат (субиндекс ИП2а)</i>						<i>Группа 2. Физико-географические условия, климат (субиндекс ИП2р)</i>							

Ветровой режим: количество дней <i>со штилями</i> в холодное время года (сут.).						Ветровой режим: количество дней с <i>сильным ветром</i> в теплый период года (сут.).																																																																																																																																													
Средняя за месяц температура воды °С						Средняя за месяц температура воды °С																																																																																																																																													
Продолжительность ледостава, к-во месяцев						Продолжительность ледостава, к-во месяцев																																																																																																																																													
Сезон года/месяц, баллы						Сезон года/месяц, баллы																																																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th rowspan="2">Признаки</th> <th colspan="5">Классы устойчивости</th> </tr> <tr> <th>I min</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>Ветровой режим: МП - количество дней со штилями в холодное время года (сут.)</td> <td>3-4 0,000-0,200</td> <td>4-5 0,200-0,400</td> <td>5-6 0,400-0,600</td> <td>6-7 0,600-0,800</td> <td>7-8 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Средняя за месяц температура воды °С</td> <td>20-18 0,000-0,105</td> <td>18-15 0,105-0,265</td> <td>15-10 0,265-0,526</td> <td>10-5 0,526-0,789</td> <td>5-1 0,789-1,000</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Продолжительность ледостава, месяц</td> <td>0-2 0,000-0,333</td> <td>2-3 0,333-0,500</td> <td>3-4 0,500-0,667</td> <td>4-5 0,667-0,833</td> <td>5-6 0,833-1,000</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Сезон года/месяц, баллы</td> <td>нояб. 1-2 0,000-0,200</td> <td>нояб.-апрель 2-3 0,200-0,400</td> <td>май, сентябрь 3-4 0,400-0,600</td> <td>июль, окт. 4-5 0,600-0,800</td> <td>ноябрь-апрель 5-6 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:</td> <td>0,000-0,210 Δ-0,210 0,105</td> <td>0,210-0,391 Δ-0,181 0,300</td> <td>0,391-0,598 Δ-0,207 0,494</td> <td>0,598-0,886 Δ-0,288 0,702</td> <td>0,886-1,000 Δ-0,114 0,993</td> </tr> </tbody> </table>						№ п/п	Признаки	Классы устойчивости					I min	II	III	IV	V max	5	Ветровой режим: МП - количество дней со штилями в холодное время года (сут.)	3-4 0,000-0,200	4-5 0,200-0,400	5-6 0,400-0,600	6-7 0,600-0,800	7-8 0,800-1,000	6	Средняя за месяц температура воды °С	20-18 0,000-0,105	18-15 0,105-0,265	15-10 0,265-0,526	10-5 0,526-0,789	5-1 0,789-1,000	7	Продолжительность ледостава, месяц	0-2 0,000-0,333	2-3 0,333-0,500	3-4 0,500-0,667	4-5 0,667-0,833	5-6 0,833-1,000	8	Сезон года/месяц, баллы	нояб. 1-2 0,000-0,200	нояб.-апрель 2-3 0,200-0,400	май, сентябрь 3-4 0,400-0,600	июль, окт. 4-5 0,600-0,800	ноябрь-апрель 5-6 0,800-1,000	Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:		0,000-0,210 Δ-0,210 0,105	0,210-0,391 Δ-0,181 0,300	0,391-0,598 Δ-0,207 0,494	0,598-0,886 Δ-0,288 0,702	0,886-1,000 Δ-0,114 0,993	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th rowspan="2">Признаки</th> <th colspan="5">Классы устойчивости</th> </tr> <tr> <th>I min</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>Ветровой режим: МП - количество дней с сильным ветром в теплый период года (сут.)</td> <td>6-8 0,000-0,200</td> <td>8-10 0,200-0,400</td> <td>10-12 0,400-0,600</td> <td>12-14 0,600-0,800</td> <td>14-16 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Средняя за месяц температура воды °С</td> <td>1-5 0,000-0,210</td> <td>5-10 0,210-0,474</td> <td>10-15 0,474-0,737</td> <td>15-18 0,737-0,895</td> <td>18-20 0,895-1,000</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Продолжительность ледостава, месяц</td> <td>6-4 0,000-0,167</td> <td>5-1 0,167-0,333</td> <td>4-1 0,333-0,500</td> <td>3-2 0,500-0,667</td> <td>2-0 0,667-1,000</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Сезон года/месяц, баллы</td> <td>ноябрь-март 6-5 0,000-0,200</td> <td>апр.