

13. Чистобаев, А. И. Территориальное планирование на уровне субъектов России: монография / А. И. Чистобаев, О. В. Красовская, С. В. Скатерщиков. – СПб. : Инкери, 2010. – 296 с.
14. Помелов, А. С. Структурирование земельных ресурсов и регулирование землепользования в Беларуси / А. С. Помелов. – Минск : РУП «БелНИЦзем», 2013. – 528 с.
15. Принципы классификации агроландшафтов и методика определения оптимального соотношения сельскохозяйственных угодий, обеспечивающих экологическую безопасность производства продукции / Г. Н. Черкасов [и др.]. – Курск : ВНИИЗиЗПЭ. 2005. – 69 с.

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

УЯЗВИМОСТЬ АЦИДОТРОФНЫХ ОЗЕР БЕЛАРУСИ К ВНЕШНЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Н. Ю. Суховило, Д. Б. Власова, А. И. Мороз

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
SukhoviloNY@bsu.by

Аннотация

В статье представлены результаты оценки уязвимости 7 кислототрофных озер Беларуси к внешнему воздействию с помощью метода рандомизированных сводных показателей. Все они являются местами произрастания охраняемых видов растений (*Isoetes Lacustris L.* и *Lobelia dortmanna L.*), поэтому их исследование необходимо для сохранения уникальных экосистем в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки. Результаты оценки уязвимости свидетельствуют о том, что наиболее уязвимым является оз. Белое в Лунинецком районе, наименее уязвимым – оз. Свитязь.

Ключевые слова: кислототрофное озеро, водосбор, уязвимость озера к внешнему воздействию, экологическое состояние.

VULNERABILITY OF ACIDOTROPHIC BELARUSIAN LAKES TO EXTERNAL IMPACT

N. Yu. Sukhovilo, D. B. Vlasova, A. I. Moroz

Abstract. We assessed the vulnerability of 7 acidotrophic lakes to external impact using the randomized aggregate method. These lakes are places of growth of protected plant species (*Isoetes Lacustris L.* and *Lobelia dortmanna L.*). Therefore, their investigation is necessary to preserve unique ecosystems in conditions of climate change and anthropogenic pressure. The results of assessment of vulnerability shows that the most vulnerable is Lake Beloe (Luninets district), the most stable is Lake Svityaz.

Keywords: acidotrophic lake, lake catchment, lake vulnerability to external impact, ecological state.

Введение. О существовании озер с кислой реакцией среды известно давно. Впервые термин «кислототрофные озера» введен А. Тинеманом в 1928 г. Под

этим термином подразумевались низкопродуктивные озера со значениями рН ниже 5,5. С. Йошимура (1933 г.) разделил кислототрофные озера на 2 типа: в первом кислая реакция среды обусловлена особенностями подстилающих пород, во втором – биологическими процессами. К данной типизации позднее добавили тип озер, закисление которых обусловлено выпадением кислотных дождей, то есть, имеет антропогенные причины [3].

В последние годы исследование кислототрофных озер проводится, в основном, гидробиологами, и направлено на выявление особенностей отдельных сообществ и их адаптации к кислой реакции среды обитания. Одним из наиболее хорошо исследованных кислототрофных озер является озеро Крейтер (штат Орегон, США), имеющее вулканическое происхождение [2].

В СССР первые исследования таких водоемов связаны и деятельностью С. Н. Скадовского, Г. Г. Винберга и др. В качестве характерных черт закисленных водоемов указывались низкое содержание кальция, полное или почти полное отсутствие гидрокарбонатов и сульфатный класс вод. В дальнейшем особенности структуры и функционирования биоты болотных гумифицированных водоемов, в том числе и кислотных, изучались главным образом на озерах Карелии и Ленинградской области, т.к. там они получили наиболее широкое распространение [11, 12].

В 1994 г. издан сборник трудов Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина «Структура и функционирование экосистем кислотных озер». В нем описаны особенности экосистем озер с кислой реакцией среды Дарвинского заповедника, расположенного в Вологодской области, где закисление имело как естественные, так и антропогенные причины [13] с преобладанием первых, т.к. авторами чаще рассматривались озера, расположенные в пределах верховых болот, что несколько отличает их от объектов данного исследования.

