

ISSN 2079-3928



# *Природо- пользование*



**1**

**2019**

Государственное научное учреждение  
«Институт природопользования  
Национальной академии наук Беларуси»

# Природопользование

---

2019. № 1

---

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.  
В 2018 г. преобразован в журнал.  
Выходит 2 раза в год

## Главный редактор

**Карабанов А. К.** – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор

## Редакционная коллегия

**Хомич В. С.** – доктор географических наук (*заместитель главного редактора*)  
**Томсон А. Э.** – кандидат химических наук (*заместитель главного редактора*)  
**Высоченко А. В.** – кандидат технических наук (*ответственный секретарь*)  
**Айзберг Р. Е.** – член-корреспондент, доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Бамбалов Н. Н.** – академик, доктор сельскохозяйственных наук, профессор  
**Бровка Г. П.** – доктор технических наук  
**Грибик Я. Г.** – кандидат геолого-минералогических наук  
**Жогло В. Г.** – доктор геолого-минералогических наук  
**Какарека С. В.** – доктор технических наук  
**Камышенко Г. А.** – кандидат технических наук  
**Курзо Б. В.** – доктор технических наук  
**Кухарчик Т. И.** – доктор географических наук  
**Лиштван И. И.** – академик, доктор технических наук, профессор  
**Логинов В. Ф.** – академик, доктор географических наук, профессор  
**Лысенко С. А.** – доктор физико-математических наук  
**Матвеев А. В.** – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Струк М. И.** – кандидат географических наук

## Международный редакционный совет

**Балтрунас В.** – доктор наук (геология), профессор (Литва)  
**Гнеушев В. А.** – кандидат технических наук (Украина)  
**Гожик П. Ф.** – академик НАН Украины, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Украина)  
**Зилитинкевич С. С.** – доктор физико-математических наук, профессор (Финляндия)  
**Зюзин Б. Ф.** – доктор технических наук, профессор (Россия)  
**Клавинс М.** – доктор наук (химия), профессор (Латвия)  
**Маркс Л.** – доктор наук (геология), профессор (Польша)  
**Руденко Л. Г.** – академик НАН Украины, доктор географических наук, профессор (Украина)  
**Снытко В. А.** – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)  
**Тишков А. А.** – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)  
**Черепанский М. М.** – доктор геолого-минералогических наук, профессор (Россия)

## Адрес

Ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск.  
Тел. (017) 267-26-32, факс (017) 267-24-13.  
E-mail: nature@ecology.basnet.by.  
Веб-страница: <http://ecology.basnet.by/journal/Prirodopolzovanie.html>

State Scientific Institution  
“Institute for Nature Management  
of the National Academy of Sciences of Belarus”

# Nature Management

---

2019. № 1

---

Was founded in 1996 as a proceeding.  
In 2018 was transformed into a journal.  
Periodicity is 2 issues per year

## Editor-in-Chief

**Aleksandr Karabanov** – Academician, D.Sc. (Geology and Mineralogy), Professor

## Editorial Board

**Valery Khomich** – D.Sc. (Geography) (*Associate Editor-in-Chief*)  
**Aleksey Tomson** – Ph.D. (Chemistry) (*Associate Editor-in-Chief*)  
**Anna Vysochenko** – Ph.D. (Technical) (*Executive Secretary*)  
**Roman Aizberg** – Corresponding Member, D.Sc. (Geology and Mineralogy), Professor  
**Nikolai Bambalov** – Academician, D.Sc. (Agricultural), Professor  
**Gennadiy Brovka** – D.Sc. (Technical)  
**Yaroslav Gribik** – Ph.D. (Geology and Mineralogy)  
**Sergey Kakareka** – D.Sc. (Technical)  
**Halina Kamyshenka** – Ph.D. (Technical)  
**Boris Kurzo** – D.Sc. (Technical)  
**Tamara Kukharchyk** – D.Sc. (Geography)  
**Ivan Lishtvan** – Academician, D.Sc. (Technical), Professor  
**Vladimir Loginov** – Academician, D.Sc. (Geography), Professor  
**Sergey Lysenko** – D.Sc. (Physical and Mathematical)  
**Aleksey Matveev** – Academician, D.Sc. (Geology and Mineralogy), Professor  
**Mikhail Struk** – Ph.D. (Geography)  
**Vasiliy Zhoglo** – D.Sc. (Geology and Mineralogy)

## International Editorial Council

**Valentinas Baltrunas** – D.Sc. (Geology), Professor (Lithuania)  
**Mikhail Cherepanskii** – D.Sc. (Geology and Mineralogy), Professor (Russia)  
**Vladimir Gneushev** – Ph.D. (Technical) (Ukraine)  
**Pietr Gozyk** – Academician, D.Sc. (Geology and Mineralogy) (Ukraine)  
**Leshek Marks** – Dr. Habil. (Geology), Professor (Poland)  
**Maris Klavins** – Dr. Habil. (Chemistry), Professor (Latvia)  
**Leonid Rudenko** – Academician, D.Sc. (Geography) (Ukraine)  
**Valerian Snytko** – Corresponding Member, D.Sc. (Geography), Professor (Russia)  
**Arcadiy Tishkov** – Corresponding Member, D.Sc. (Geography) (Russia)  
**Sergei Zilitenkevich** – D.Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Finland)  
**Boris Zuzin** – D.Sc. (Technical), Professor (Russia)

## Address

10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus.  
Phone: (017) 267-26-32, fax: (017) 267-24-13.  
E-mail: nature@ecology.basnet.by

# СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

#### GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

- 
- |   |   |    |
|---|---|----|
| <b>Логинов В. Ф.,<br/>Лысенко С. А.,<br/>Бровка Ю. А.</b><br><i>Loginov V. F.,<br/>Lysenko S. A.,<br/>Brovka Yu. A.</i>   | Изменения температуры Земного шара и их обусловленность внешними и внутренними факторами<br><i>Earth's surface temperature changes and their exposure to internal and external factors</i>  | 6  |
| <b>Лысенко С. А.,<br/>Чернышев В. Д.,<br/>Коляда В. В.</b><br><i>Lysenko S. A.,<br/>Chernyshev V. D.,<br/>Kalyada V. V.</i>   | Сеточный архив метеорологических данных Республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата<br><i>A grid archive of meteorological data of the Republic of Belarus and the opportunity of its use in research of spatial-temporal peculiarities of climate changes</i> | 17 |
| <b>Кокош Ю. Г.,<br/>Какарека С. В.</b><br><i>Kokosh Yu. G.,<br/>Kakareka S. V.</i>  | Сезонная динамика содержания формальдегида в атмосферном воздухе городов Беларуси<br><i>Seasonal dynamics of formaldehyde concentrations in atmospheric air of Belarusian cities</i>  | 28 |
| <b>Руденко Л. Г., Голубцов А. Г.,<br/>Чехний В. М., Иваненко Е. И.,<br/>Дидух Я. П., Лисовский С. А.,<br/>Маруняк Е. А., Костюшин В. А.</b><br><i>Rudenko L. H., Golubtsov O. H.,<br/>Chekhniy V. M., Ivanenko Eu. I.,<br/>Didukh Ya. P., Lisovski S. A.,<br/>Maruniak Eu. O., Kostiushyn V. A.</i> | Методика оценивания территории для формирования сети заповедных объектов в Украине<br><i>Methodology of territory assessment for the development of protected areas network in Ukraine</i>  | 37 |
| <b>Суховило Н. Ю.,<br/>Новик А. А.</b><br><i>Sukhovilo N. Yu.,<br/>Novik A. A.</i>  | Пространственные особенности устойчивости озер Беларуси к эвтрофикации<br><i>Spatial features of resistance of lakes of Belarus to eutrophication</i>   | 51 |
| <b>Савич-Шемет О. Г.,<br/>Гапанович Е. В.,<br/>Анцух Ю. П.</b><br><i>Savich-Shemet O. G.,<br/>Gapanovich E. V.,<br/>Antsuh Yu. P.</i>   | Учет фактора атмосферных осадков в организации очистки поверхностного стока с урбанизированной территории (на примере г. Минска)<br><i>Accounting of atmospheric sediments factor in the organization of cleaning the surface drain from urbanized territory (on the example of Minsk city)</i>   | 66 |
| <b>Хомич В. С., Савченко С. В.,<br/>Рыжиков В. А., Глушень Е. М.,<br/>Романкевич Ю. А.,<br/>Зайн Эль-Динь Р. М.</b><br><i>Khomich V. S., Savchenko S. V.,<br/>Ryzhikov V. A., Glushen E. M.,<br/>Romankevich Yu. A.,<br/>Zain El-Dinh R. M.</i>   | Проблемы обращения с городскими почвами, загрязненными нефтепродуктами и тяжелыми металлами<br><i>Problems of handling with urban soils, polluted petroleum products and heavy metals</i>   | 76 |
| <b>Ракович В. А., Бамбалов Н. Н.</b><br><i>Rakovich V. A., Bambalov N. N.</i>   | Научное обоснование направлений использования выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений Гомельской области с учетом их воздействия на окружающую среду<br><i>Scientific substantiation of the directions of use peat deposits after peat excavation of the Gomel region taking into account their environmental impact</i> | 91 |

