

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 556.55(043.3)(476)+551.582/.583(043.3)(476)

**СУХОВИЛО**  
**Нина Юрьевна**

**ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ОЗЕРНЫХ ГЕОСИСТЕМ БЕЛАРУСИ  
К ВНЕШНЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук  
по специальности 25.03.01 – физическая география и биогеография,  
география почв и геохимия ландшафтов

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель – **Новик Алексей Александрович**,  
кандидат географических наук, доцент,  
доцент кафедры общего  
землеведения и гидрометеорологии  
Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Волчек Александр Александрович**,  
доктор географических наук, профессор,  
декан факультета инженерных систем и  
экологии учреждения образования  
«Брестский государственный  
технический университет»

**Токарчук Олег Васильевич**,  
кандидат географических наук, доцент,  
доцент кафедры географии и  
природопользования факультета  
естествознания учреждения образования  
«Брестский государственный  
университет имени А.С. Пушкина»

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение  
«Институт природопользования  
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 8 июня 2022 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.06 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 8, юридический факультет, ауд. 407. Телефон ученого секретаря +375 17 209 55 58; e-mail: kurlovich@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «04» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций Д 02.01.06,  
кандидат географических наук, доцент



Д. М. Курлович

## ВВЕДЕНИЕ

Озерные геосистемы являются важным элементом ландшафта и неотъемлемой частью природного комплекса Беларуси. Реакция озерных геосистем на внешнее воздействие обусловлена их способностью аккумулировать вещества, которые циркулируют в пределах водосбора и достигают наиболее низкой его части – озерной котловины. Однако устойчивость озерных геосистем к внешнему воздействию отмечается только до определенного уровня, после которого начинается их переход в менее уязвимое состояние. Одной из задач Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. является оценка экологических рисков в условиях радикальных изменений климатических условий, структуры и характера землепользования, антропогенной трансформации экосистем. В связи с изменением климатических условий на территории Беларуси на фоне антропогенного воздействия на озера особую актуальность приобретает комплексный анализ морфологических, морфометрических, гидрохимических и гидрологических показателей озерных геосистем страны в виде интегральной оценки их уязвимости, и ее прогноз с целью своевременного проведения мероприятий, направленных на предотвращение снижения качества водных ресурсов озер.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Диссертационная работа выполнялась в НИЛ озераведения и на кафедре общего землеведения и гидрометеорологии БГУ в рамках плановых НИР: «Продолжить мониторинг основных абиотических и биотических параметров озера-охладителя Лукомльской ТЭС. Оценить роль литоральной зоны в формировании экологического состояния озера» (НИР БГУ № ГР 20171638, 2017–2018 гг.); «Комплексная оценка состояния экосистемы озера Лукомское в условиях эксплуатации его как озера-охладителя с использованием ПГУ» (НИР БГУ № ГР 20191812, 2019–2020 гг.); «Оценить современное состояние озер национального парка „Нарочанский” с учетом углубленного изучения зарастания высшей водной растительностью (макрофитами)» (мероприятие 26 «Оценка современного состояния и реализация мер по снижению уровня деградации водоемов, расположенных на территории национальных парков „Браславские озера” и „Нарочанский” (п. 26.2 НП „Нарочанский)» подпрограммы 4 «Сохранение и устойчивое использование биологического и ландшафтного разнообразия» Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 годы), № ГР 20164690, 2016–2019 гг.); «Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации озер национального парка „Браславские озера” (мероприятие 26 «Оценка современного состояния и реализация мер по снижению уровня деградации водоемов, расположенных на территории

национальных парков „Браславские озера” и „Нарочанский” п. 26.1 НП „Браславские озера”)» подпрограммы 4 «Сохранение и устойчивое использование биологического и ландшафтного разнообразия» Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 годы), № ГР 20180485, 2018–2020 гг.); «Межрегиональная пространственно-временная корреляция развития окружающей среды южной периферии Валдайского (Поозерского) оледенения в позднеледниковье и в голоцене» (грант БРФФИ, № ГР 20181416, 2018–2020 гг.); «Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания» (мероприятие 29 подпрограммы 5 «Обеспечение функционирования, развития и совершенствования Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь» Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 гг., № ГР 20162806, 2016–2020 гг.); «Озера Беларуси в условиях изменяющегося климата (современное состояние, динамика и прогноз)» (грант Министерства образования Республики Беларусь, № ГР 20190765, 2019 г.); «Пространственные закономерности изменения трофического статуса озер Беларуси под влиянием климатических условий» (грант Министерства образования Республики Беларусь, № ГР 20200508, 2020 г.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г., п. 3 «Энергетика, экология и рациональное природопользование».

**Цель и задачи исследования.** *Цель работы* заключалась в выявлении пространственно-временных закономерностей изменения уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию и ее прогнозировании в условиях изменяющегося климата.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить несколько взаимосвязанных *задач*:

- разработать методику расчета интегральных индексов уязвимости озерных геосистем Беларуси;
- оценить уязвимость озерных геосистем к внешнему воздействию и установить пространственно-временные закономерности ее изменения;
- разработать типизацию озерных геосистем Беларуси по степени уязвимости к внешнему воздействию;
- выявить основные направления влияния климатических условий на уязвимость разнотипных озерных геосистем;
- разработать рекомендации по предотвращению или минимизации негативного воздействия хозяйственной деятельности человека на озера в условиях климатических изменений.

*Объект исследования* – озерные геосистемы Беларуси.

*Предмет исследования* – уязвимость озерных геосистем к внешнему воздействию и факторы, ее определяющие.

**Научная новизна.** Впервые разработана методика интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию, рассчитаны интегральные индексы уязвимости 149 разнотипных озерных геосистем, находящихся на различных стадиях естественной эволюции, а также подвергшихся антропогенному эвтрофированию. Создана типизация и выявлены пространственные закономерности изменения уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию. Дан прогноз ее изменения до 2050 г. при сценариях выбросов парниковых газов RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Предложены мероприятия по минимизации негативного влияния климатических изменений на озерные геосистемы Беларуси.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. *Оригинальная методика интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси*, позволяющая с использованием 14 теоретически обоснованных морфометрических, гидродинамических и гидрохимических параметров, отражающих взаимосвязь озера с водосбором, количественно оценить степень уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию. Полученный индекс уязвимости является безразмерной величиной, изменяется в пределах от 0 до 1 и служит инструментом для определения допустимых нагрузок на озера и их водосборы.

2. *Двухступенчатая типизация (тип – подтип) озерных геосистем Беларуси по степени уязвимости к внешнему воздействию на основе интегральных индексов уязвимости, с учетом положения в рельефе, площади, периода водообмена и термической стратификации.* Выделено три типа озерных геосистем: с высокой степенью уязвимости (индексы уязвимости выше 0,548); со средней степенью уязвимости (значения индексов 0,442–0,548); с низкой степенью уязвимости (значения индексов уязвимости ниже 0,442), каждый из которых в зависимости от площади акватории, силы стратификации, периода водообмена и гипсометрического положения делится на 2–3 подтипа. Разработанная типизация позволяет определять допустимые нормы антропогенного воздействия на слабо изученные водные объекты, а также прогнозировать изменение уязвимости озерных геосистем.