В Беларуси кислототрофные водоемы, расположенные вне крупных верховых болот, обнаружены в 1970-х гг. в ходе паспортизации озер. Практически все они имеют на своем водосборе небольшой болотный массив, который служит источником гуминовых кислот. В классификации О. Ф. Якушко они занимают место в I типе (мезотрофные с признаками олиготрофии, глубокие, небольшие) [15]. Однако такое положение не совсем обоснованно, т.к. несмотря на схожесть некоторых классификационных признаков, их максимальные глубины редко превышают 10 м. В настоящее время в Беларуси отдельные кислототрофные озера изучаются в контексте выявления закономерностей распространения охраняемых видов аквафлоры: в основном – полушника озерного и лобелии Дортманна [5].

На некоторых кислототрофных озерах в настоящее время существуют пункты мониторинга высшей водной растительности Национальной системы мониторинга окружающей среды. Кроме самой водной растительности, производится отбор проб воды и донных отложений с последующим анализом их химического состава. Исследования в рамках НСМОС проводятся раз в 5-10 лет, но в основном охватывают ключевые участки и носят частный характер [10].

Из-за слабого водообмена, низкой концентрации растворенных в водной массе веществ кислототрофные озера сильно уязвимы к изменению окружающей

среды, обусловленному как климатическими сдвигами, так и антропогенной нагрузкой. Это может привести к исчезновению охраняемых видов водной флоры и фауны. Поэтому необходимо детальное изучение среды произрастания охраняемых видов растений с целью своевременного выявления изменений в химическом составе воды, гидрологическом, газовом и температурном режиме.

Объектами данного исследования являются 7 кислототрофных озер. Они различаются по морфометрии, генезису котловин, химическому составу воды и др. Географическое положение объектов исследования отражено на рисунке 1.

Цель исследования заключалась в оценке уязвимости кислототрофных озер к внешнему воздействию.