- Камышенко Г. А.** Анализ урожайности картофеля в Витебской области в изменяющихся погодноклиматических условиях 98  
*Kamyshenka H. A. Analysis of potato yield in the Vitebsk region in changing weather and climatic conditions*
- 

- Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Решетников В. Н., Ярошук А. А., Коломиец Э. И., Алещенко З. М., Лиштван И. И., Карбанович Т. М.** Изменчивость количественных характеристик биохимического состава плодов голубики в зависимости от эдафического и метеорологических факторов 107  
*Rupasova Zh. A., Yakovlev A. P., Reshetnikov V. N., Yaroshuk A. A., Kolomiets E. I., Aleshchenkova Z. M., Lishtvan I. I., Karbanovich T. M. Variability of quantitative characteristics of the biochemical composition of fruits of a blueberry depending on edaphic and meteorological factors*
- 

- Кухарчик Т. И., Чернюк В. Д., Козыренко М. И.** Регулирование обращения с полибромдифениловыми эфирами в Беларуси и других странах 121  
*Kukharchyk T. I., Chernyuk V. D., Kazyrenka M. I. Approaches to polybromodiphenyl ethers regulation in Belarus and in other countries*
- 

## ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

---

- Гарецкий Р. Г., Каратаев Г. И., Голобоков С. В., Сушкевич С. Л., Хибиев А. К.** Глубинное строение литосферы Балтийско-Приднестровского перикратонного опускания 134  
*Garetsky R. G., Karatayev G. I., Golobokov S. V., Sushkevich S. L., Khibiev A. K. Deep structure of the lithosphere of the Baltic and Pridnestrovsk pericraton lowering*
- 

- Гарецкий Р. Г., Каратаев Г. И.** Астеносфера – ведущий фактор формирования тектоносферы Припятского и Днепровского грабенов 146  
*Garetsky R. G., Karatayev G. I. An asthenosphere is a leading factor of forming of tektonosfery of the Pripjat and Dnepr Grabens*
- 

- Матвеев А. В.** Районирование территории западной части Белорусского Полесья по степени комфортности геологической среды для населения 154  
*Matveyev A. V. The zonation of the western part of the Belarusian Polesie on the geological environment comfort levels for the population*
- 

- Матвеев А. В., Зерницкая В. П.** Современные геологические процессы на территории Белорусского Поозерья 163  
*Matveyev A. V., Zernitskaya V. P. Modern geological processes on the territory of the Belarusian Poozer'e*
- 

- Айзберг Р. Е., Грибик Я. Г., Бескопыльный В. Н.** Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси 171  
*Aizberg R. E., Gribik Y. G., Beskopylnyi V. N. Non-traditional sources of hydrocarbon raw materials in subsoil of Belarus*
- 

- Лиштван И. И., Курзо Б. В., Гайдукевич О. М., Навоша Ю. Ю.** Ресурсы и качественный состав торфяного сырья на месторождениях, зарезервированных для термобioхимической переработки 188  
*Lishtvan I. I., Kurzo B. V., Gaidukevich O. M., Navosha Yu. Yu. Resources and qualitative composition of peat raw material in the reserved deposits for the thermobiochemical processing of peat*
- 

- Бровка А. Г., Дедюля И. В.** Влияние промораживания на прочностные свойства горных пород из участков проходки шахтных стволов 205  
*Brovka A. G., Dziadziulia I. V. Influence of freezing on the strength properties of rocks from the sites of shaft sinking*

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**  
*GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING  
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

---

- Селянина С. Б., Орлов А. С., Пономарева Т. И., Труфанова М. В., Ярыгина О. Н., Соколова Т. В., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С.** Сорбционные свойства верхового торфа Прибеломорской провинции (Россия) 211  
*Selyanina S. B., Orlov A. S., Ponomareva T. I., Trufanova M. V., Yarygina O. N., Sokolova T. V., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S.* *Sorption properties of peat of the Pribelomorsk province (Russia)*
- 
- Коврик С. И., Кушнерова С. А., Бамбалов Н. Н., Соколов Г. А.** Обоснование способа выделения гуминовых веществ из торфа для получения жидких концентрированных микроэлементных удобрений 219  
*Kovrik S. I., Kushnerova S. A., Bambalov N. N., Sokolov G. A.* *Substantiation of selection method of humic substances from peat to produce liquid concentrated microelement fertilizer*
- 
- Картыжова Л. Е., Алещенкова З. М., Короленок Н. В., Яковлев А. П., Булавко Г. И., Антохина С. П., Соколова Т. В., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С.** Микробиологическая активность почвы на выработанных торфяных месторождениях при использовании микробно-растительной ассоциации 225  
*Kartyzhova L. E., Aleschenkova Z. M., Korolyonok N. V., Yakovlev A. P., Bulavko G. I., Antokhina S. P., Sokolova T. V., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S.* *Microbiological activity of soil on elaborated peat deposits during the use of microbial-plant association*
- 
- Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В.** Сравнительный анализ эффективности действия катализаторов при пиролизе низинного торфа и бурых углей 236  
*Dydarchik V. M., Kraiko V. M., Anyfrieva E. V.* *The comparative analysis of the efficiency of catalyst actions during the pyrolysis of lowland peat and brown coal*
- 
- Соколов Г. А., Красноберская О. Г., Феофанов Д. А., Добринец Е. А.** Влияние микробиологического препарата «Полибакт» на агрохимические характеристики ферментируемого субстрата 244  
*Sokolov G. A., Krasnoberskaya O. G., Feofanov D. A., Dobrinets E. A.* *The impact of «Polybact» microbiological agent on the agrochemical properties of the fermented substrate*
- 
- Томсон А. Э., Наумова Г. В., Линкевич С. А., Овчинникова Т. Ф., Соколова Т. В., Жмакова Н. А., Царюк Т. Я., Макарова Н. Л., Навоша Ю. Ю., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С., Фалюшина И. П., Макеенко А. А.** Биологически активная кормовая добавка с сорбционными свойствами для поросят-отъемышей 249  
*Tomson A. E., Naumova G. V., Linkevich S. A., Ovchinnikova T. F., Sokolova T. V., Zhmakova N. A., Tsariuk T. Ya., Makarova N. L., Navosha Yu. Yu., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S., Faliushyna I. P., Makeenko A. A.* *Biologically active feed additive with sorption properties for weaning pigs*
- 