3. *Закономерности пространственного распределения уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию, заключающиеся в ее увеличении по мере роста их гипсометрического уровня.* Анализ пространственных закономерностей распределения озерных геосистем с различной степенью уязвимости выявил, что на низинах среднее значение индексов уязвимости составило 0,433, на равнинах – 0,451, на возвышенностях – 0,557. На основании преобладающей степени уязвимости озерных геосистем выделено 20 районов (из них в 8 преобладают озерные геосистемы с высокой уязвимостью, в 7 – со средней, в 5 – с низкой).

4. *Прогнозные сценарии трансформации уязвимости озерных геосистем Беларуси до 2050 г. в условиях климатических изменений.* При изменении климатических условий по сценарию эмиссии парниковых газов RCP2.6 к концу XXI века температура воды в озерах вырастет на 2 °С, что повлечет за собой незначительное увеличение уязвимости стратифицированных озер к внешнему воздействию. Согласно наиболее вероятному сценарию RCP4.5 температура воды в озерах вырастет на 2,3–2,8 °С, что вызовет вначале рост, затем – снижение их уязвимости к внешнему воздействию из-за эвтрофирования озер, сценарий RCP8.5 предполагает повышение температуры воды на 4–4,5 °С, в результате чего произойдет более существенная перестройка всех озерных геосистем со снижением их уязвимости.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертационная работа является самостоятельно выполненным научным трудом, основанным на использовании литературных, картографических и фондовых материалов ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» и НИЛ озераведения БГУ, а также личных полевых исследований, проведенных на 21 объекте исследования в 2017–2020 гг. Автором самостоятельно определены цель и задачи исследования, обоснованы методические положения интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию, осуществлены сбор, обработка, интерпретация, анализ и обобщение фактического материала. Впервые разработана методика интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию и их типизация по этому показателю. Выполнена прогнозная оценка будущего состояния озерных геосистем при различных сценариях климатических изменений. Выявлены и научно обоснованы направления воздействия на озерные геосистемы с различной уязвимостью к динамике параметров внешней среды. Основные результаты и выводы по диссертационной работе получены соискателем лично.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты исследования докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: 71 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2014); VI межвузовской конференции по итогам практик (Москва, 2014); 72 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2015); V Международной научной конференции «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата» (Минск, 2015); VII Молодежном конгрессе по итогам практик (Москва, 2015); 73 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2016); 74 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2017); Международной конференции «Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси» (Гомель, 2017); Семинаре по проекту ЮНЕСКО №8290115042 ВУЕ «Роль озерных геосистем Беларуси в поступлении парниковых

газов в региональном климатическом контексте» (Минск, 2018); Международной научно-практической конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии» памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова (Санкт-Петербург, 2018); 75 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2018); VI международном научно-практическом семинаре «Современные технологии в деятельности ООПТ: ГИС, ДЗЗ (ГИС-Нарочь\_2018)» (Нарочь, 2018); Международной конференции «Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии (к 110-летию со дня рождения профессора В.А. Дементьева)» (Минск, 2018); XV Большом Географическом фестивале (Санкт-Петербург, 2019); 76 научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 2019); II международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» (Казань, 2019); конференции «Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ)» (Нарочь, 2019); Республиканской конференции с международным участием «Современные проблемы естествознания в науке и образовательном процессе» (Минск, 2019); IX International scientific conference of young scientists, students, master students and post-graduates «Actual environmental problems» (Minsk, 2019). Полученные результаты используются в научной деятельности ГПУ «Национальный парк „Нарочанский”», ГПУ «Национальный парк „Браславские озера”», в образовательном процессе кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ.

**Опубликование результатов диссертации.** Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 28 работах (без соавторов – 18), в том числе: 3 статьях в рецензируемых научных изданиях и 5 статьях в зарубежных научных изданиях (объемом 6,32 авт. листа), соответствующих п. 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь; 1 статье в сборнике научных статей, 11 публикациях в сборниках материалов научных конференций, 8 тезисах докладов. Общий объем опубликованных материалов составляет 12,32 авт. листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав основной части, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 195 страниц, из которых 7 страниц занимают 12 таблиц, 40 страниц – 75 рисунков, 23 страницы – 7 приложений. Библиографический список включает 214 наименований на 18 страницах, в том числе список публикаций соискателя из 28 наименований на 4 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В главе 1 «Научно-теоретические и методические основы исследования влияния природно-климатических и антропогенных факторов на уязвимость озерных геосистем» анализируется состояние исследований в области влияния термо- и гидродинамики озер, обусловленной в значительной мере климатическими**

условиями территории, на их уязвимость и устойчивость, влияние размеров, структуры водосбора и физико-географических условий на уязвимость озера к внешнему воздействию, а также описана методика оценки уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию.

Изучение перемешивания в озерах и водохранилищах является важным и активно развивающимся направлением исследований в области механики жидкости. Его исследованию посвящены работы E. Birge, W. Schmidt, B. Хомскиса, Н. Fischer, J. Imberger, D. Imboden, В. Boehrer. Исследование теплообмена в озерах Беларуси отражено в работах О.Ф. Якушко (термическая классификация озер), Л. В. Гурьяновой (термодинамические характеристики) и др. Закономерности, выявленные в ходе предыдущих исследований, не всегда соблюдаются в период потепления климата. Общие направления динамики термического режима водоемов и географические особенности процессов, протекающих в них при изменении климата, описаны в работах R. Adrian, W. Vincent, M. Dokulil, G. George, C. Williamson, S. Weinberger, R. Woolway, Ch. Merchant.

Следующим важным направлением исследования динамики озерных геосистем под влиянием климатических факторов является анализ устойчивости и уязвимости водоемов к внешнему воздействию. Здесь выделяются теория альтернативных устойчивых состояний (M. Scheffer, S. Carpenter, T. Amemiya, C. Dent, E. Jeppesen), развиваемая в зарубежной литературе, и исследования российских ученых, направленные на количественную интегральную оценку устойчивости озерных экосистем (В.В. Дмитриев, В.Н. Михайлов, К.К. Эдельштейн, Е.А. Примак и др.). Влияние водосборной территории и водообмена на экологическое состояние озер исследовалось Л.Л. Россолимо, И.Н. Сорокиным, П.С. Лопухом, Б.П. Власовым. Исследованию термической и экологической устойчивости озер Беларуси посвящены работы О.Ф. Якушко, Г.М. Базыленко и Л.В. Гурьяновой, В.П. Романова, А.А. Новика. Однако комплексную оценку уязвимости, основанную на использовании морфометрических, гидродинамических, гидрохимических параметров, до настоящего времени не проводили.

В основу данного исследования положена методика расчета интегральных индексов уязвимости для больших озер, основанная на методе рандомизированных сводных показателей. Она была разработана с учетом морфометрических, гидрологических и гидрохимических особенностей водоемов Беларуси.