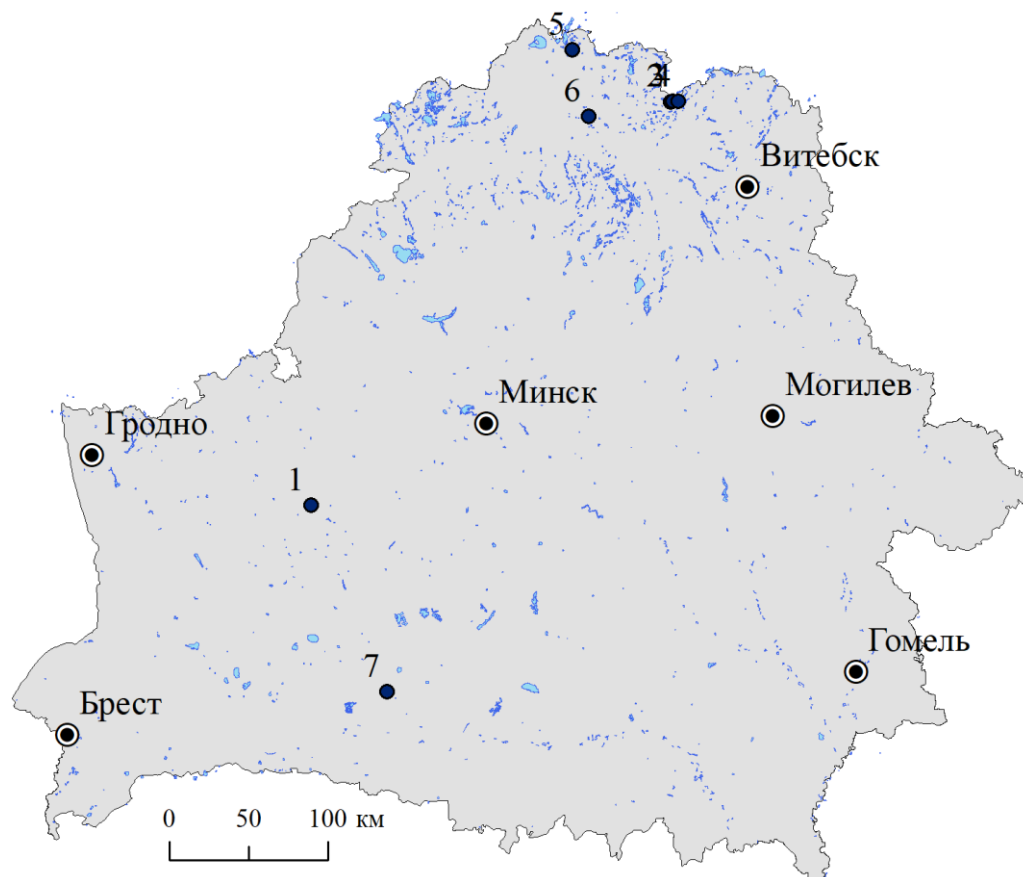


Рисунок 1 – Географическое положение объектов исследования

Числами на рисунке обозначены озера: 1 – Свитязь, 2 – Глубокое, 3 – Чербомысло, 4 – Большое Островито, 5 – Бредно, 6 – Белое (Полоцкий район), 7 – Белое (Лунинецкий район)

Большинство исследуемых озер приурочено к Полоцкой озерно-ледниковой низине и имеет остаточное происхождение. Озеро Свитязь расположено на Новогрудской возвышенности, озеро Белое (Лунинецкий район) – на Логишинской равнине. Котловины обоих озер имеют карстовое происхождение.

Материалы и методы. Исходными данными для проведения исследований послужили фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озераведения БГУ за период с 1971 по 2018 гг., включающие морфометрические, гидрохимические параметры, характеристики водосборов и водообмена [6, 8, 10]. Основные морфометрические характеристики озер приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфометрические характеристики объектов исследования [6]

Озеро	Район	Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Белое	Лунинецкий	0,23	1,75	17	7,6	0,03	99,13	0,31	51,11
Белое	Полоцкий	1	8,42	19,6	8,4	0,12	8,4	1,8	21,05
Глубокое	Полоцкий	0,42	2,2	11,5	5,2	0,08	6,93	1,94	3,58
Большое Островито	Полоцкий	0,48	1,5	6	3,1	0,15	3,97	1,12	6
Чербомысло	Полоцкий	0,5	1,67	6,9	3,3	0,15	4,18	2,02	3,71
Свитязь	Новогрудский	2,24	7,76	15	3,4	0,52	5,8	9,04	0,55
Бредно	Верхнедвинский	0,21	0,54	4,7	1,9	0,15	20,36	0,3	6,9

Оценка уязвимости озер к внешнему воздействию осуществлялась в 6 этапов на основе метода рандомизированных сводных показателей. На первом этапе была отобрана обоснованная система критериев, при использовании которой возможно диагностирование уязвимости озера. При этом нужно стремиться к тому, чтобы каждый из параметров был необходим, а все параметры вместе были достаточны для описания качества (неаддитивного свойства) рассматриваемой системы. Все характеристики делятся на два типа. Увеличение значений характеристики первого типа приводит к повышению уязвимости озерной геосистемы (например, прозрачность), а рост значения характеристики второго типа приводит к снижению уязвимости (площадь, объем водной массы, содержание растворенных веществ).

Перечень показателей, использованных для интегральной оценки уязвимости озер Беларуси к внешнему воздействию, а также пределы их колебаний, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии интегральной оценки уязвимости озер Беларуси к внешнему воздействию и пределы их колебаний [14]

Параметры:	Единицы измерения	min	max
Площадь озера	км ²	0,027	79,6
Объем водной массы	млн м ³	0,14	710,4
Максимальная глубина	м	0,6	53,6
Удельная водообменность	–	0,02	51,1
Динамическая нагрузка	м ³ /м ²	0,1	48,8
Удельный водосбор	–	0,44	817,36
Термическая устойчивость в летний период	Дж/м ²	-0,2	1084,26
Прозрачность	м	0,3	9,5
Общая минерализация	мг/дм ³	5,3	407,2
Фосфаты	мгР/дм ³	0	3,57
Нитраты	мгN/дм ³	0,001	1,8
Аммоний-ион	мгN/дм ³	0,001	3,9
Бихроматная окисляемость	мгО ₂ /дм ³	5,75	129,3
pH	–	4,5	9,5

На втором этапе осуществлялась нормализация исходных характеристик. Условием, способствующим максимальной уязвимости, по каждому критерию соответствует значение равное 1, а минимальной – равное 0. Такое преобразование выполняется следующим образом:

Для критериев первого типа использовалось правило перевода в виде (1)

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

Для критериев второго типа использовалось правило перевода в виде (2)

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

где q – нормализованное значение параметра; x_i – текущее значение критерия; \max_i (\min_i) – максимальное (минимальное) встречающееся значение критерия; λ – параметр, определяющий конкретный вид функций (1) и (2): ($\lambda < 1$ – выпуклость вверх, $\lambda > 1$ – выпуклость вниз). В данном случае $\lambda = 1$, т.к. согласно исследованию Е.А. Примак, учет нелинейности лишь незначительно влияет на точность расчетов.

Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные параметры в различных шкалах измерения приводятся к единой безразмерной шкале, после чего над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя.

На третьем этапе был выбран вид интегрального показателя $Q(q, w)$. Показатель Q строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами w_i , сумма которых должна равняться 1,0 ($0 \leq w_i \leq 1$). В качестве выражения для интегрального показателя чаще всего используется линейная свертка показателей вида (3)

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1 \dots q_m; w_1 \dots w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i \quad (3)$$

представляющая собой взвешенное среднее арифметическое значений показателей q_i и определяемая вектором параметров $w = (w_1 \dots w_m)$, неотрицательными компонентами которого являются весовые коэффициенты, задающие значимость отдельных критериев для интегральной оценки уровня уязвимости. Введение правила нормализации весов ($w_1 + \dots + w_m = 1$) позволяет принять значение параметра w_i как относительную значимость показателя q_i [9].

На четвертом этапе были заданы весовые коэффициенты w_i , отраженные в таблице 3. В ходе данного исследования веса отдельных показателей определялись с помощью дополнительных расчетов. Нами был проведен факторный анализ по методу главных компонент.

В результате было выявлено, что в группе критериев оценки уязвимости озер к изменению параметров естественного режима наиболее «весомыми» яв-

ляются площадь и объем, а также сила термической стратификации, выраженная через термическую устойчивость.

Таблица 3 – Весовые коэффициенты отдельных показателей, использованные при оценке уязвимости озер Беларуси к внешнему воздействию

Критерии оценки уязвимости озер к изменению параметров естественного режима							
Показатель	Площадь	Объем	Максимальная глубина	Период водообмена	Динамическая нагрузка	Удельный водосбор	Термическая устойчивость в летний период
Вес	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Критерии оценки уязвимости озер к изменению параметров качества воды							
Показатель	Прозрачность	Общая минерализация	pH	PO_4^{3-}	NO_3^-	NH_4^+	Биохимическая окисляемость
Вес	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

На пятом этапе для левой и правой границ каждого класса по утвержденным правилам были рассчитаны значения интегрального показателя Q и построена оценочная шкала для него.

При этом в МРСП переход к $Q(q;I)=MQ(q;I)$ реализуется в виде (4):

$$\bar{Q}^{(i)}(I)=\bar{Q}(q^{(j)};I)=\bar{Q}(q^{(j)},\bar{w}(I))=\frac{1}{N(m,n,I)}\sum_{i=1}^{N(m,n,I)}[Q^{(t)}(q^{(j)})] \quad (4),$$

где N – количество возможных наборов критериев, n – критерий оценки уязвимости, m – число критериев, I – конкретный набор весовых коэффициентов.

На шестом этапе по имеющимся данным были определены значения интегрального показателя по правилам построения основной модели-классификации [9]. Сводному показателю критериев первой группы присвоен весовой коэффициент 0,7, второй – 0,3.

Границы значений индексов для трех типов озер по уязвимости к внешнему воздействию указаны в таблице 4.

Таблица 4 – Граничные значения интегрального индекса уязвимости озер Беларуси к внешнему воздействию для различных типов

Тип озер по уязвимости	Низкой степени уязвимости	Средней степени уязвимости	Высокой степени уязвимости
Значения интегрального индекса уязвимости	0,000 – 0,441	0,442 – 0,548	0,549 – 1,000

Результаты и обсуждение. Индексы уязвимости исследуемых озер изменяются от 0,459 у оз. Свитязь до 0,793 у оз. Белое (Лунинецкий район), как показано на рисунке 2. Для сравнения, индекс уязвимости наименее уязвимого

озера Нарочь не превышает 0,300, самый высокий индекс уязвимости был отмечен для озера Болдук и составил 0,856.