**ХРОНИКА  
CHRONICS**

---

- Хомич В. С., Логинов В. Ф.** Географические и геоэкологические аспекты развития зеленой экономики на постсоветском пространстве 262  
*Khomich V. S., Loginov V. F.* *Geographical and geoecological aspects of green economy development in the post-soviet space*

УДК 556.5(476)

Поступила в редакцию 26.03.2019  
Received 26.03.2019

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ОЗЕР БЕЛАРУСИ К ЭВТРОФИРОВАНИЮ

Н. Ю. Суховило, А. А. Новик

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Статья посвящена оценке устойчивости водоемов к изменению параметров естественного режима и к антропогенной нагрузке. При ее расчете использована методика Е. А. Примака, адаптированная для водоемов Беларуси. На основании анализа 14 параметров естественного режима (морфометрические показатели и скорость внешнего и внутреннего водообмена) и характеристик качества среды (гидрохимические показатели) для 148 разнотипных озер рассчитаны интегральные индексы устойчивости водоемов к эвтрофированию. Описана разработанная авторами классификация озер Беларуси на основе величины интегрального индекса устойчивости к эвтрофированию, а также кластерного анализа. Среди всех водоемов выделены группы неустойчивых, среднеустойчивых и устойчивых. Выявлены пространственные закономерности распределения озер с различной степенью устойчивости. Создана схема зонирования территории Беларуси по устойчивости озер к эвтрофированию, включающая четыре отдельные области: водно-ледниковые, озерно-аллювиальные равнины и низменности с устойчивыми и среднеустойчивыми озерами; моренные возвышенности и равнины, камовые массивы с неустойчивыми озерами; моренные возвышенности с преимущественно неустойчивыми озерами; озерно-ледниковые, аллювиальные низменности, водно-ледниковые и моренные равнины с озерами различной степени устойчивости (преимущественно среднеустойчивыми).

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании развития озер под влиянием естественных природных процессов, управлении озерными экосистемами, их рекультивации, а также в учебном процессе в области гидрологии суши, лимнологии, гидроэкологии.

**Ключевые слова:** озеро; устойчивость к эвтрофированию; водообмен; интегральный индекс устойчивости; классификация; зонирование.

**Для цитирования.** Суховило Н. Ю., Новик А. А. Пространственные особенности устойчивости озер Беларуси к эвтрофированию // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 51–65.

## SPATIAL FEATURES OF RESISTANCE OF LAKES OF BELARUS TO EUTROPHICATION

N. Yu. Sukhovilo, A. A. Novik

*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**Abstract.** The article describes the assessing the resistance of water bodies to changes in the parameters of the natural regime and anthropogenic load. The calculation of resistance of lakes was made on the basis of the method of E. A. Primak, adapted for reservoirs of Belarus. Based on the analysis of 14 parameters of the natural regime (morphometric characteristics and speed of external and internal water exchange) and characteristics of environmental quality (hydrochemical indicators), integral indices of water resistance to eutrophication were calculated for 148 lakes of different types. The classification of Belarusian lakes developed by the authors on the basis of the value of the integral index of resistance to eutrophication, as well as cluster analysis is described. Three groups of lakes: unstable, moderately stable and stable were identified. Spatial patterns of the distribution of lakes with varying degrees of stability are revealed. A scheme of zoning of the territory of Belarus on the lake's resistance to eutrophication has been created. It includes four regions: fluvio-glacial, limno-alluvial plains and lowlands with stable and medium-stable lakes; moraine ridges and plains, kama massives with unstable lakes; moraine ridges with predominantly unstable lakes; limnoglacial, alluvial lowlands, fluvio-glacial and moraine plains with lakes of varying degrees of stability (mostly medium-stable).

The results obtained can be used to predict the development of lakes under the influence of natural processes, the management of lake ecosystems, their recultivation, as well as in the educational process in the field of hydrology, limnology, hydroecology.

**Key words:** lake; resistance to eutrophication; water exchange; integral index of resistance; classification; zoning.

**For citation.** Sukhovilo N. Yu., Novik A. A. Spatial features of resistance of lakes of Belarus to eutrophication. *Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 51–65.

**Введение.** В условиях изменений природной среды и интенсивной антропогенной нагрузки актуальным является сохранение водных экосистем. Определение допустимых норм воздействия на них невозможно без тщательного анализа взаимосвязи между всеми компонентами лимносистем и количественной оценки устойчивости к эвтрофированию.

Исследованию устойчивости озер к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию посвящено множество работ. При этом активно развивается теория существования нескольких устойчивых состояний озерной экосистемы, соответствующих разным трофическим уровням. Основными из них являются олиготрофное и эвтрофное, но в эвтрофном озере возможно несколько вариантов равновесного сочетания биотических и абиотических факторов [1–4]. Важным аспектом при этом является отсутствие на водосборе локальных источников загрязнения, постоянно воздействующих на экосистему и выводящих ее из естественного устойчивого состояния.

Наиболее обоснованная концепция устойчивости водных экосистем предложена В. Н. Михайловым и К. К. Эдельштейном, подразумевающими под устойчивостью водной экосистемы ее способность противостоять внешним естественным и антропогенным воздействиям и внутренним процессам, которые нарушают структуру и нормальное функционирование всей экосистемы или отдельно ее абиотической и биотической частей [5, 6]. Это определение устойчивости водных экосистем положили в основу своих исследований В. В. Дмитриев, А. Н. Огурцов, Е. А. Примак и др. Ими была разработана методика балльно-индексной и интегральной оценки устойчивости озер к эвтрофированию и их экологического благополучия. Авторы выделяют адаптационную устойчивость, свойственную водоемам и регенерационную, характерную для водотоков [7–10], что обусловлено различной скоростью возврата водных объектов в исходное состояние при прекращении антропогенного воздействия. Чем выше проточность, тем интенсивнее происходят вынос и окисление эвтрофирующих веществ.

Исследованию термической и экологической устойчивости озер Беларуси посвящены работы О. Ф. Якушко, Г. М. Базыленко и Л. В. Гурьяновой, Б. П. Власова, А. А. Новика и др. [11–16]. Устойчивость водоемов Беларуси к изменению природно-климатических условий и антропогенному воздействию оценивали, главным образом, с позиции влияния на нее морфометрии котловин и отдельных гидродинамических параметров. Интегральную оценку устойчивости озер Беларуси, имеющую конкретное количественное выражение и позволяющую более объективно сравнивать их по этому показателю, не производили. Поэтому данное направление исследований приобретает особую актуальность, так как позволяет помимо оценки естественной устойчивости водоемов разработать и классификацию озер Беларуси по величине интегрального индекса устойчивости к эвтрофированию. При высоких показателях устойчивости амплитуда колебаний параметров структуры лимносистемы сокращается до минимальных значений и не выходит за определенные границы, которые, в свою очередь, находятся в поле постоянной эволюционной геоклиматической динамики территорий.

Цель исследования – разработать классификацию озер Беларуси по степени их устойчивости к эвтрофированию и зонирования территории по этому показателю.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объектов исследования было выбрано 148 озер, расположенных на территории всех физико-географических провинций Беларуси, различающихся по генезису котловин, морфометрическим характеристикам и находящихся на различных стадиях эволюции. Исходными данными послужили материалы комплексного обследования озер Беларуси, проведенного НИЛ озераведения БГУ, фондовые данные Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды [17–19], а также материалы собственных полевых исследований авторов, позволившие актуализировать базу данных. Площади исследуемых озер изменяются от 0,027 км<sup>2</sup> у озера Святого, расположенного в Солигорском районе, до 79,6 км<sup>2</sup> у озера Нарочь, объемы – от 0,14 млн до 710,4 млн м<sup>3</sup>. Максимальные глубины колеблются от 0,6 м (озеро Судoble) до 53,6 м у озера Долгого (Глубокский район).