Поскольку существуют различия в терминологии, используемой в гидробиологических и физико-географических исследованиях, следует дать определение понятиям устойчивости и уязвимости озерных геосистем. *Устойчивость озерной геосистемы* – ее способность сохранять квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях действующих на нее внешних и внутренних нагрузок на определенном временном интервале функционирования. *Уязвимость озерной геосистемы* – ее неспособность сохранять указанные свойства на

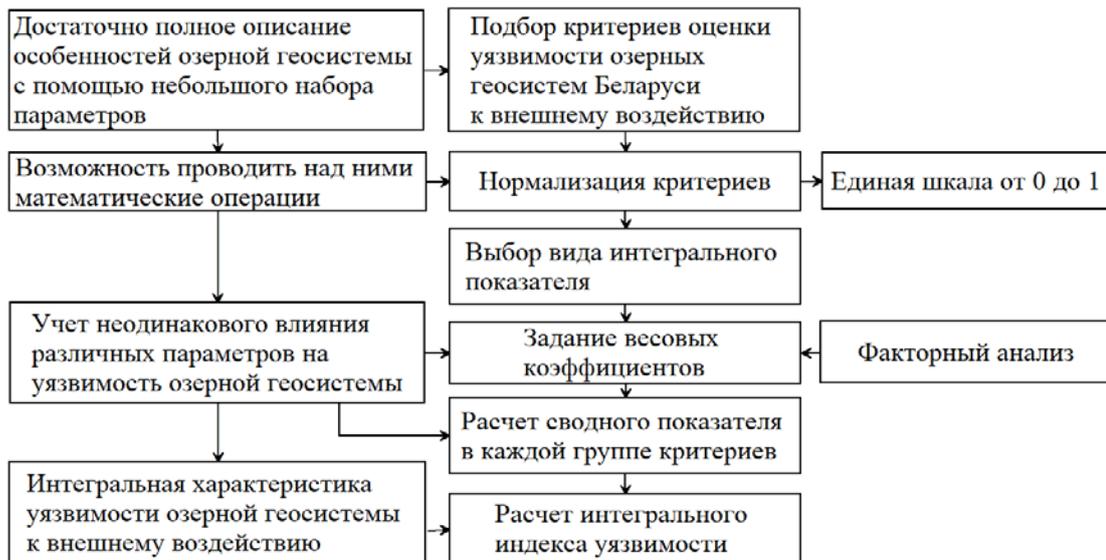
определенном временном интервале функционирования. При таком подходе наименее уязвимой к изменению каких-либо свойств будет система, наделенная этими свойствами в наибольшей мере (Дмитриев В.В., 2010). Под *внешним воздействием* понимаются как антропогенное воздействие на гидрохимический, гидродинамический или термический режимы озера (сбросы сточных вод, внесение большого количества удобрений на водосбор, тепловое загрязнение, строительство мелиоративных систем и др.), так и изменение природной среды, способное изменять параметры озерных геосистем.

Исследование проводилось на основе следующих методов: экспедиционного, анализа, синтеза, сравнительно-географического, картографического, математической статистики (регрессионного, корреляционного, факторного и кластерного анализа, метода рандомизированных сводных показателей), компьютерного моделирования, прогностического.

С целью оценки уязвимости к внешнему воздействию и последующей типизации по этому признаку было отобрано 149 озерных геосистем. Основными критериями при их отборе послужили широкий территориальный охват (объекты исследования расположены на территории всех физико-географических провинций Беларуси); изученность озер (наличие морфометрических, гидродинамических, гидрохимических характеристик, данных о распределении температуры воды с глубиной); относительно пропорциональное соотношение озер различных генетических типов, находящихся на разных стадиях эволюции; наличие озерных геосистем, функционирующих в естественных условиях, а также сильно преобразованных хозяйственной деятельностью человека. Расчет интегральных индексов уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию проводился с помощью метода рандомизированных сводных показателей (МРСП). Перечень критериев оценки, общая схема расчета индекса и его взаимосвязи с внешними условиями отражены на рисунке 1, алгоритм расчета – на рисунке 2.



**Рисунок 1. – Влияние различных факторов на уязвимость озерных геосистем к внешнему воздействию**



**Рисунок 2. – Алгоритм расчета интегральных индексов уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию**

Данная методика впервые применялась для оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси.

**Глава 2 «Условия формирования уязвимости озерных геосистем Беларуси»** посвящена анализу влияния генезиса котловин, условий развития озерных геосистем на их уязвимость к внешнему воздействию и характеристике современного состояния исследуемых озер как результата взаимодействия естественных и антропогенных факторов.

С момента своего формирования до второй половины XX века эволюция озерных геосистем протекала, главным образом, в естественных условиях. На этом этапе генетические, морфологические и морфометрические особенности водоемов и их водосборов играли ведущую роль в изменении их уязвимости. На протяжении эволюции озерных геосистем их уязвимость постоянно менялась, снижаясь по мере потепления климата, достигшего своего максимума в атлантике, и возрастая при похолоданиях и в засушливые периоды. Рост уязвимости в эти периоды связан с уменьшением стока с водосборов и объема воды. Следует отметить, что наименее уязвимыми к внешнему воздействию являлись приледниковые водоемы с большой площадью и объемом водной массы, аналогов которых в настоящее время на территории Беларуси нет. Наиболее уязвимыми сейчас являются геосистемы с озерами ложбинного и эвразийского происхождения, наименее – подпрудного. В качестве современных аналогов при исследовании уязвимости озер позднеледниковья можно рассматривать низкоминерализованные озера (Бредно, Глубокое, Чербомысло), которые благодаря очень малым площадям водосборов, редко превышающим 1 км<sup>2</sup>, и почти полному отсутствию хозяйственной деятельности сохраняют низкую концентрацию растворенных веществ и реликтовые виды водной флоры на протяжении тысячелетий.

В настоящее время водоемы Беларуси различаются не только по морфометрическим показателям, во многом определяемым генезисом котловин, но и испытывают антропогенную нагрузку разной интенсивности, в результате которой изменяется характер водообмена, химический состав воды и другие показатели. Среди исследуемых озер есть мезотрофные с признаками олиготрофии (Болдук, Волосо Южный), мезотрофные (Нарочь, Струсто), эвтрофные (Выгонощанское, Белое (Брестский район), Езерище и др.) и дистрофные (Ельня, Жеринское). Наиболее разнообразны как в численном отношении, так и по диапазону колебаний гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик, эвтрофные водоемы. Кроме указанных водоемов, существуют также гиперэвтрофные водоемы, которые служат приемниками сточных вод с промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

В результате взаимодействия климатических, геоморфологических, геохимических и антропогенных факторов, связующим звеном между которыми является внешний и внутренний водообмен, в озерах сформировался специфический водный, термический, гидрохимический и гидробиологический режим, который в итоге определяет характер отклика озерных геосистем на внешнее воздействие. Поэтому для объективного отражения существующих факторов и условий, влияющих на уязвимость озерных геосистем, необходим анализ гидрологического и гидрохимического режима разнотипных водных объектов, функционирующих как в пределах особо охраняемых природных территорий с почти ненарушенным режимом, так и вблизи крупных населенных пунктов и промышленных предприятий, являющихся источниками поступления в водную массу загрязняющих веществ.

Различия морфологии, морфометрии, трофического уровня озер, наличие геосистем, развивающихся в естественных условиях, а также испытывающих антропогенную нагрузку, определяют репрезентативность выборки и позволяют достоверно оценить особенности изменения уязвимости разнотипных озерных геосистем в условиях происходящих климатических изменений.

**В главе 3 «Общие закономерности формирования уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию» рассматриваются вопросы уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию в условиях изменения природно-климатических условий или антропогенной нагрузки, показана роль процессов внешнего и внутреннего водообмена в ее формировании.**

На основе рассчитанных индексов уязвимости озер к внешнему воздействию была разработана их типизация по этому показателю. Алгоритм проведения типизации иллюстрирует рисунок 3. Всего было выделено три типа озерных геосистем: с высокой, средней и низкой степенью уязвимости. В составе типов, в зависимости от морфометрии, скорости водообмена и степени стратификации водной массы, были выделены 8 подтипов озерных геосистем. В таблице дана краткая характеристика выделенных типов и подтипов.