-окт. 5-1 0,200-0,400</td> <td>май, сентябрь 4-3 0,400-0,600</td> <td>июль, август 3-2 0,600-0,800</td> <td>ноябрь 2-1 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:</td> <td>0,000-0,194</td> <td>0,194-0,402</td> <td>0,402-0,609</td> <td>0,609-0,790</td> <td>0,790-1,000</td> </tr> </tbody> </table>						№ п/п	Признаки	Классы устойчивости					I min	II	III	IV	V max	5	Ветровой режим: МП - количество дней с сильным ветром в теплый период года (сут.)	6-8 0,000-0,200	8-10 0,200-0,400	10-12 0,400-0,600	12-14 0,600-0,800	14-16 0,800-1,000	6	Средняя за месяц температура воды °С	1-5 0,000-0,210	5-10 0,210-0,474	10-15 0,474-0,737	15-18 0,737-0,895	18-20 0,895-1,000	7	Продолжительность ледостава, месяц	6-4 0,000-0,167	5-1 0,167-0,333	4-1 0,333-0,500	3-2 0,500-0,667	2-0 0,667-1,000	8	Сезон года/месяц, баллы	ноябрь-март 6-5 0,000-0,200	апр.-окт. 5-1 0,200-0,400	май, сентябрь 4-3 0,400-0,600	июль, август 3-2 0,600-0,800	ноябрь 2-1 0,800-1,000	Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:		0,000-0,194	0,194-0,402	0,402-0,609	0,609-0,790	0,790-1,000																																										
№ п/п	Признаки	Классы устойчивости																																																																																																																																																	
		I min	II	III	IV	V max																																																																																																																																													
5	Ветровой режим: МП - количество дней со штилями в холодное время года (сут.)	3-4 0,000-0,200	4-5 0,200-0,400	5-6 0,400-0,600	6-7 0,600-0,800	7-8 0,800-1,000																																																																																																																																													
6	Средняя за месяц температура воды °С	20-18 0,000-0,105	18-15 0,105-0,265	15-10 0,265-0,526	10-5 0,526-0,789	5-1 0,789-1,000																																																																																																																																													
7	Продолжительность ледостава, месяц	0-2 0,000-0,333	2-3 0,333-0,500	3-4 0,500-0,667	4-5 0,667-0,833	5-6 0,833-1,000																																																																																																																																													
8	Сезон года/месяц, баллы	нояб. 1-2 0,000-0,200	нояб.-апрель 2-3 0,200-0,400	май, сентябрь 3-4 0,400-0,600	июль, окт. 4-5 0,600-0,800	ноябрь-апрель 5-6 0,800-1,000																																																																																																																																													
Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:		0,000-0,210 Δ-0,210 0,105	0,210-0,391 Δ-0,181 0,300	0,391-0,598 Δ-0,207 0,494	0,598-0,886 Δ-0,288 0,702	0,886-1,000 Δ-0,114 0,993																																																																																																																																													
№ п/п	Признаки	Классы устойчивости																																																																																																																																																	
		I min	II	III	IV	V max																																																																																																																																													
5	Ветровой режим: МП - количество дней с сильным ветром в теплый период года (сут.)	6-8 0,000-0,200	8-10 0,200-0,400	10-12 0,400-0,600	12-14 0,600-0,800	14-16 0,800-1,000																																																																																																																																													
6	Средняя за месяц температура воды °С	1-5 0,000-0,210	5-10 0,210-0,474	10-15 0,474-0,737	15-18 0,737-0,895	18-20 0,895-1,000																																																																																																																																													
7	Продолжительность ледостава, месяц	6-4 0,000-0,167	5-1 0,167-0,333	4-1 0,333-0,500	3-2 0,500-0,667	2-0 0,667-1,000																																																																																																																																													
8	Сезон года/месяц, баллы	ноябрь-март 6-5 0,000-0,200	апр.-окт. 5-1 0,200-0,400	май, сентябрь 4-3 0,400-0,600	июль, август 3-2 0,600-0,800	ноябрь 2-1 0,800-1,000																																																																																																																																													
Интегральный показатель устойчивости по климату ИПЗ:		0,000-0,194	0,194-0,402	0,402-0,609	0,609-0,790	0,790-1,000																																																																																																																																													