По величине минерализации исследованные водоемы существенно отличаются. Среди них присутствуют водоемы как с очень низкой, так и с высокой минерализацией. Она изменяется от 16,6 (озеро Большое Островито, Полоцкий район) до 407,2 (озеро Белое, Березовский район) мг/дм<sup>3</sup>. 50 % озер имеют повышенную (200–400 мг/дм<sup>3</sup>) и 39,8 % – среднюю (100–200 мг/дм<sup>3</sup>) минерализацию. Важным показателем при оценке экологического состояния водоема является его прозрачность. В летний период она колеблется от 0,3 (гипертрофные водоемы с нарушенным режимом) до 9,5 м (озеро Глубокое, Полоцкий район) [17].

В Поозерье расположено 117 озер, на возвышенностях и равнинах Центральной Беларуси – 7, на низменностях Полесья – 24. Картосхема расположения исследованных озер приведена на рис. 1.





Рис. 1. Расположение объектов исследования

Fig. 1. Location of studied lakes

Методика интегральной оценки устойчивости озер к эвтрофированию, предложенная Е. А. Примак [10] и основанная на применении метода рандомизированных сводных показателей (МРСП) [20], была адаптирована для водоемов Беларуси. Минимальные и максимальные значения количественных показателей, характерные для озер России, неприменимы к малым озерам Беларуси, поэтому при расчете были взяты региональные максимумы морфометрических, динамических и гидрохимических характеристик. Помимо этого, были изменены некоторые параметры. Среди критериев оценивания устойчивости водоемов к изменению параметров естественного режима изменения коснулись устойчивости не учитывали их амплитуду. Показатель наличия либо отсутствия термической стратификации был заменен на величину термической устойчивости в летний период. Ее расчет производили с помощью термодинамической модели Lake Analyzer. Среднюю температуру водной массы в летний период не учитывали по причине сильной обратной корреляции с максимальной глубиной.

Набор критериев оценивания устойчивости водоемов к изменению параметров качества воды также был существенно изменен. Поскольку для большинства озер Беларуси отсутствуют данные о содержании взвешенных веществ, значения БПК<sub>5</sub> известны только для озер, на которых проводится мониторинг качества воды, при оценке устойчивости их не использовали. Вместо них учитывали общую минерализацию, pH, прозрачность и содержание биогенных элементов: азота нитратного и фосфора фосфатного. Перечень показателей, использованных для интегральной оценки устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию, а также пределы их колебаний, приведены в табл. 1.

Устойчивость озера к внешнему воздействию прямо пропорциональна его размерам. Чем больше площадь и объем водной массы, тем больше объем окислительной среды. Следовательно, большие по площади озера способны нейтрализовать больше загрязняющих веществ, поступающих с водосбора. Необходимость анализа максимальной глубины водоема при оценке его устойчивости к внешнему воздействию обусловлена ее использованием в расчете термической устойчивости.

Период водообмена определяет величину динамической и допустимой фосфорной нагрузки. Чем выше проточность озера, тем менее его экосистема уязвима к изменению факторов внешней среды, так как в нем не происходит аккумуляция загрязняющих веществ. Кроме этого, окислительная среда, формирующаяся из-за постоянного насыщения водной массы кислородом, способствует разложению органических и минеральных загрязнителей.

**Таблица 1. Критерии интегральной оценки устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию и пределы их колебаний****Table 1. Criteria for an integral assessment of the resistance of Belarusian lakes to external effects and the limits of their fluctuations**

Параметр	Единица измерения	Min	Max
Площадь озера	км <sup>2</sup>	0,027	79,6
Объем водной массы	млн м <sup>3</sup>	0,14	710,4
Максимальная глубина	м	0,6	53,6
Удельная водообменность	–	0,02	34,63
Динамическая нагрузка	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	0,1	48,8
Удельный водосбор	–	0,44	87,36
Термическая устойчивость водной массы в летний период	Дж/м <sup>2</sup>	–0,2	1084,26
Прозрачность	м	0,3	9,5
Общая минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	16,6	407,2
Фосфаты	мг/дм <sup>3</sup>	0	3,57
Нитраты	мг/дм <sup>3</sup>	0,001	1,8
Аммоний-ион	мг/дм <sup>3</sup>	0,001	3,9
Бихроматная окисляемость	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	5,75	129,3
pH	–	4,5	9,5

От площади, структуры водосбора и характера его использования в хозяйственной деятельности зависят состав и объем поступающих в озеро веществ. Если водосбор малого озера занимает большую площадь и активно используется в сельском хозяйстве, скорость эвтрофирования водоема значительно возрастает. При наличии на водосборах локальных источников загрязнения озера способны очень быстро переходить на более высокий трофический уровень. Примерами таких водоемов являются Кагальное, Миорское, Болойсо и др.

Малые водосборы, покрытые лесом, способствуют сохранению свойств озерной экосистемы на протяжении длительного времени. В таких водоемах высокая прозрачность, небольшой показатель цветности, а сами они, несмотря на максимальные глубины не более 15 м, находятся в мезотрофном состоянии (Глубокое, Чербомысло, Большое Островито). Заболоченность водосбора также является препятствием для его хозяйственного освоения.

Непосредственное влияние на способность водоема противостоять внешнему воздействию оказывает его термический режим, неразрывно связанный как с зональными климатическими, так и с морфометрическими характеристиками. Наличие и длительность различных периодов годового термического цикла, а также температура эпилимниона обусловлены географическим положением озера, в то время как на среднюю температуру воды, стратифицированность и термическую устойчивость значительное влияние оказывают морфометрические характеристики котловины. Озерами с наличием температурной стратификации считаются озера с разницей поверхностных и придонных температур в летний период 5 °С и более. Средняя глубина в них изменяется в зависимости от открытости котловины и колеблется от 3 до 8,9 м. Согласно термической классификации озер Беларуси О. Ф. Якушко они относятся к небольшим глубоким озерам, частично – к большим среднеглубоким (Нарочь, Мядель) и небольшим средне- и неглубоким водоемам [11]. Им соответствуют метагипотермические и гипотермические озера в классификации А. И. Тихомирова, а также термически очень глубокие, глубокие и среднеглубокие в классификации В. Хомсписа [21].

Наличие термической стратификации и высокая термическая устойчивость не способствуют обмену веществом и энергией между слоями. В результате поступающие с водосбора вещества не распределяются равномерно по всему объему воды, а скапливаются у ее поверхности, что может негативным образом сказываться на прозрачности озера и условиях среды обитания гидробионтов. Поэтому, чем сильнее стратифицирована водная масса, тем ниже ее устойчивость к внешнему воздействию.

Прозрачность воды является внешним признаком, который позволяет достаточно быстро оценить трофический статус водоема, и определяется содержанием взвешенных частиц, биомассой фитопланктона и деятельностью других живых организмов, например, моллюска-фильтратора дрейссены.

Общая минерализация и состав вод зависят, главным образом, от географического положения, определяющего соотношение осадков и испарения, однако в последние десятилетия хозяйственная деятельность человека стала более значимой, чем природно-климатические условия на водосборе. По величине минерализации большинство исследованных озер относится к среднеминерализованным, однако влияние подстилающих пород и антропогенное воздействие обеспечивают заметный

диапазон ее колебаний. Согласно гидрохимической классификации О. А. Алекина, все озера относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы.

Водородный показатель является важной характеристикой водной среды и отражает характер протекания внутриводоемных процессов. В озерах Беларуси активная реакция среды определяется в основном соотношением карбонатов, бикарбонатов, углекислого газа и органических кислот. В большинстве изученных озер на протяжении года в поверхностном слое показатель pH колеблется от нейтрального до слабощелочного. На заболоченных территориях встречаются озера со слабокислой (< 7,0) реакцией среды. Водоемы, подвергшиеся антропогенному эвтрофированию, в летний период имеют pH > 9,0. По вертикальному разрезу в направлении от поверхности ко дну наблюдаются кислотности, однако выражены они неодинаково.