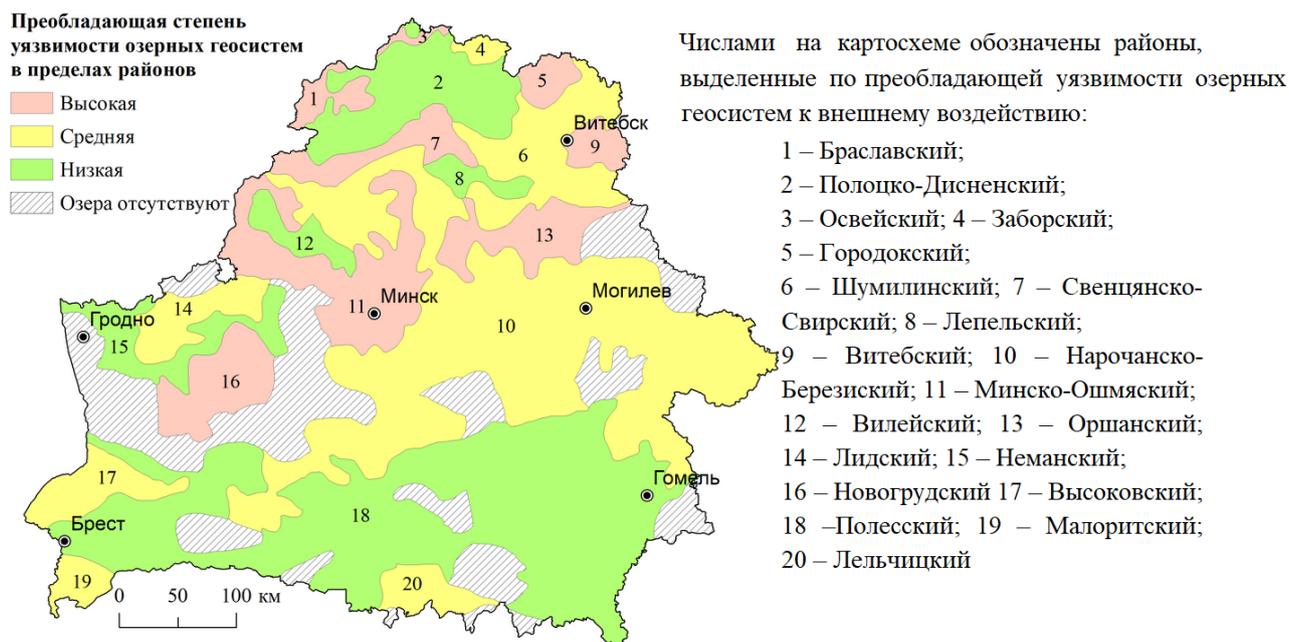


**Рисунок 3. – Алгоритм типизации озерных геосистем Беларуси по степени уязвимости к внешнему воздействию**

Таблица. – Типизация озерных геосистем Беларуси по степени уязвимости к внешнему воздействию

Тип озерных геосистем	Подтип озерных геосистем	Индексы уязвимости	Доля геосистем от числа геосистем в пределах типа, %	Примеры озер
1. Озерные геосистемы с высокой степенью уязвимости	1.1 Озерные геосистемы с небольшими по площади слабопроточными стратифицированными озерами с возвышенными и равнинными водосборами	0,549–0,856	53,8	Болдук, Глубля, Долгое
	1.2 Озерные геосистемы с небольшими по площади слабопроточными слабостратифицированными озерами с низинными водосборами	0,555–0,643	46,2	Бредно, Чербомысло
2. Озерные геосистемы со средней степенью уязвимости	2.1 Озерные геосистемы с большими и средними по площади слабопроточными стратифицированными озерами с возвышенными и равнинными водосборами	0,454–0,543	14,0	Струсто, Ричи, Женно
	2.2 Озерные геосистемы с небольшими по площади средне- и слабопроточными стратифицированными озерами с равнинными и низинными водосборами	0,444–0,542	49,1	Иодово, Кромань
	2.3 Озерные геосистемы с небольшими по площади среднепроточными нестратифицированными озерами с равнинными и низинными водосборами	0,444–0,541	36,9	Плавно, Вечера, Добеевское
3. Озерные геосистемы с низкой степенью уязвимости	3.1 Озерные геосистемы с небольшими по площади сильнопроточными, слабо- и нестратифицированными озерами с равнинными и низинными водосборами	0,310–0,440	47,0	Недрово, Синьша, Мнюта
	3.2 Озерные геосистемы с различными по площади среднепроточными нестратифицированными озерами с низинными водосборами	0,321–0,432	28,8	Паульское, Шо, Червоное
	3.3 Озерные геосистемы с большими по площади слабопроточными слабостратифицированными озерами с равнинными водосборами	0,223–0,441	10,7	Дривяты, Снуды, Нарочь

Поскольку рельеф является основой ландшафта и определяет величину удельного водосбора, его расчлененность, структуру, морфологию и морфометрию котловины, характер стока и поступления растворенных веществ в озеро, именно он в итоге служит ключевым фактором, влияющим на естественную уязвимость озерной геосистемы к внешнему воздействию. На основе данных пространственного анализа распределения озерных геосистем с различной степенью уязвимости была создана схема районирования территории Беларуси, показанная на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Районирование территории Беларуси по степени уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию**

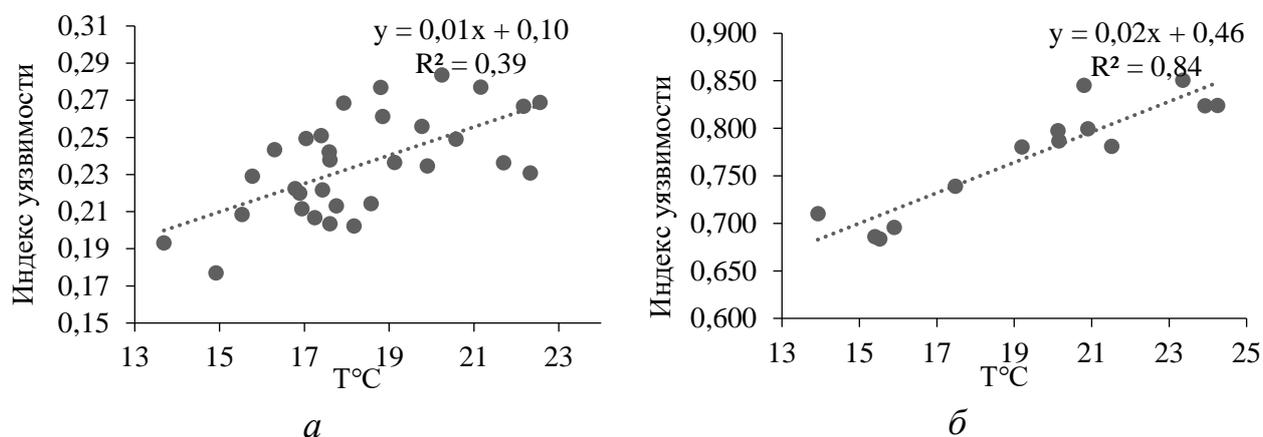
В основе районирования Беларуси по уязвимости озерных геосистем лежит геоморфологическое районирование (А.В. Матвеев, Б.Н. Гурский, Р.И. Левицкая, 1988 г.). В результате было выделено 20 районов. Отдельно обособлены территории, на которых озера отсутствуют.