Рассчитанные величины интегральных индексов уязвимости озер позволили отнести 6 из 7 озер в тип с высокой уязвимостью, озеро Свитязь отнесено к типу со средней степенью уязвимости к внешнему воздействию. В 1970-е гг. индексы уязвимости этого водоема были выше и находились в диапазоне, характерном для уязвимых озер, однако в дальнейшем, в связи с возросшей рекреационной нагрузкой, в водной массе возросло количество растворенных веществ, снизилась прозрачность, что и повлекло снижение интегральных индексов уязвимости.

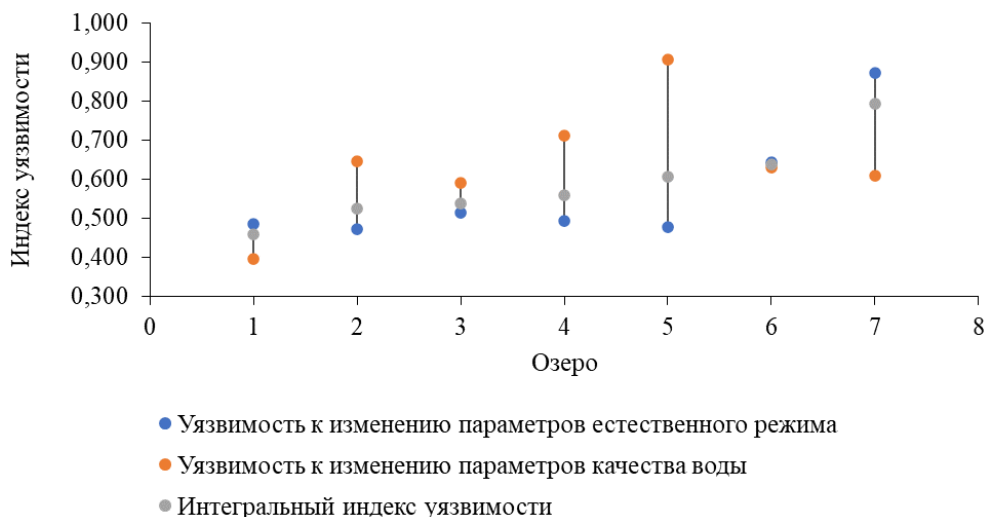


Рисунок 2 – Значения индексов уязвимости к внешнему воздействию и сводных показателей для исследуемых озер

Числами на рисунке обозначены озера: 1 – Свитязь, 2 – Чербомысло, 3 – Бредно, 4 – Большое Островито, 5 – Глубокое, 6 – Белое (Полоцкий район), 7 – Белое (Лунинецкий район)

Как видно из рисунка, между сводными показателями двух групп критериев присутствуют достаточно большие различия. Так, уязвимость к изменению параметров качества воды выше в озерах Чербомысло, Бредно, Глубокое, Большое Островито, отличающихся крайне низкими концентрациями растворенных веществ. Озера Свитязь и Белое, расположенное в Лунинецком районе, из-за достаточно большой глубины и слабого водообмена более уязвимы к изменению параметров естественного режима. Наиболее «сбалансированы» относительно интегрального индекса уязвимости сводные показатели обеих групп критериев уязвимости озера Белого, расположенного в Полоцком районе.

Озеро Свитязь может служить модельным водоемом для изучения процессов трансформации экосистем уязвимых озер при рекреационной нагрузке. Кроме этого, научное сопровождение требуется и при восстановлении экосистемы, т.к. данных о восстановлении озерных экосистем такого типа немного, а сами экосистемы слабо реагируют на восстановительные мероприятия.

Приуроченность уязвимых озер к низинам нетипична для Беларуси, поэтому в данном аспекте исследуемые озера также уникальны. Большая часть озер с высокой уязвимостью к внешнему воздействию расположена на возвышенно-

стях. Котловины таких озер имеют ложбинное и эвразийское происхождение. Это обуславливает большие глубины, малые площади водосборов, слабый внутренний и внешний водообмен. В то же время, за счет притока подземных вод, минерализация глубоких озер может быть достаточно высокой (в оз. Глубелька она может достигать 270 мг/дм³, в то время как в исследуемых озерах она не превышает 35,9 мг/дм³).

Внешний водообмен рассматриваемых ацидотрофных озер также медленный, однако их уязвимость обусловлена в первую очередь гидрохимическими особенностями.