Группа 3. Гидрологические условия (субиндекс ИПЗa)						Группа 3. Гидрологические условия (субиндекс ИПЗa)																																																																																																																																													
Наличие сезонной стратификации, баллы						Наличие сезонной стратификации, баллы																																																																																																																																													
Вертикальное перемешивание, количество раз за <i>холодный период года</i>						Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>теплый период года</i>																																																																																																																																													
Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м						Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м																																																																																																																																													
Коэффициент проточности, км/сут						Коэффициент проточности, км/сут																																																																																																																																													
Характер регулирования, баллы						Характер регулирования, баллы																																																																																																																																													
Коэффициент водообмена, м³/год						Коэффициент водообмена, м³/год																																																																																																																																													
Скорость течения, м/с						Скорость течения, м/с																																																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th rowspan="2">Признаки МПa</th> <th colspan="5">Классы устойчивости</th> </tr> <tr> <th>I min</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Наличие сезонной стратификации, баллы¹</td> <td>2-2 0,000-0,000</td> <td>2-2 0,000-0,000</td> <td>2-1 0,000-1,000</td> <td>1-1 1,000-1,000</td> <td>1-1 1,000-1,000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>холодный период</i></td> <td>6-5 0,000-0,200</td> <td>5-4 0,200-0,400</td> <td>4-3 0,400-0,600</td> <td>3-2 0,600-0,800</td> <td>2-1 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м</td> <td>3-2,4 0,000-0,200</td> <td>2,4-1,8 0,200-0,400</td> <td>1,8-1,2 0,400-0,600</td> <td>1,2-0,6 0,600-0,800</td> <td>0,6-0 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Коэффициент проточности, км/сут</td> <td>0,35-0,28 0,000-0,203</td> <td>0,28-0,21 0,203-0,401</td> <td>0,21-0,14 0,401-0,602</td> <td>0,14-0,07 0,602-0,802</td> <td>0,07-0,001 0,802-1,000</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Характер регулирования, баллы²</td> <td>6-5 0,000-0,200</td> <td>5-4 0,200-0,400</td> <td>4-3 0,400-0,600</td> <td>3-2 0,600-0,800</td> <td>2-1 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Коэффициент водообмена, м³/год</td> <td>300-100 0,000-0,667</td> <td>100-30 0,667-0,902</td> <td>30-10 0,902-0,967</td> <td>10-3 0,967-0,990</td> <td>3-0,001 0,990-1,000</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Скорость течения, м/с</td> <td>5-3 0,000-0,612</td> <td>3-1,5 0,612-0,714</td> <td>1,5-1 0,714-0,816</td> <td>1-0,2 0,816-0,980</td> <td>0,2-0,1 0,980-1,000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):</td> <td>0,000-0,269 Δ-0,292 0,150</td> <td>0,269-0,460 Δ-0,163 0,380</td> <td>0,460-0,741 Δ-0,281 0,602</td> <td>0,741-0,882 Δ-0,142 0,814</td> <td>0,882-1,000 Δ-0,115 0,942</td> </tr> </tbody> </table>						№ п/п	Признаки МПa	Классы устойчивости					I min	II	III	IV	V max	1	Наличие сезонной стратификации, баллы ¹	2-2 0,000-0,000	2-2 0,000-0,000	2-1 0,000-1,000	1-1 1,000-1,000	1-1 1,000-1,000	2	Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>холодный период</i>	6-5 0,000-0,200	5-4 0,200-0,400	4-3 0,400-0,600	3-2 0,600-0,800	2-1 0,800-1,000	3	Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м	3-2,4 0,000-0,200	2,4-1,8 0,200-0,400	1,8-1,2 0,400-0,600	1,2-0,6 0,600-0,800	0,6-0 0,800-1,000	4	Коэффициент проточности, км/сут	0,35-0,28 0,000-0,203	0,28-0,21 0,203-0,401	0,21-0,14 