В многолетней динамике интегральных индексов уязвимости к внешнему воздействию существуют различия между стратифицированными и нестратифицированными озерами. В геосистемах стратифицированных озер, уязвимость которых в наибольшей мере определяется внешними факторами, ее величина зависит от температуры воздуха на водосборе и за многолетний период увеличивается, в нестратифицированных водоемах – внутриводоемными процессами и не имеет четко выраженных трендов.

В главе 4 «Влияние климатических условий на динамику уязвимости озерных геосистем» описаны направления влияния климатических условий как природного фактора, определяющего уязвимость озерных геосистем Беларуси, а также дан прогноз изменения озерных геосистем Беларуси до 2050 г. под влиянием

климата и разработаны рекомендации по минимизации негативных последствий изменения температур воздуха и режима увлажнения.

Так как некоторые исходные параметры, используемые для расчета интегральных индексов уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию, зависят от метеорологических и климатических условий, сами индексы также находятся в достаточно тесной связи с температурами воздуха и количеством осадков. На рисунке 5 (а) показан график зависимости интегрального индекса уязвимости озера Нарочь к внешнему воздействию на 1 августа от средней температуры воздуха 25–31 июля за период 1986–2018 гг. В данном случае коэффициент корреляции равен 0,62.



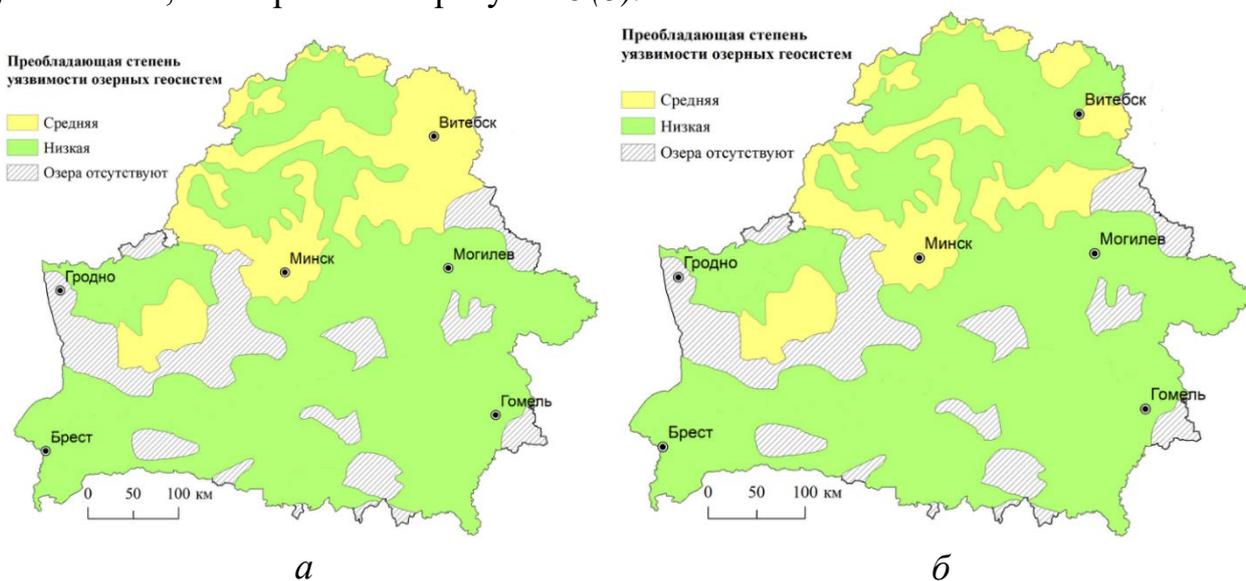
**Рисунок 5. – Зависимость интегрального индекса уязвимости озера Нарочь (а) и Волосо Южный (б) к внешнему воздействию от средней температуры воздуха за 7 и 5 суток, предшествующих датам измерения критериев уязвимости, соответственно**

Более тесной (коэффициент корреляции равен 0,80) является зависимость индекса уязвимости от термической устойчивости водной массы.

Для геосистемы глубокого озера Волосо Южный (период осреднения температуры воздуха – 5 суток) полученные зависимости выражены еще сильнее, о чем свидетельствует рисунок 5 (б). Выявленные зависимости уязвимости озерных геосистем от внешних факторов позволяют прогнозировать ее изменение на протяжении ближайших десятилетий. В мелководных озерах, примером которых является Выгонощанское, в формировании уязвимости главенствующая роль отведена внутренним процессам. Поэтому в них колебания уязвимости связаны с температурой воздуха опосредованно через уменьшение объема воды при испарении.

На основе полученных закономерностей был составлен прогноз изменения уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию до 2050 г. для трех сценариев изменения климата, соответствующих сценариям эмиссии парниковых газов: RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. При сценарии RCP2.6 возрастет количество высокоуязвимых озерных геосистем, но пространственные закономерности изменения их уязвимости не изменятся по сравнению с современными, отраженными на рисунке 4.

При сценарии RCP4.5 из-за снижения уязвимости озерных геосистем останется лишь два вида районов, как показано на рисунке 6 (а), при сценарии RCP8.5 произойдет расширение территорий с озерными геосистемами низкой степени уязвимости, что отражено на рисунке 6 (б).



**Рисунок 6. – Изменение уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию согласно сценарию RCP4.5 (а) и RCP8.5 (б)**

По сценарию эмиссии парниковых газов RCP4.5 в районах, где в данный момент преобладают озерные геосистемы высокой степени уязвимости, будут превалировать геосистемы со средней уязвимостью к внешнему воздействию. На равнинах и низинах Предполесья и Полесья будут распространены озерные геосистемы с низкой уязвимостью. При самых значительных климатических изменениях (RCP8.5) озерные геосистемы равнин и низин перейдут в тип слабоуязвимых, на возвышенностях будут превалировать озера со средней степенью уязвимости, а ряд мелководных озер Предполесья и Полесья в своем развитии достигнет стадии низинных болот.

Таким образом, основным направлением влияния потепления климата на озера будет снижение их уязвимости к внешнему воздействию, которое особенно сильно отразится на озерных геосистемах с высокой степенью уязвимости.

Разработанные рекомендации, направленные на смягчение последствий климатических изменений для разнотипных озерных геосистем, позволят снизить амплитуду колебаний интегрального индекса уязвимости к внешнему воздействию. Для сохранения уязвимых озерных геосистем при всех сценариях климатических изменений следует ограничить хозяйственную деятельность и создать ООПТ (при их отсутствии). Предотвращение деградации стратифицированных озер со средней степенью уязвимости также возможно путем проведения охранных мероприятий и ликвидации локальных источников биогенных элементов. Проточные озера, а также озера с большим объемом воды и низкой степенью уязвимости к внешнему

воздействию, способны достаточно эффективно противостоять изменению природной среды и поддерживать стабильный гидрохимический режим при соблюдении субъектами хозяйствования водоохранного законодательства. Перспективным способом сохранения мелководных озер со средней и низкой степенью уязвимости при наиболее вероятном, а также жестком сценариях изменения климата представляется создание на их основе озерных водохранилищ и восстановление гидрологического режима, нарушенного в ходе проведения осушительной мелиорации на водосборах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработанная методика интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию, основанная на методе рандомизированных сводных показателей, позволила сопоставить уязвимость разнотипных озерных геосистем к внешнему воздействию. Интегральная оценка уязвимости проводилась с использованием 14 морфометрических, гидродинамических и гидрохимических показателей, в достаточно полной мере отражающих целостность озерной геосистемы [2, 7].