Концентрация фосфатов является индикатором трофического статуса озера и в значительной степени влияет на развитие высшей водной растительности и фитопланктона. Содержание нитрат-иона также определяет продуктивность водоема, хотя и в меньшей степени, чем соединения фосфора.

Важнейшим показателем состояния озерной экосистемы является содержание в воде аммоний-иона. При переходе озер на более высокий трофический уровень возрастает не только концентрация ионов аммония, но и их доля в общем балансе связанного азота. Повышенная концентрация ионов аммония может быть использована в качестве индикатора, отражающего ухудшение экологического состояния водного объекта, процесса загрязнения поверхностных вод, в первую очередь бытовыми стоками и стоками с сельскохозяйственных угодий [22].

Бихроматная окисляемость отражает содержание в воде органического вещества и представляет собой количество кислорода, необходимое для его окисления. Величина окисляемости связана с зональными климатическими особенностями, а также является результатом антропогенного воздействия на водные экосистемы [22].

Оценка устойчивости водных объектов к повышению трофического статуса осуществлялась в шесть этапов. На первом этапе была отобрана обоснованная система критериев состояния биоты и абиотической среды, при использовании которой возможно диагностирование экологического состояния водной экосистемы. При этом нужно стремиться к тому, чтобы каждый из параметров был необходим, а все параметры вместе были достаточны для описания качества рассматриваемой системы. Все характеристики делятся на два типа. Увеличение значений характеристики первого типа приводит к улучшению состояния экосистемы (например, прозрачность), а рост значения характеристики второго типа – к его ухудшению. Кроме того, существуют характеристики, критические значения которых (значение pH = 7,0) разбивают шкалу изменений характеристики на два интервала с противоположными свойствами влияния переменной на состояние объекта. На этом же этапе вводились классы устойчивости и производился анализ диапазонов измерения исследуемых параметров [10].

На втором этапе осуществлялось нормирование исходных характеристик. Наиболее устойчивому состоянию по каждому критерию соответствует значение равное 1, наименее устойчивому – равное 0. Такое преобразование выполняется следующим образом.

Для критериев первого типа использовали правило перевода в виде

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

для критериев второго типа –

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

где  $q$  – нормированное значение параметра;  $x_i$  – текущее значение критерия;  $\max_i$  ( $\min_i$ ) – максимальное (минимальное) встречающееся значение критерия;  $\lambda$  – параметр, определяющий конкретный вид функций (1) и (2): ( $\lambda < 1$  – выпуклость вверх,  $\lambda > 1$  – выпуклость вниз). В данном случае  $\lambda = 1$ , так как,

согласно исследованию Е. А. Примака, 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 этом этапе также задавались минимальные и максимальные значения параметров. Для этого использовались минимальное и максимальное значения из каждой оценочной шкалы исходных характеристик.

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 используют линейную (или нелинейную) свертку показателей вида

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

представляющую собой взвешенное среднее арифметическое значений показателей  $q_i$  и определяемую вектором параметров  $w = (w_1 \dots w_m)$ , неотрицательными компонентами которого являются весовые коэффициенты, задающие значимость отдельных критериев для интегральной оценки уровня устойчивости. Введение дополнительного условия нормировки весов ( $w_1 + \dots + w_m = 1$ ) позволяет принять значение параметра  $w_i$  как оценку относительной значимости показателя  $q_i$ .

На четвертом этапе были введены оценки весовых коэффициентов  $w_i$ . Как правило, составление плана оценочных исследований само является первичным «взвешиванием» параметров, компонентов и их свойств. Однако его недостаточно, так как влияние отобранных факторов неравнозначно, в результате чего возникает необходимость введения разных коэффициентов значимости.

Вес отдельных показателей приведен в табл. 2.

**Таблица 2. Весовые коэффициенты отдельных показателей, использованные при оценке устойчивости озер Беларуси к внешнему воздействию**

**Table 2. Weights of indicators used in assessing of the resistance of lakes of Belarus to external impacts**

Критерии оценки устойчивости водоемов 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 устойчивости водоемов к изменению параметров качества воды							
Показатель	Прозрачность	Общая минерализация	pH	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Бихроматная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Вес	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

На шестом этапе по имеющимся данным определяли значения интегрального показателя по правилам построения основной модели-классификации [10]. Группы показателей также имели неодинаковый вес, поэтому при построении интегрального индекса устойчивости сводному показателю первой группы критериев был присвоен вес, равный 0,7, второй группе критериев – вес, равный 0,3.

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 так, что

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

с оценкой точности  $Q(q; I)$ :

$$[S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m, n, l)} \sum_{i=1}^{N(m, n, l)} [Q^{(i)}(q^{(j)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2. \quad (5)$$

Классификацию на основе рассчитанных индексов устойчивости сравнивали с результатами, полученными на основе иерархического кластерного анализа с применением аналогичных критериев оценивания. В качестве меры близости было использовано Евклидово расстояние, в качестве алгоритма объединения – метод Варда. Индексы устойчивости отражают адаптационную устойчивость, при кластерном анализе в отдельный кластер обособляются озера с высокой регенерационной устойчивостью. Итоговая классификация является синтезом двух исходных классификаций и позволяет устранить неточности, возникающие при использовании каждого из описанных подходов.

**Таблица 3. Значения интегрального индекса устойчивости исследованных озер к эвтрофированию**

**Table 3. The values of the integral index of the resistance of the studied lakes to eutrophication**

Класс устойчивости	Устойчивые	Среднеустойчивые	Неустойчивые
Значения интегрального индекса устойчивости	Выше 0,530	0,416–0,530	Ниже 0,416
Количество озер	36	89	23
Процент	24,3	60,1	15,5

**Результаты и их обсуждение.** В результате было выделено три группы водоемов по величине интегрального индекса устойчивости к эвтрофированию: устойчивые, среднеустойчивые и неустойчивые. Первая группа включает в себя неустойчивые водоемы с индексом устойчивости ниже 0,416. Она представлена небольшими по площади водоемами с глубокими ложбинными и эвразийскими котловинами (Болдук, Рудаково, Долгое (Глубокский район), Глубля), как показано на рис. 2, 3. При наличии локальных источников загрязнения они быстро переходят на более высокий трофический уровень, а их устойчивость резко возрастает. Возврат в исходное состояние в случае прекращения антропогенного воздействия практически невозможен, что отражает рис. 2.

Для среднеустойчивых озер второй группы характерны индексы устойчивости от 0,417 до 0,530. Среди них преобладают среднеглубокие и мелководные водоемы (Недрово, Плавно, Любань, Ореховское). К этой группе также относится ряд глубоководных озер с достаточно интенсивным вертикальным (Ричи) или горизонтальным (Сарро, Вечелье) водообменом. Локальные источники загрязнения действуют на них не так сильно, как на озера предыдущей группы, а естественное восстановление их экосистем протекает быстрее.

Третья группа характеризуется индексами устойчивости озер от 0,531 до 0,857. В ней преобладают водоемы с большой площадью и объемом водной массы. Примерами таких озер могут служить Дривяты, Струсто, Нарочь. Озера, подвергшиеся интенсивному антропогенному эвтрофированию с высоким содержанием загрязняющих веществ: (Болойсо, Великое, Белое (Березовский район) Березовское (Глубокский район) также характеризуются высоким значением интегрального индекса устойчивости, но она не является их природной особенностью, а приобретена в условиях высокой биогенной нагрузки.

Результаты кластерного анализа оказались схожими с результатами классификации на основе индекса устойчивости. В итоге также было выделено три кластера, отраженные на рис. 3. Первый из них включает небольшие по площади чистые озера и озера с большими глубинами и очень слабым вертикальным и горизонтальным водообменом. Они наиболее уязвимы к антропогенному воздействию и быстро переходят на высший трофический уровень, который сохраняется при прекращении воздействия. Примерами водоемов этой группы являются Троща, Рудаково, Болдук, Чербомысло. Все они расположены на севере Беларуси. При наличии локальных источников воздействия они являются очень уязвимыми для эвтрофирования, что можно проследить на примере озера Болойсо, которое в период, предшествовавший интенсивному антропогенному воздействию, также относилось к этой группе. Возврат к исходному трофическому уровню после прекращения поступления загрязняющих веществ крайне затруднителен или даже невозможен. В целом первый кластер неустойчивых озер больше, чем группа с невысокими индексами устойчивости.