0,401-0,602	0,14-0,07 0,602-0,802	0,07-0,001 0,802-1,000	5	Характер регулирования, баллы ²	6-5 0,000-0,200	5-4 0,200-0,400	4-3 0,400-0,600	3-2 0,600-0,800	2-1 0,800-1,000	6	Коэффициент водообмена, м³/год	300-100 0,000-0,667	100-30 0,667-0,902	30-10 0,902-0,967	10-3 0,967-0,990	3-0,001 0,990-1,000	7	Скорость течения, м/с	5-3 0,000-0,612	3-1,5 0,612-0,714	1,5-1 0,714-0,816	1-0,2 0,816-0,980	0,2-0,1 0,980-1,000	Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):		0,000-0,269 Δ-0,292 0,150	0,269-0,460 Δ-0,163 0,380	0,460-0,741 Δ-0,281 0,602	0,741-0,882 Δ-0,142 0,814	0,882-1,000 Δ-0,115 0,942	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th rowspan="2">Признаки МПp</th> <th colspan="5">Классы устойчивости</th> </tr> <tr> <th>I min</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Наличие сезонной стратификации, баллы¹</td> <td>1-1 0,000-0,000</td> <td>1-1 0,000-0,000</td> <td>1-2 0,000-1,000</td> <td>2-2 1,000-1,000</td> <td>2-2 1,000-1,000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>теплый период года</i></td> <td>1-2 0,000-0,200</td> <td>2-3 0,200-0,400</td> <td>3-4 0,400-0,600</td> <td>4-5 0,600-0,800</td> <td>5-6 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м</td> <td>0-6-0 0,000-0,200</td> <td>6-1-2 0,200-0,400</td> <td>1,2-1,8 0,400-0,600</td> <td>1,8-2,4 0,600-0,800</td> <td>2,4-3,0 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Коэффициент проточности, км/сут</td> <td>0,001-0,07 0,000-0,203</td> <td>0,07-0,14 0,203-0,401</td> <td>0,14-0,21 0,401-0,602</td> <td>0,21-0,28 0,602-0,802</td> <td>0,28-0,35 0,802-1,000</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Характер регулирования, баллы</td> <td>1-2 0,000-0,200</td> <td>2-3 0,200-0,400</td> <td>3-1 0,400-0,600</td> <td>4-5 0,600-0,800</td> <td>5-6 0,800-1,000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Коэффициент водообмена, м³/год</td> <td>0,001-3 0,000-0,667</td> <td>3-10 0,667-0,902</td> <td>10-30 0,902-0,967</td> <td>30-100 0,967-0,990</td> <td>100-300 0,990-1,000</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Скорость течения, м/с</td> <td>0,1-0,2 0,000-0,625</td> <td>0,2-1 0,625-0,729</td> <td>1-1,5 0,729-0,833</td> <td>1,5-2 0,833-1,000</td> <td>2-5 1,000-1,000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):</td> <td>0,000-0,118</td> <td>0,118-0,259</td> <td>0,259-0,541</td> <td>0,541-0,703</td> <td>0,703-1,000</td> </tr> </tbody> </table>						№ п/п	Признаки МПp	Классы устойчивости					I min	II	III	IV	V max	1	Наличие сезонной стратификации, баллы ¹	1-1 0,000-0,000	1-1 0,000-0,000	1-2 0,000-1,000	2-2 1,000-1,000	2-2 1,000-1,000	2	Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>теплый период года</i>	1-2 0,000-0,200	2-3 0,200-0,400	3-4 0,400-0,600	4-5 0,600-0,800	5-6 0,800-1,000	3	Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м	0-6-0 0,000-0,200	6-1-2 0,200-0,400	1,2-1,8 0,400-0,600	1,8-2,4 0,600-0,800	2,4-3,0 0,800-1,000	4	Коэффициент проточности, км/сут	0,001-0,07 0,000-0,203	0,07-0,14 0,203-0,401	0,14-0,21 0,401-0,602	0,21-0,28 0,602-0,802	0,28-0,35 0,802-1,000	5	Характер регулирования, баллы	1-2 0,000-0,200	2-3 0,200-0,400	3-1 0,400-0,600	4-5 0,600-0,800	5-6 0,800-1,000	6	Коэффициент водообмена, м³/год	0,001-3 0,000-0,667	3-10 0,667-0,902	10-30 0,902-0,967	30-100 0,967-0,990	100-300 0,990-1,000	7	Скорость течения, м/с	0,1-0,2 0,000-0,625	0,2-1 0,625-0,729	1-1,5 0,729-0,833	1,5-2 0,833-1,000	2-5 1,000-1,000	Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):		0,000-0,118	0,118-0,259	0,259-0,541	0,541-0,703	0,703-1,000
№ п/п	Признаки МПa	Классы устойчивости																																																																																																																																																	
		I min	II	III	IV	V max																																																																																																																																													
1	Наличие сезонной стратификации, баллы ¹	2-2 0,000-0,000	2-2 0,000-0,000	2-1 0,000-1,000	1-1 1,000-1,000	1-1 1,000-1,000																																																																																																																																													
2	Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>холодный период</i>	6-5 0,000-0,200	5-4 0,200-0,400	4-3 0,400-0,600	3-2 0,600-0,800	2-1 0,800-1,000																																																																																																																																													