В условиях климатических изменений наиболее сильно могут измениться экосистемы мелководных озер [4, 7] (Бредно, Чербомысло), т.к. колебания уровней воды в них приводят к значительным изменениям объемов воды. Более глубокие озера способны противостоять снижению уровней воды, однако адаптация охраняемых видов растений зависит от скорости изменения гидрологического и гидрохимического режимов, поэтому их изучение позволит глубже понять механизмы взаимодействия всех компонентов лимносистемы и строить прогноз их изменения в дальнейшем.

Заключение. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Почти все изученные ацидотрофные озера Беларуси, за исключением оз. Свитязь, являются уязвимыми к внешнему воздействию.

2) Интегральный индекс уязвимости озера Свитязь в 1970-х гг. также находился на уровне, характерном для озер с высокой уязвимостью, но вследствие высокой рекреационной нагрузки произошел переход озера в тип со средней степенью уязвимости.

3) Механизмы влияния климатических условий на эти озера изучены недостаточно, как и недостаточно данных об их гидрологическом, термическом и гидрохимическом режимах, поэтому необходимо дальнейшее комплексное исследование ацидотрофных озер.

Благодарность. Исследования выполняются при финансовой поддержке БРФФИ (проект X22M-069).

Список цитированных источников

1. Hildrew, A. G. Freshwater Acidification: Natural History, Ecology and Environmental Policy. International Ecology Institute: Oldendorf, Germany. – 2018. ISBN 9783946729273
2. Larson, D. W. On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon: abstr. ... PhD thes. / D.W. Larson. – Corvallis, 1970. – 162 p.
3. Muniz, I. Freshwater acidification: Its effects on species and communities of freshwater microbes, plants and animals / I. Muniz // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences. – 1990. – Vol. 97, – P. 227-254. doi:10.1017/S0269727000005364
4. The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient / L. Raman Vinna [et al.] // Communication Earth & Environment. – 2021. – № 2. – DOI: 10.1038/s43247-021-00106-w

5. Власов, Б. П. Особенности уникальных озер Беларуси как формирующая основа ресурсов реликтовых видов *Isoëtes L.* и *Lobelia dortmanna L.* / Б. П. Власов // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2014. – № 1. – С. 62–67.
6. Комплексное лимнологическое обследование озерных водоемов Белоруссии: отчет о НИР. – Минск, БГУ; рук. О. Ф. Якушко. – 1971 – 1980. ХД-ЛОЗ-671717.
7. Мякишева, Н. В. Многокритериальная классификация озер / Н. В. Мякишева. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 160 с.
8. Озёра Беларуси: Справочник. / Б. П. Власов [и др.] // – Минск: БГУ, 2004. – 284 с.
9. Примак, Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Е. А. Примак. – Санкт-Петербург, 2009. – 24 с.
10. Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания: отчет о НИР. – БГУ; рук. Б. П. Власов. – Минск, 2000 – 2016. — № ГР 20164690.
11. Скадовский, С. Н. Предварительное сообщение о результатах гидробиологического и физико-химического исследования Петровских озер Тверской губернии / С. Н. Скадовский, А. Н. Щербаков, Г. Г. Винберг // Применение методов физической химии к изучению биологии пресных вод. – М., 1928.
12. Скадовский, С. Н. Физико-химический режим Петровских озер и общее заключение / С. Н. Скадовский // Зоол. журн. 1933. Т. 12, вып. 3.
13. Структура и функционирование экосистем кислотных озер /отв. ред. В.Т. Комов // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, вып. 70 (73). – СПб, Наука. – 1994. – 248 с.
14. Суховило, Н. Ю. Пространственные закономерности устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию / Н. Ю. Суховило, А. А. Новик // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 51–65.
15. Якушко, О. Ф. Озероведение. География озер Беларуси / О. Ф. Якушко. – Минск : Высшая школа, 1981 – 223 с.

УДК 691.51

**КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТОРИЧЕСКОГО
ЗДАНИЯ ХРАМА СВЯТОЙ ВЕЛИКОМУЧЕНИЦЫ ПАРАСКЕВЫ
ПЯТНИЦЫ В Д. СЫЧИ БРЕСТСКОГО РАЙОНА**

Э. А. Тур

УО «Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
tur.elina@mail.ru

Аннотация

В составе научно-проектной документации разрабатывается раздел «Комплексные научные изыскания», который состоит из фотофиксации, обмеров, исторических, археологических и химико-физических исследований.