2. Двухступенчатая типизация озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию на основе интегральных индексов уязвимости позволила выделить три типа озерных геосистем, которые с учетом площади акватории, периода водообмена, особенностей термической стратификации и положения геосистемы в рельефе подразделяются на 8 подтипов:

– *Озерные геосистемы с высокой степенью уязвимости.* Их доля от общего количества изученных геосистем составляет 17,5 %. Тип делится на два подтипа.

– *Озерные геосистемы со средней степенью уязвимости* подразделяются на три подтипа и в структуре выборки занимают 38,3 %.

– *Озерные геосистемы с низкой степенью уязвимости* характеризуются наиболее широким распространением среди объектов исследования (44,2 %). В этом типе также выделено три подтипа.

В типах 2 и 3 присутствуют нарушенные озера, испытывающие антропогенную нагрузку, индексы уязвимости которых минимум на 0,100 ниже их фоновых значений, характерных для озер с аналогичной морфометрией и гидродинамическими показателями, развивающихся в естественных условиях [2, 17, 18, 27].

3. Результатом анализа пространственных закономерностей изменения уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию стала схема районирования территории Беларуси по этому показателю, включающая 20 районов. Они выделены по преобладающему типу уязвимости озерных

геосистем в пределах физико-географических районов, т.к. именно рельеф и тесно связанная с ним морфология котловины определяют скорость внешнего водообмена и особенности поступления и распределения растворенных веществ в водной массе. Наиболее высокая уязвимость характерна для озерных геосистем, расположенных в пределах краевых ледниковых возвышенностей (средний индекс уязвимости равен 0,557) и камовых массивов. По мере снижения гипсометрического уровня снижается уязвимость озерных геосистем, достигая минимальных значений в пределах низин Полесья (0,433) [1, 2, 3, 4, 7, 8, 14, 27, 28].

4. Прогнозные сценарии изменения термического, гидродинамического, гидрохимического режима озер, а также их уязвимости к внешнему воздействию при различных сценариях выбросов парниковых газов в атмосферу и связанного с ними изменения температуры воздуха и количества осадков показали, что при изменении климатических условий по сценарию RCP2.6 к середине XXI в. температура воды в озерах вырастет на 2 °С, что повлечет за собой повышение уязвимости озерных геосистем к внешнему воздействию за счет усиления температурной стратификации при неизменном химическом составе воды. Отдельные озерные геосистемы со средней степенью уязвимости (Бобрица, Ричи) перейдут в тип высоко уязвимых, положение других в типизации останется неизменным. Согласно наиболее вероятному сценарию RCP4.5 температура воды в озерах вырастет на 2,3–2,8 °С. При этом произойдет снижение уязвимости геосистем стратифицированных озер к внешнему воздействию. Озерные геосистемы с высокой степенью уязвимости к внешнему воздействию сохранятся лишь на возвышенностях. Сценарий RCP8.5 предполагает повышение температуры воды на 4–4,5 °С. Димиктические озера юго-запада Беларуси станут теплыми мономиктическими, что повлечет за собой перестройку их геосистем со снижением интегральных индексов уязвимости к внешнему воздействию. Полесские мелководные озера, вероятнее всего, испытают сильное сокращение площади или достигнут стадии низинных болот [5, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26].

5. Рекомендации, направленные на смягчение последствий климатических изменений, позволят снизить скорость деградации озерных геосистем с различной степенью уязвимости. Для озерных геосистем с высокой степенью уязвимости при всех сценариях климатических изменений рекомендовано ограничение всех видов хозяйственной деятельности с созданием (при их отсутствии) ООПТ. Стратифицированные озера со средней степенью уязвимости также нуждаются в проведении охранных мероприятий. Озерные геосистемы с низкой степенью уязвимости к внешнему воздействию способны сохранять свои черты при соблюдении водопользователями режима водоохранной зоны. Для геосистем мелководных озер со средней и низкой степенью уязвимости при

наиболее вероятном, а также жестком сценариях изменения климата актуальным представляется создание на их основе озерных водохранилищ [6, 15, 16, 25].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Рассчитанные индексы уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию служат основой при разработке рекомендаций по рациональному использованию водных, биологических, минеральных, рекреационных ресурсов, охране озер Беларуси, выделении озер и водосборов, перспективных для хозяйственного использования, а также рекомендуемых для исключения из использования с целью сохранения уникальных озерных геосистем.

2. Методика интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию и их типизация по этому показателю являются научно обоснованными, прошли апробацию и могут служить основой для проведения аналогичного исследования в других регионах со схожими климатическими условиями. Результаты исследования рекомендуются к внедрению в учреждения Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

3. Результаты интегральной оценки уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию применяются в работе ГПУ «Национальный парк „Нарочанский”», а также в образовательном процессе кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ при чтении учебных дисциплин «Общая лимнология», «Гидрология», «Гидроэкология», «Гидрологическое прогнозирование», «Управление водными экосистемами» (акты внедрения БГУ № 2.4/58 и 2.4/59 от 04.03.2020 г.; № 2.4/70 от 10.03.2020 г.).

4. Рекомендации по предотвращению негативного воздействия климатических изменений на озерные геосистемы, формированию оптимальной структуры природопользования на водосборах изучаемых водных объектов, в том числе при создании ООПТ и восстановлению геосистем, нарушенных в результате несоблюдения водоохраных мероприятий, используются в природоохранной деятельности (акт о внедрении в ГПУ «Национальный парк „Нарочанский”» от 17.03.2020 г. и ГПУ «Национальный парк „Браславские озера”» от 14.01.2021).

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Беларуси*

1. Суховило, Н. Ю. Динамические критерии оценки устойчивости озерных экосистем Белорусского Поозерья к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило,

Б. П. Власов, А. А. Новик // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2018. – № 2. – С. 13–24.

2. Суховило, Н. Ю. Пространственные закономерности устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило, А. А. Новик // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 51–65.

3. Суховило, Н. Ю. Влияние климатических условий на уязвимость озер Беларуси к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило // Географія. – 2021. – № 5. – С. 13–23.

*Статьи в зарубежных научных изданиях*

4. Систематизация палеогеографической информации на примере создания базы данных исследований южной периферии Валдайского оледенения / Ю. А. Кублицкий, Л. С. Сырых, И. М. Греков, Д. А. Субетто, П. А. Леонтьев, Н. В. Соколова, В. В. Брылкин, А. В. Орлов, И. В. Панов, А. А. Новик, Б. П. Власов, Н. Ю. Суховило, В. П. Зерницкая, Т. В. Напреенко-Дорохова, Д. Д. Кузнецов // Общество. Среда. Развитие. – 2018. – № 4. – С. 125–132.

5. Суховило, Н. Ю. Влияние метеорологических и климатических условий на термодинамические процессы в разнотипных озерах Беларуси / Н. Ю. Суховило // Acta Geographica Silesiana. – 2019. – № 13/3 (35). – С. 47–60.

6. Оценка современного состояния и динамики зарастания озер Национального парка «Нарочанский» с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Б. П. Власов, Н. Д. Грищенкова, А. Ю. Сивенков, Н. Ю. Суховило, Д. А. Колбун // Acta Geographica Silesiana. – 2019. – № 13/4 (36). – С. 39–55.