3	Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м	3-2,4 0,000-0,200	2,4-1,8 0,200-0,400	1,8-1,2 0,400-0,600	1,2-0,6 0,600-0,800	0,6-0 0,800-1,000																																																																																																																																													
4	Коэффициент проточности, км/сут	0,35-0,28 0,000-0,203	0,28-0,21 0,203-0,401	0,21-0,14 0,401-0,602	0,14-0,07 0,602-0,802	0,07-0,001 0,802-1,000																																																																																																																																													
5	Характер регулирования, баллы ²	6-5 0,000-0,200	5-4 0,200-0,400	4-3 0,400-0,600	3-2 0,600-0,800	2-1 0,800-1,000																																																																																																																																													
6	Коэффициент водообмена, м³/год	300-100 0,000-0,667	100-30 0,667-0,902	30-10 0,902-0,967	10-3 0,967-0,990	3-0,001 0,990-1,000																																																																																																																																													
7	Скорость течения, м/с	5-3 0,000-0,612	3-1,5 0,612-0,714	1,5-1 0,714-0,816	1-0,2 0,816-0,980	0,2-0,1 0,980-1,000																																																																																																																																													
Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):		0,000-0,269 Δ-0,292 0,150	0,269-0,460 Δ-0,163 0,380	0,460-0,741 Δ-0,281 0,602	0,741-0,882 Δ-0,142 0,814	0,882-1,000 Δ-0,115 0,942																																																																																																																																													
№ п/п	Признаки МПp	Классы устойчивости																																																																																																																																																	
		I min	II	III	IV	V max																																																																																																																																													
1	Наличие сезонной стратификации, баллы ¹	1-1 0,000-0,000	1-1 0,000-0,000	1-2 0,000-1,000	2-2 1,000-1,000	2-2 1,000-1,000																																																																																																																																													
2	Вертикальное перемешивание, кол-во раз за <i>теплый период года</i>	1-2 0,000-0,200	2-3 0,200-0,400	3-4 0,400-0,600	4-5 0,600-0,800	5-6 0,800-1,000																																																																																																																																													
3	Внутрисезонная амплитуда колебаний уровня, м	0-6-0 0,000-0,200	6-1-2 0,200-0,400	1,2-1,8 0,400-0,600	1,8-2,4 0,600-0,800	2,4-3,0 0,800-1,000																																																																																																																																													
4	Коэффициент проточности, км/сут	0,001-0,07 0,000-0,203	0,07-0,14 0,203-0,401	0,14-0,21 0,401-0,602	0,21-0,28 0,602-0,802	0,28-0,35 0,802-1,000																																																																																																																																													
5	Характер регулирования, баллы	1-2 0,000-0,200	2-3 0,200-0,400	3-1 0,400-0,600	4-5 0,600-0,800	5-6 0,800-1,000																																																																																																																																													
6	Коэффициент водообмена, м³/год	0,001-3 0,000-0,667	3-10 0,667-0,902	10-30 0,902-0,967	30-100 0,967-0,990	100-300 0,990-1,000																																																																																																																																													
7	Скорость течения, м/с	0,1-0,2 0,000-0,625	0,2-1 0,625-0,729	1-1,5 0,729-0,833	1,5-2 0,833-1,000	2-5 1,000-1,000																																																																																																																																													
Интегральный показатель устойчивости по гидрологии (ИПЗ):		0,000-0,118	0,118-0,259	0,259-0,541	0,541-0,703	0,703-1,000																																																																																																																																													