Второй кластер формируют средние по размерам проточные слабоэвтрофные (Плисса (бассейн р. Мнюта), Недрово и др.) озера севера и малые высокоэвтрофные водоемы юга Беларуси (Олтуш, Святое, Песчаное). В первых не происходит аккумуляция приносимых с водосбора веществ, поэтому они отличаются слабой уязвимостью к эвтрофированию. Озера Полесья достигли высокого трофического уровня в ходе своей эволюции и антропогенного воздействия на их водосборы, поэтому повышение их трофического статуса крайне затруднительно. Однако из-за небольшого объема водной массы они менее устойчивы к изменению параметров внешней среды, чем водоемы третьей группы.

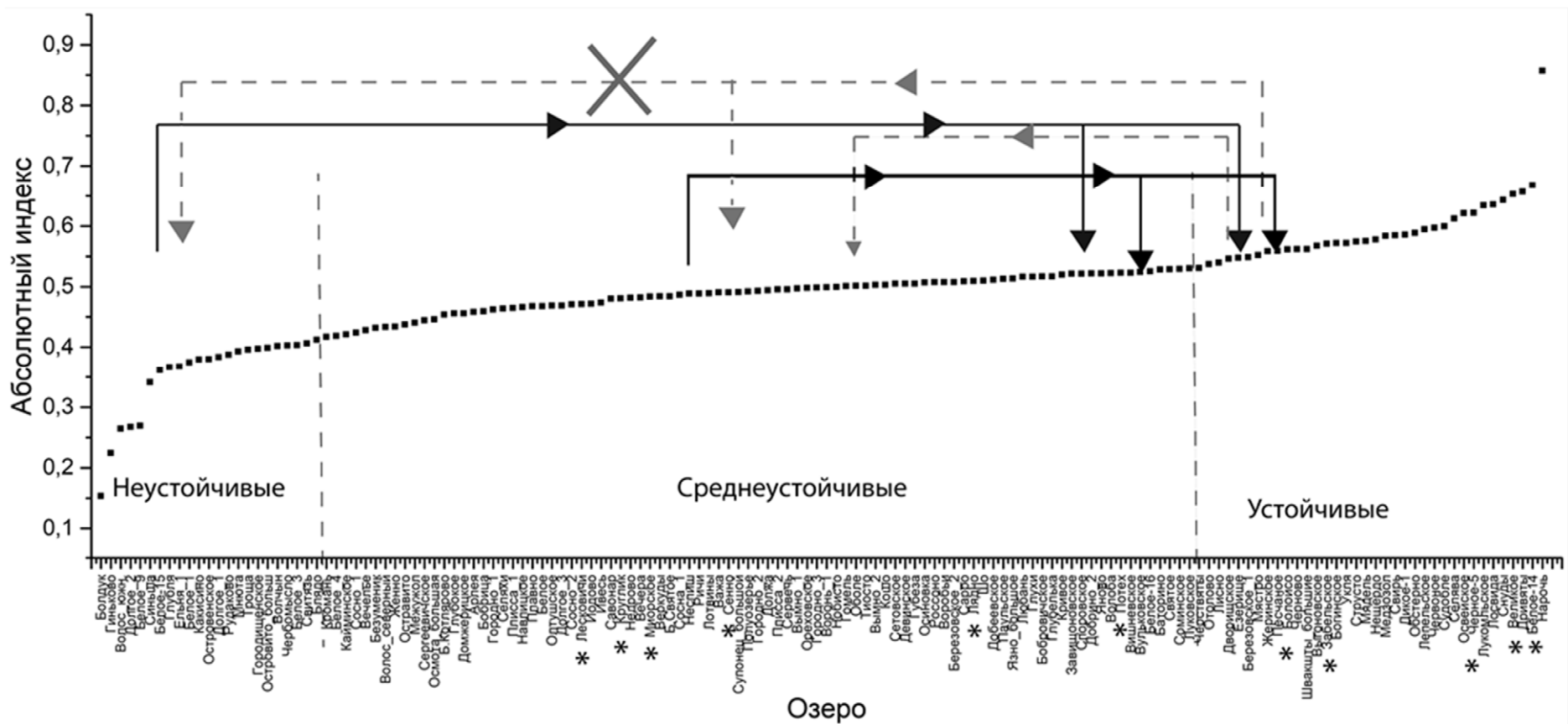


Рис. 2. Динамика устойчивости озер Беларуси, основанной на значениях интегральных индексов устойчивости к эвтрофированию. На схеме черными стрелками обозначен переход в группу более устойчивых при усилении внешнего воздействия, серыми пунктирными стрелками – переход в группу менее устойчивых при его ослаблении; \*озера, подвергшиеся антропогенному эвтрофированию

Fig. 2. Dynamics of the stability of the lakes of Belarus, based on the values of the integral indices of resistance to eutrophication. In the diagram, the black arrows indicate the transition to the group that is more stable when the external influence is intensified; gray dashed arrows indicate transition to a less stable group when it is weakened; \*anthropogenically disturbed lakes