7. Sukhovilo, N. The forecast of vulnerability of Belarusian lakes to external impact under the climate change / N. Sukhovilo // Śląskie Prace Geograficzne. – 2019. – № 16. – P. 149–166.

8. Морфометрические параметры меловых карьерных озер Беларуси как ключевой фактор устойчивого функционирования в условиях рекреационного использования / А. И. Романчук, С. А. Хомич, А. О. Данильченко, Н. Ю. Суховило, Т. А. Макаревич // Acta Geographica Silesiana. – 2020. – № 14/1 (37). – С. 29–46.

*Статьи в сборниках научных статей*

9. Суховило, Н. Ю. Устойчивость озер национальных парков «Нарочанский» и «Браславские озера» к внешнему воздействию в условиях климатических изменений / Н. Ю. Суховило // Актуальные проблемы охраны геологического наследия в Беларуси : сб. ст. – Минск, Право и экономика, 2020. – С. 62–72.

*Материалы конференций*

10. Суховило, Н. Ю. Воздействие теплового загрязнения на теплозапасы и тепловой бюджет озера Лукомское / Н. Ю. Суховило // Географы в годы войны и мира: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 70-летию победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. и 170-летию Русского географического общества в рамках XI Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 8–12 апр. 2015 г. / Санкт-Петербургский гос. ун-т; редкол. : В. В. Дмитриев [и др.] – М., Перо, 2015. – С. 1095–1098.

11. Суховило, Н. Ю. Пространственно-временная динамика характеристик теплового режима водоемов замедленного водообмена Беларуси / Н. Ю. Суховило // Географические исследования Евразии: история и современность : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 160-летию экспедиции П. П. Семенова на Тянь-Шань в рамках XII Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 8–10 апр. 2016 г. / Санкт-Петербургский гос. ун-т; редкол. : С. С. Лачининский [и др.] – М., Перо, 2016. – С. 191–195.

12. Суховило, Н. Ю. Формирование термической структуры озер Беларуси / Н. Ю. Суховило // Теория и практика современных географических исследований: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной 220-летию выдающегося русского мореплавателя, географа, вице-председателя Русского географического общества Ф. П. Литке в рамках XIII Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 7–9 апр. 2017 г. / Санкт-Петербургский гос. ун-т; редкол. : А. А. Краснов [и др.]. – СПб.: Свое издательство, 2017. – С. 233–239.

13. Суховило, Н. Ю. Роль метеорологических факторов в перемешивании озер Беларуси / Н. Ю. Суховило // Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси: сб. науч. ст., Гомель, 10 нояб. 2017 г. [Электронный ресурс]: в 2 ч.; редкол. : А. И. Павловский [и др.]; М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Электрон. текст. дан. (10,6 Мб). – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – Ч. 2. – С. 198–203.

14. Суховило, Н. Ю. Тепловой режим озер Беларуси как индикатор изменения климатических условий / Н. Ю. Суховило // Природные источники парниковых газов и их воздействие на региональное изменение климата : материалы семинара, Минск, 22–23 янв. 2018 г. / Минский городской институт развития образования. – Минск: Право и экономика, 2018. – С. 9–17.

15. Суховило, Н. Ю. Метеорологические условия территории Белорусского Поозерья как фактор устойчивости озер к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило // Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии : материалы

международ. науч. конф., Санкт-Петербург, 28–30 мар. 2018 г. / редкол. О. М. Макарьева [и др.]. – СПб, Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. – С. 655–659.

16. Суховило, Н. Ю. Влияние водообмена на устойчивость озер Белорусского Поозерья к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило // География в современном мире: вековой прогресс и новые приоритеты : материалы международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, проведенной в рамках XIV Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 6–8 апр. 2018 г. / Санкт-Петербургский гос. ун-т; редкол. : А.И. Краснов [и др.]. – СПб: Свое Издательство, 2018. – С. 76–81.

17. Мониторинг высшей водной растительности озер НП "Нарочанский" с использованием данных ДЗЗ (на примере Мядельской группы озер) / Б. П. Власов, Н. Д. Грищенко, Н. Ю. Суховило, Д. Б. Власова // Современные технологии в деятельности ООПТ: ГИС, ДЗЗ (ГИС-Нарочь-2018) : сб. VI международ. науч.-практ. семинара к п. Нарочь, 14–18 мая 2018 г. – Минск, 2018 – С. 17–21.

18. Суховило, Н. Ю. Динамика высшей водной растительности озер национального парка «Браславские озера» / Н. Ю. Суховило, Е. К. Трыханкина, Д. Б. Власова // Теория и практика современных географических исследований : материалы международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. 180-летию российского путешественника и натуралиста, исследователя Центральной Азии Н.М. Пржевальского в рамках XV Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 5–7 апр. 2019 г. / редкол. : А. И. Краснов [и др.]. – М. : Изд-во «Каллиграф», 2019. – С. 186–191.

19. Суховило, Н. Ю. Классификация озер Беларуси по степени устойчивости к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило, Б. П. Власов, А. А. Новик // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: материалы международ. науч. конф., Казань, 19–24 мая 2019 г. / редкол. : Р. Р. Шагидуллин [и др.]. – Казань, 2019. – С 185–189.

20. Суховило, Н. Ю. Оценка устойчивости озер национального парка «Нарочанский» к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ) : материалы международ. науч. конф., к.п. Нарочь, 9–11 окт. 2019 г. Минск, 2019. – С. 151–155.

#### *Тезисы докладов*

21. Суховило, Н. Ю. Теплозапасы и тепловой бюджет озер Белорусского Поозерья в период потепления климата / Н. Ю. Суховило // Разведка и добыча горючих ископаемых, геология, география, биология и экология : тез. докл. VI межвузовской конференции по итогам практик / Моск. гос. ун-т

им. М.В. Ломоносова, Москва, 15 нояб. 2014 г. / редкол. : И. Д. Агапитов [и др.]. – М., Перо, 2014. – С. 170–171.

22. Суховило, Н. Ю. Оценка влияния природных и антропогенных факторов на теплозапас и тепловой бюджет озер Белорусского Поозерья / Суховило Н. Ю., Новик А. А. // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: тез. докл. V Междунар. науч. конф., Минск, 5–8 мая 2015 г. / редкол. : П. С. Лопух (отв. ред.) [и др.]. – Минск, БГУ, 2015. – С. 96–98.

23. Суховило, Н. Ю. Некоторые особенности теплового режима водоемов замедленного водообмена Беларуси / Н. Ю. Суховило // Разведка и добыча горючих ископаемых, геология, география, экология и природопользование, учебные практики : тез. докл. VII Молодежного конгресса по итогам практик, Москва, 13–14 нояб. 2015 г. / редкол. : О. В. Крылов [и др.]. – М., 2015. – С. 126–127.

24. Суховило, Н. Ю. Тепловой режим озер Белорусского Поозерья как фактор их экологического состояния / Н. Ю. Суховило // Новые идеи в науках о Земле: тез. докл. XIII междунар. науч.-практ. конф. : тез. докл., Москва, 5–7 апр., 2017 г.: в 2 т. / Росс. гос. геологоразв. ун-т: редкол. : В. И. Лисов [и др.]. – М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. – Т. 2. – С. 99–100.

25. Суховило, Н. Ю. Тепловой режим озер Беларуси как индикатор изменения климатических условий / Н. Ю. Суховило // Роль озер Беларуси в поступлении парниковых газов в региональном климатическом контексте: тез. докл. семинаров по проекту ЮНЕСКО №8290115042 ВУЕ, Минск, 22–23 янв. 2018 г. – Минск: Право и экономика, 2018. – С. 38–40.