Рис 3. Группы, классификации для субиндексов и оценочные шкалы для интегральной оценки адаптационной (Ma) и регенерационной (Mp) устойчивости.

В процессе работы были сформулированы и проверены три основные гипотезы, приведенные в табл.1.

Таблица 1.

Гипотезы, подлежащие проверке при выполнении исследований в 2023 г.

1.	Оценки ИПУ водоёма, выполненные в полевых условиях на основе метода балльно-индексной оценки и в стационарных условиях, при использовании метода сводных показателей по различным моделям-классификациям, построенным с использованием отличающихся критериев, не должны противоречить друг другу. В [7] было также показано, что модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «0» и модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «1», дают один класс устойчивости реального водоёма.
2.	Использование двух типов устойчивости в оценочных исследованиях (Ma и Mp), различающихся направленностью оценочных шкал в некоторых критериях, уточняют причины формирования устойчивости в холодное и теплое время (в Ma – «система спит и медленно адаптируется», в Mp – «система активно самоочищается и трансформируется», скорости процессов переноса, трансформации и самоочищения достигают максимальных значений с ростом температуры воды, дает возможность учесть изменение внутрисезонных механизмов формирования устойчивости водоёма на годовом этапе развития водной экосистемы. В [7] было также показано, что учет ИПУ в Ma на основе адаптационной устойчивости и в Mp на основе регенерационной устойчивости не приводит к разным результатам в оценке ИПУ.
3.	Учет неполной, неточной и нечисловой информации при построении интегральных показателей устойчивости (этап 5, рис.2) дает возможность расчета (моделирования) веса отдельных критериев в

сводной оценке. Это также позволяет реализовать этап 7, перейти к среднему значению ИПУ и получить точность оценки ($\text{ИПУ} \pm S$), (рис.2).

Оценочные шкалы для ИП1а, ИП2а, ИП3а, ИПУа; ИП1р, ИП2р, ИП3р и ИПУр и оценочная шкала последнего уровня свертки показателей ИПУ приведены на рис.4.

Интегральный показатель устойчивости ИП1а	0,000-0,014 $\Delta=0,014$ 0,007	0,014-0,029 $\Delta=0,015$ 0,022	0,029-0,167 $\Delta=0,138$ 0,098	0,167-0,614 $\Delta=0,447$ 0,390	0,614-1,000 $\Delta=0,386$ 0,807
Интегральный показатель устойчивости по климату ИП2а	0,000-0,210 $\Delta=0,210$ 0,105	0,210-0,391 $\Delta=0,181$ 0,300	0,391-0,598 $\Delta=0,207$ 0,494	0,598-0,806 $\Delta=0,208$ 0,702	0,806-1,000 $\Delta=0,194$ 0,903
Интегральный показатель устойчивости по гидрологии ИП3а	0,000-0,269 $\Delta=0,269$ 0,150	0,269-0,460 $\Delta=0,163$ 0,380	0,460-0,741 $\Delta=0,281$ 0,602	0,741-0,882 $\Delta=0,142$ 0,814	0,882-1,000 $\Delta=0,115$ 0,942
Интегральный показатель устойчивости ИПУа	0,000-0,164 $\Delta=0,164$ 0,082	0,164-0,293 $\Delta=0,129$ 0,229	0,293-0,502 $\Delta=0,209$ 0,398	0,502-0,767 $\Delta=0,265$ 0,634	0,767-1,000 $\Delta=0,233$ 0,384
Интегральный показатель устойчивости ИП1р	0,000-0,015 $\Delta=0,015$ 0,007	0,015-0,030 $\Delta=0,015$ 0,023	0,030-0,168 $\Delta=0,138$ 0,099	0,168-0,614 $\Delta=0,391$ 0,364	0,614-1,000 $\Delta=0,386$ 0,807
Интегральный показатель устойчивости по климату ИП2р	0,000-0,194 $\Delta=0,194$ 0,097	0,194-0,402 $\Delta=0,208$ 0,298	0,402-0,609 $\Delta=0,207$ 0,506	0,609-0,790 $\Delta=0,181$ 0,700	0,790-1,000 $\Delta=0,210$ 0,895
Интегральный показатель устойчивости по гидрологии ИП3р	0,000-0,118 $\Delta=0,118$ 0,059	0,118-0,259 $\Delta=0,141$ 0,189	0,259-0,541 $\Delta=0,282$ 0,400	0,541-0,703 $\Delta=0,162$ 0,622	0,703-1,000 $\Delta=0,297$ 0,852
Интегральный показатель устойчивости ИПУр	0,000-0,109 $\Delta=0,109$ 0,055	0,109-0,230 $\Delta=0,121$ 0,170	0,230-0,439 $\Delta=0,209$ 0,335	0,439-0,702 $\Delta=0,263$ 0,571	0,702-1,000 $\Delta=0,298$ 0,851