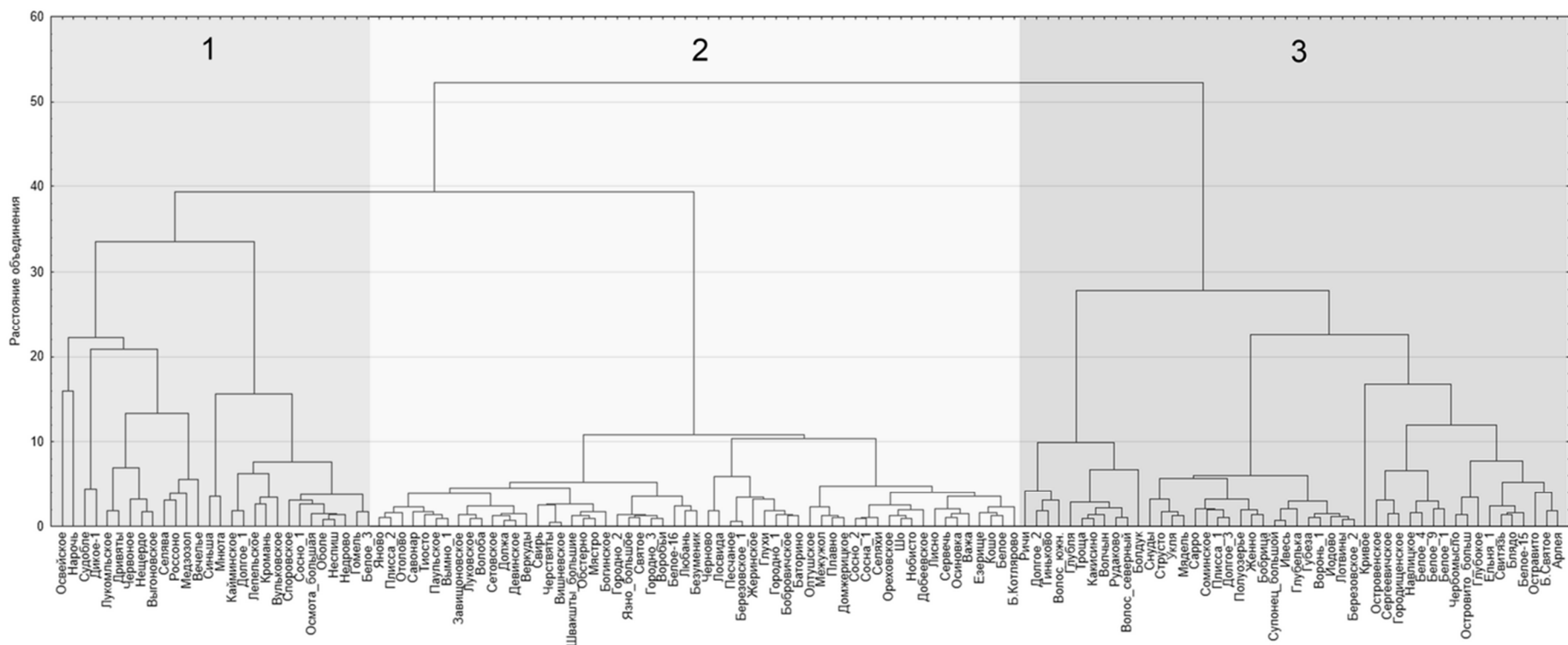


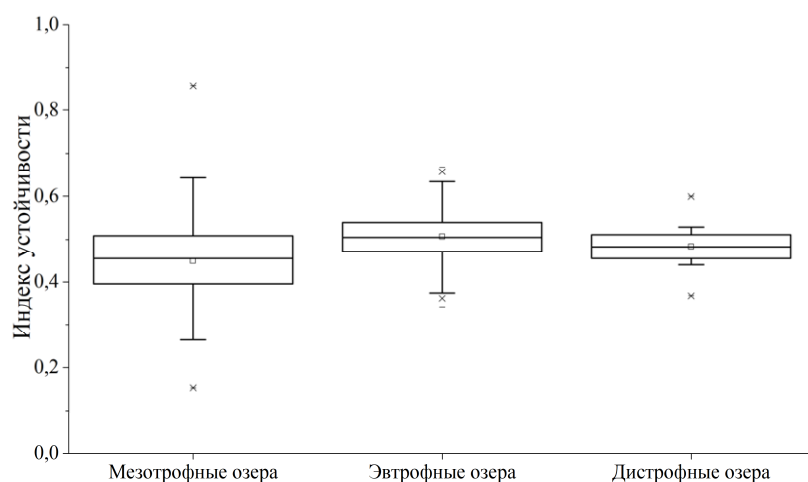
Рис. 3. Результаты классификации озер Беларуси по степени устойчивости к эвтрофикации. Дендрограмма для 136 наблюдений (исключены озера, подвергшиеся антропогенному эвтрофированию). Мера близости – Евклидово расстояние. Алгоритм объединения – метод Варда. Кластеры: 1 – устойчивые озера, 2 – среднеустойчивые, 3 – неустойчивые

Fig. 3. The results of classification of Belarusian lakes according to the degree of resistance to eutrophication. Dendrogram for 136 observations (anthropogenically disturbed lakes are excluded). The measure of proximity is the Euclidean distance. The combining algorithm is the Ward method. Clusters: 1 – stable lakes, 2 – medium-stable, 3 – unstable

Третью группу формируют озера с большой площадью и объемом (Нарочь, Дривяты, Лукомское, Освейское, Выгонощанское и др.), а также небольшие озера с интенсивным внешним водообменом (Синьша, Мнюта, Гомель). Это водоемы с наибольшей устойчивостью, которые в случае непродолжительного антропогенного воздействия быстро возвращаются к исходному трофическому состоянию. Сравнение результатов классификаций с использованием кластерного анализа и на основе рассчитанных значений индекса устойчивости в целом показало близкие результаты. Однако они по-разному интерпретируют некоторые особенности озер. Необходимо отметить, что устойчивость проточных озер отличается от устойчивости слабопроточных. В первом случае можно говорить о регенерационной устойчивости, характерной в большей степени для водотоков, во втором – об адаптационной, являющейся отличительной чертой водоемов. Так, согласно результатам расчета индекса устойчивости, некоторые слабоэвтрофные озера с большими водосборами и интенсивным водообменом оказались в группе неустойчивых (Синьша, Белое (Брестский район), Мнюта). При использовании кластерного анализа в качестве инструмента классификации данные водоемы относятся к устойчивым. Они являются проточными, поэтому загрязняющие вещества, попадающие в них с территории водосборов, выносятся и не аккумулируются в водной массе. Однако из-за небольшого объема воды в итоговой классификации они принадлежат к группе среднеустойчивых.

Отдельные водоемы с большими водосборами, обуславливающими поступление значительного количества растворенных веществ, отнесенные при кластерном анализе к устойчивым, являются среднеустойчивыми, так как небольшие площади и объемы воды не способствуют быстрому разложению значительных объемов биогенных веществ, поступающих с водосборов. Примерами таких озер могут служить Большая Осмота, Оболе, Споровское и др. Их регенерационная устойчивость ниже за счет высокого содержания биогенных элементов. Из этого следует, что как кластерный анализ, так и расчет индексов устойчивости, имеют свои достоинства и недостатки, но их совместное использование позволяет устранить разночтения в определении критериев устойчивости озер к эвтрофированию. В пространственном распределении озер по устойчивости к эвтрофированию можно выделить следующие особенности. Максимальную устойчивость имеет озеро Нарочь, расположенное на северо-западе Беларуси. Здесь же находятся другие водоемы с высокой устойчивостью: Дривяты, Снуды, Струсто. Однако в Поозерье представлены водоемы с различным уровнем устойчивости, в том числе с минимальными (около 0,15 для озера Болдук) и максимальными расчетными значениями.

Устойчивость озер с различным трофическим статусом также неодинакова. Наибольшей вариативностью устойчивости к эвтрофированию обладают мезотрофные озера. В этой группе находятся озера как с самым высоким (0,86), так и с самым низким индексом устойчивости (0,15). Однако в среднем устойчивость мезотрофных озер ниже, чем эвтрофных и дистрофных, о чем свидетельствует рис. 4. Устойчивость эвтрофных водоемов меняется значительно меньше – от 0,34 у озера Синьша до 0,67 у озера Белого, являющегося водоемом-охладителем Березовской ГРЭС. Самым узким диапазоном изменения устойчивости (от 0,37 у озера Ельня до 0,6 у озера Судoble) характеризуются дистрофные озера. Озера с экстремальными значениями индексов устойчивости принадлежат к разным подтипам. Ельня является остаточным озером на месте Полоцкого приледникового водоема. В цикле его развития не было эвтрофной стадии. Озеро Судoble находится южнее границы поозерского оледенения, а его формирование протекало в перигляциальных условиях.