26. Суховило, Н. Ю. Изменение экологического состояния озер национального парка «Браславские озера» / Н. Ю. Суховило, Д. Б. Власова // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии (к 110-летию со дня рождения профессора В. А. Дементьева): тез. докл., Минск, 13–16 нояб. 2018 г. / редкол. : А. Н. Витченко [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 152–153.

27. Sukhovilo, N. Resistance of lakes of Belarus to eutrophication in the conditions of variable climate / N. Sukhovilo // Actual Environmental Problems: Proceedings of the IX International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students., Minsk, ISEI BSU, Nov., 21–22 / ed. : S. A. Maskevich [et al.]. – Minsk, 2019. – P. 225–226.

28. Суховило, Н. Ю. Геоморфологический фактор устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило // Современные проблемы естествознания в науке и образовательном процессе: сб. статей Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Минск, 19 нояб. 2019 г. / редкол. : А. В. Деревинский [и др.]. – Минск, БГПУ, 2019. – С. 32–33.

Суховило Нина Юрьевна

### **Оценка уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию**

*Ключевые слова:* озерная геосистема, климат, тепловой режим, водообмен, уязвимость к внешнему воздействию, сценарий изменения климата.

*Объект исследования:* озерные геосистемы Беларуси.

*Цель работы:* анализ уязвимости озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию и ее прогнозирование в условиях изменяющегося климата.

*Методы исследования:* экспедиционный, анализа, синтеза, сравнительно-географический, картографический, математической статистики (регрессионный, корреляционный, факторный и кластерный анализ, метод рандомизированных сводных показателей), компьютерного моделирования, прогностический.

*Полученные результаты и их новизна:* для озерных геосистем Беларуси разработана методика интегральной оценки их уязвимости к внешнему воздействию, рассчитаны интегральные индексы уязвимости 149 разнотипных озерных геосистем, находящихся на различных стадиях естественной эволюции, а также подвергшихся антропогенному воздействию; впервые созданы типизация озер и схема районирования территории Беларуси по уязвимости к внешнему воздействию; выявлены основные направления влияния климатических условий на уязвимость озерных геосистем Беларуси к внешнему воздействию и дан прогноз ее изменения до 2050 г. при сценариях изменения климата RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5; разработаны рекомендации по минимизации негативного влияния изменения климата на разнотипные озерные геосистемы.

*Рекомендации по использованию:* полученные результаты могут быть использованы при проведении аналогичных исследований в других регионах, при восстановлении нарушенных геосистем, планировании оптимальной структуры использования природных ресурсов озер и их водосборов, в учебном процессе в области гидрологии, гидрологического прогнозирования и лимнологии.

*Степень использования:* результаты исследования используются в НП «Нарочанский», «Браславские озера» и Белорусском государственном университете.

*Область применения:* природоохранная деятельность, планирование хозяйственной деятельности, образовательный процесс.

Сухавіла Ніна Юр'еўна

### **Ацэнка ўразлівасці азёрных геасістэм Беларусі да знешняга ўздзеяння**

*Ключавыя словы:* азёрная геасістэма, клімат, цеплавы рэжым, водаабмен, ўразлівасць да знешняга ўздзеяння, сцэнарый змянення клімату.

*Аб'ект даследавання:* азёрныя геасістэмы Беларусі

*Мэта работы:* аналіз уразлівасці азёрных геасістэм Беларусі да знешняга ўздзеяння і яе прагназаванне ва ўмовах змянення клімату.

*Метады даследавання:* экспедыцыйны, аналізу, сінтэзу, параўнальна-геаграфічны, картаграфічны, матэматычнай статыстыкі (рэгрэсійны, карэляцыйны, фактарны і кластарны аналіз, метады рандамізаваных зводных паказчыкаў), камп'ютарнага мадэлявання, прагнастычны.

*Атрыманыя вынікі і іх навізна:* для азёрных геасістэм Беларусі распрацавана метадыка інтэгральнай ацэнкі іх уразлівасці да знешняга ўздзеяння, разлічаны інтэгральныя індэксы ўразлівасці 149 азёрных геасістэм розных тыпаў, што знаходзяцца на розных стадыях натуральнай эвалюцыі, або падвергліся антрапагеннаму ўздзеянню; упершыню створаны тыпізацыя азёрных геасістэм і схема раянавання тэрыторыі Беларусі па ўразлівасці да знешняга ўздзеяння; выяўлены асноўныя напрамкі ўплыву кліматычных умоў на ўразлівасць азёрных геасістэм Беларусі да знешняга ўздзеяння і дадзены прагноз яе дынамікі да 2050 г. пры сцэнарыях змянення клімату RCP2.6, RCP4.5 і RCP8.5; распрацаваны рэкамендацыі па мінімізацыі негатыўнага ўплыву змены клімату на азёрныя геасістэмы розных тыпаў.

*Рэкамендацыі па выкарыстанні:* атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры правядзенні аналагічных даследаванняў у іншых рэгіёнах, пры аднаўленні парушаных геасістэм, планаванні аптымальнай структуры выкарыстання прыродных рэсурсаў азёр і іх вадазбораў, у навучальным працэсе ў галіне гідралогіі, гідралагічнага прагназавання і лімналогіі.

*Ступень выкарыстання:* вынікі даследавання выкарыстоўваюцца ў Нацыянальных парках «Нарачанскі», «Браслаўскія азёры» і Беларускай дзяржаўным універсітэце.

*Галіна прымянення:* прыродаахоўная дзейнасць, планаванне гаспадарчай дзейнасці, адукацыйны працэс.

**SUMMARY**

Sukhovilo Nina Yurievna

**Assessment of vulnerability of Belarusian lake geosystems to external impact**

*Keywords:* lake geosystem, climate, thermal regime, water exchange, vulnerability to external impact, climate change scenario.

*Object of study:* lake geosystems of Belarus.

*Purpose of the research:* analysis of the vulnerability of Belarusian lake geosystems to external impacts and its prediction in conditions of climate change.

*Research methods:* expeditionary, analysis, synthesis, comparative geographic, cartographic, mathematical statistics (regression, correlation, factorial and cluster analysis, the method of randomized aggregate method), computer simulation, prognostic.

*The results obtained and their novelty:* a methodology of integrated assessment of Belarusian lake geosystems' vulnerability to external impacts has been developed, integrated vulnerability indices for 149 lake geosystems of different types, located at various stages of natural evolution, as well as subjected to anthropogenic eutrophication, have been calculated; the classification of lake geosystems and the regionalization scheme for the territory of Belarus by vulnerability to external impact were created; the main directions of the influence of climatic conditions on the vulnerability of lake geosystems in Belarus to external influences are identified and a forecast of its change up to 2050 is given under the climate change scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5; recommendations for minimization the negative impact of climate change on heterogeneous lake geosystems were developed.

*Recommendations for use:* the results can be used in similar studies in other regions, in lakes' restoration, in planning the optimal structure for the use of lakes' resources and their watersheds, in the educational process in the field of hydrology, hydrological forecasting and limnology.

*Degree of use:* the results of the study are used in Narochansky and Braslav Lakes National Parks and Belarusian State University.

*Application area:* nature protection, business planning, educational process.



Подписано в печать 28.04.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 75 экз. Заказ 151.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика  
в республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.  
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.