а)

ИПУа	Интегральный показатель устойчивости ИПУа	0,000-0,164 $\Delta=0,164$ 0,082	0,164-0,293 $\Delta=0,129$ 0,229	0,293-0,502 $\Delta=0,209$ 0,398	0,502-0,767 $\Delta=0,265$ 0,634	0,767-1,000 $\Delta=0,233$ 0,384
ИПУр	Интегральный показатель устойчивости ИПУр	0,000-0,109 $\Delta=0,109$ 0,055	0,109-0,230 $\Delta=0,121$ 0,170	0,230-0,439 $\Delta=0,209$ 0,335	0,439-0,702 $\Delta=0,263$ 0,571	0,702-1,000 $\Delta=0,298$ 0,851
ИПУ	Интегральный показатель устойчивости ИПУ	0,000-0,137 $\Delta=0,137$ 0,069	0,137-0,262 $\Delta=0,125$ 0,200	0,262-0,471 $\Delta=0,209$ 0,367	0,471-0,735 $\Delta=0,264$ 0,603	0,735-1,000 $\Delta=0,234$ 0,868

б)

Рис 4. Второй (а) и третий (б) уровни свертки показателей для получения оценочных шкал ИПУа, ИПУр, ИПУ. На рис. приведены левая и правая границы нормированных значений ИПУ, ниже – ширина диапазона для класса (Δ), в последней строке – ИПУ для середины класса.

Также в рамках работы выполнена попытка учесть неравномерность в задании различных приоритетов (весов) для ИПУа и ИПУр на последнем этапе свертки субиндексов. Поскольку тёплое время года на территории Приладожья по времени выражено дольше холодного, в расчётах больший вес в одном из расчетов был задан субиндексу регенерационной устойчивости (ИПУр). Как при одинаковых ($\text{ИПУа}=\text{ИПУр}=0,5$), так и при разных ($0,20 \leq \text{ИПУа} \leq 0,45$; $0,55 \leq \text{ИПУр} \leq 0,80$) весах воды озера Суури в итоге попадают в IV класс устойчивости (левая граница). Среднее значение $\text{ИПУ}=0,509$. Среднее квадратическое отклонение в оценке ИПУ в этом варианте составляет 0,011. Расчёты и результаты представлены на рис. 4. Таким образом, точность оценки $\text{ИПУ}=0,509 \pm 0,011$. По минимальному значению $\text{ИПУ} 0,509 - 0,011 = 0,498$ мы попадаем в IV класс устойчивости. По максимальному значению $\text{ИПУ} = 0,509 + 0,011 = 0,520$ мы также попадаем в IV класс устойчивости, ближе к левой границе класса.

Тип ИПУ	Вес	Расчитанный ИПУ с заданными весами	Класс устойчивости
ИПУа	0,45	0,525	IV класс левая граница
ИПУр	0,55		
ИПУа	0,4	0,518	IV класс левая граница
ИПУр	0,6		
ИПУа	0,35	0,512	IV класс левая граница
ИПУр	0,65		
ИПУа	0,3	0,506	IV класс левая граница
ИПУр	0,7		
ИПУа	0,25	0,500	IV класс левая граница
ИПУр	0,75		
ИПУа	0,2	0,493	IV класс левая граница
ИПУр	0,8		

Рис. 4. Заданные приоритеты (веса) для ИПУ_а и ИПУ_р в расчетах ИПУ и класс устойчивости при разных приоритетах (весах) в оценке ИПУ (фрагмент).

Заключение

Разработаны модели-классификации интегральной оценки ИПУ водоема на основе построения композитных индексов. Новизной исследования является сочетание многокритериальности и полииерархичности в построении ИПУ. Потенциальная устойчивость (устойчивость к изменению параметров естественного режима) оценивается дважды: для теплого и холодного времени года по трем группам признаков: 1-морфометрия (4 показателя), 2-климатические и физико-географические особенности (4 показателя), 3-гидрологические условия и водный режим (7 показателей). При этом, для холодного времени года оценивается адаптационная устойчивость, а для теплого время года – регенерационная устойчивость к изменению параметров режимов. Оценено сочетание факторов, определяющих первый и второй тип устойчивости на годовом этапе развития водоема. Построение ИПУ выполнялось для равновесных и неравновесных условий внутри уровней (блоков) и между ними. В расчетах выполнена проверка трех рабочих гипотез для характеристики работоспособности модели и совершенствования технологии построения ИПУ. Показано, что: 1- оценки устойчивости водоёма, выполненные в полевых условиях на основе метода балльно-индексной оценки и в стационарных условиях, при использовании метода сводных показателей по различным моделям-классификациям, построенным с использованием отличающихся критериев, не противоречат друг другу, но балльно-индексный метод дал ошибку в оценке +1 класс; 2- использование двух типов устойчивости в оценочных исследованиях (адаптационная и регенерационная), различающихся направленностью оценочных шкал в некоторых критериях, характеризуют причины формирования устойчивости в холодное время года (система спит и медленно адаптируется) и в теплое время года (система активно самоочищается и трансформируется, скорости процессов переноса, трансформации и самоочищения достигают максимальных значений с ростом температуры воды), дает возможность учесть изменение внутригодовых механизмов формирования устойчивости водоема на годовом этапе развития водной экосистемы; 3- учет *ннн*-информации при построении ИПУ дает возможность расчета (моделирования) веса отдельных критериев в сводной оценке. Задание нечисловой (порядковой) информации для веса субиндексов ИПУ_а и ИПУ_р на последнем этапе оценки: $w_p > w_a$ позволило реализовать переход к среднему значению ИПУ и получить точность оценки ИПУ $\pm S$. По результатам интегральной оценки потенциальной устойчивости оз.Суури ИПУ=0,509±0,011 озеро во всех случаях отнесено к IV классу устойчивости (устойчивость ниже средней), ближе к левой границе класса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Литература

1. Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции (Калининград, 25-30 июля 2011 г). – Калининград: Капрос, 2011. – 592 с.
2. Dmitriev, V. V., Terleev, V. V., Nikonorov, A. O., Ogurtsov, A. N., Osipov, A. G., Sergeyev, Y. N., Kulesh, V. P., Fedorova, I. V. (2020). Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. *Landscape Modelling and Decision Support*, 231–253. doi:10.1007/978-3-030-37421-1_12
3. Атаев, Д.М. Методические аспекты оценки уязвимости экономики регионов России для внешних угроз и ограничений / Д.М. Атаев // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. – 2022. – № 4. – С. 283–294.
4. Чернова О. А. Экосистемные услуги водных объектов в обеспечении устойчивого развития региона // Регионология. 2022 Т. 30, № 3 С. 586–601. doi: <https://doi.org/10.15507/2413-1407.120.030.202203.586-601>
5. Андреас Фишлин, Г.Ф. Мидгли (2009) Риски для экосистем - ключевые выводы из Четвертого оценочного доклада МГЭИК. IOP Conf. Серия: Наука о земле и окружающей среде 6 (2009) 062014 doi:10.1088/1755-1307/6/6/062014
6. МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. В: Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I. Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Массон-Дельмотт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Голдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж.Б.Р. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р.Ю. и Б. Чжоу (ред.)]. Кембридж юниверсити пресс. 2021
7. Архипов Д.Э., Едемский К.Е., Кожевникова С.И., Дмитриев В.В. РАЗВИТИЕ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ // *European Journal of Natural History*. – 2022. – № 2. – С. 31-37.