**Рис. 4. Диапазон изменчивости индексов устойчивости к эвтрофированию в озерах с различным трофическим статусом**

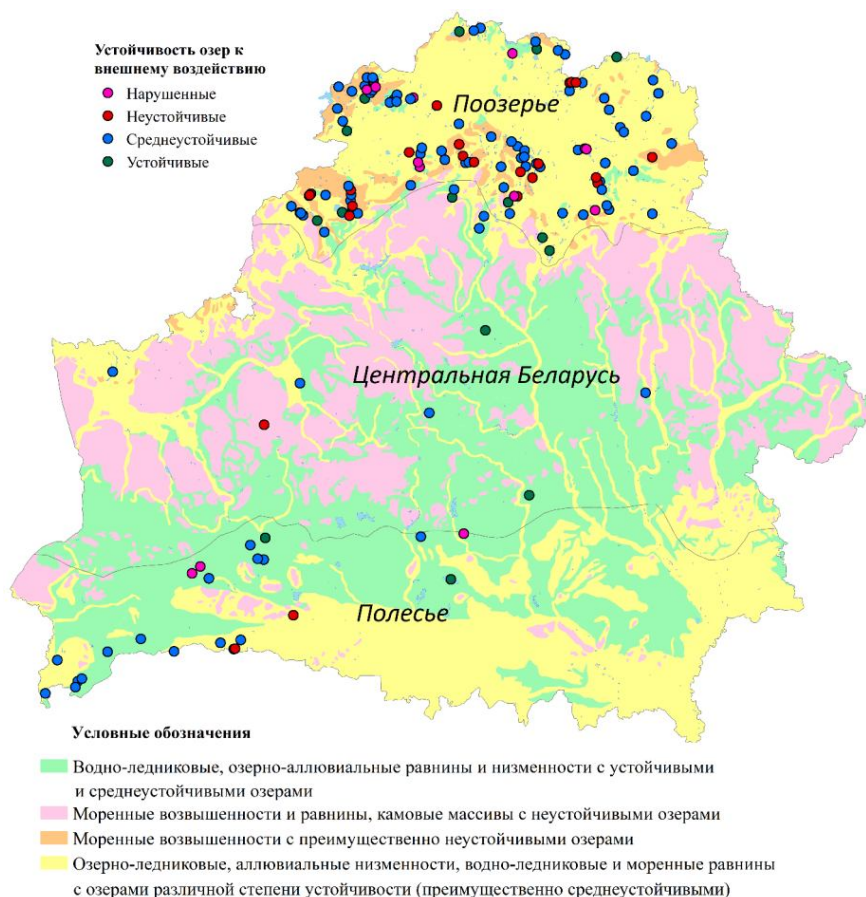
**Fig. 4. The range of variability of the indices of resistance to eutrophication in lakes with different trophic status**



При сравнении озер Поозерья и Полесья было выявлено, что последние при схожих морфометрических параметрах котловины более устойчивы к антропогенной нагрузке за счет более высокого трофического статуса и содержания растворенных веществ.

На устойчивость водоемов к изменению параметров внешней среды сильное влияние оказывают размеры и ландшафтная структура водосборов. Расчлененный рельеф с большим количеством локальных водоразделов, характерный для краевых ледниковых возвышенностей и гряд, не способствует формированию больших водосборов. Следовательно, водообмен в таких водоемах, как правило, очень медленный. Поэтому основой для создания зонирования территории Беларуси по степени устойчивости озер к эвтрофированию стала геоморфологическая карта, помещенная в Национальный атлас Беларуси [23]. Всего были выделены четыре отдельные области: водно-ледниковые, озерно-аллювиальные равнины и низменности с устойчивыми и среднеустойчивыми озерами; моренные возвышенности и равнины, камовые массивы с неустойчивыми озерами; моренные возвышенности с преимущественно неустойчивыми озерами; озерно-ледниковые, аллювиальные низменности, водно-ледниковые и моренные равнины с озерами различной степени устойчивости (преимущественно среднеустойчивыми).

При исследовании распределения озер с различной степенью устойчивости в зависимости от генезиса и возраста рельефа было выявлено, что наименьшая устойчивость характерна для водоемов, расположенных в пределах моренных возвышенностей, моренных равнин сожского возраста и камовых массивов. Доля неустойчивых озер здесь достигает 100 %. Преимущественно среднеустойчивые озера находятся на аллювиальных, озерно-ледниковых низменностях, а также водно-ледниковых и донно-моренных равнинах поозерского возраста. В пределах этих территорий присутствуют водоемы с различной степенью устойчивости, однако доля среднеустойчивых меняется от 50,0 до 87,5 %. Наиболее устойчивыми являются озера, расположенные на водно-ледниковых равнинах сожского возраста и озерно-аллювиальных низменностях. Пространственные закономерности распределения озер по степени устойчивости к эвтрофированию отражает рис. 5. В ходе анализа



**Рис. 5. Распределение озер с различной степенью устойчивости к эвтрофированию в соответствии с типом рельефа**

**Fig. 5. The distribution of lakes with varying degrees of resistance to eutrophication in accordance with the type of relief**

распределения озер с различной степенью устойчивости к эвтрофированию по территории физико-географических провинций были выявлены следующие закономерности. В пределах Поозерской провинции преобладают неустойчивые и среднеустойчивые водоемы. Самые большие озера (Освейское, Нарочь, Езерище, Снуды и др.) относятся к устойчивым с расчетными значениями индексов, равными 0,547–0,857, однако их доля невысока. На озерно-ледниковых низменностях она достигает 18,5 %, на конечно-моренных возвышенностях – 6,3 %. Доля неустойчивых озер, наоборот, повышается вместе с ростом гипсометрического уровня и на камовых массивах достигает 66,7 %. В пределах моренных возвышенностей она несколько ниже, но именно здесь озера наиболее разнообразны как по генезису и морфометрическим особенностям, так и по гидрохимическим характеристикам, что обеспечивает широкий диапазон колебания устойчивости водоемов к повышению трофического уровня. Минимальная доля неустойчивых озер (10,7 %) в Поозерье характерна для водно-ледниковых равнин.

В Западно- и Восточнобелорусской провинциях устойчивые озера отсутствуют, так как немногочисленные существующие здесь водоемы небольшие по площади и объему водной массы. На равнинах здесь преобладают среднеустойчивые водоемы, на возвышенностях – неустойчивые (Свитязь). Однако общее количество озер здесь небольшое, поэтому детальный анализ пространственной динамики устойчивости озер затруднителен. Озера водно-ледниковых равнин и низменностей Предполья относятся к классу устойчивых (Судoble с индексом устойчивости 0,599 и Дикое с индексом, равным 0,585) и среднеустойчивых (Глухи, Сергеевичское). Этому способствуют мелководность озер и значительные по площади водосборы, создающие условия для интенсивного вертикального и горизонтального водообмена, благодаря чему происходит равномерное распределение эвтрофирующих веществ по всей водной массе и их последующее окисление.

На Полесье встречаются озера всех классов устойчивости при преобладании среднеустойчивых. Значительные различия в высотном положении и вертикальном расчленении водосборов озер здесь отсутствуют, поэтому важная роль в формировании сопротивляемости озер к воздействию внешних факторов принадлежит морфометрии и гидрохимическим особенностям. К классу неустойчивых водоемов относятся озера Безуменник и Белое в Ивановском районе, а также Городищенское в Пинском (находятся они на аллювиальных низменностях), к классу устойчивых – значительные по площади озера-разливы Выгонощанское и Червоное, расположенные на озерно-аллювиальных низменностях. Все остальные озера, приуроченные к водно-ледниковым, аллювиальным и озерно-аллювиальным низменностям и равнинам, являются среднеустойчивыми.

**Заключение.** Сравнение результатов классификаций с использованием кластерного анализа и на основе рассчитанных значений индекса устойчивости в целом показало близкие результаты. Однако, они по-разному интерпретируют особенности водообмена и химического состава воды озер, а также их адаптационную и регенерационную устойчивость.

Так, некоторые слабовозрожденные озера с большими водосборами и интенсивным водообменом (Белое (Брестский район), Мнюта), согласно результатам расчета индекса устойчивости, оказались в группе неустойчивых, а при использовании кластерного анализа в качестве инструмента классификации были отнесены к группе устойчивых. Отличительной особенностью этих проточных водоемов является то, что загрязняющие вещества, попадающие в них с территории водосборов, выносятся и не аккумулируются в водной массе. В результате их устойчивость является не адаптационной, как у большинства озер, а регенерационной, характерной для водотоков. Так как объем воды в них небольшой, согласно итоговой классификации такие озера будут относиться к группе среднеустойчивых.

Другая группа озер с малым периодом водообмена и высоким содержанием растворенных веществ (Большая Осмота, Споровское и др.) по результатам расчета индекса устойчивости отнесены к среднеустойчивым, по результатам кластерного анализа – к устойчивым. За счет большой концентрации биогенных элементов и компонентов минерализации их способность к регенерации ниже, чем у озера Синьша. Сопоставление результатов классифицирования позволило отнести эти озера к среднеустойчивым. Из этого следует, что оба метода имеют свои достоинства и недостатки, но их совместное использование позволяет устранить существующие неточности в определении устойчивости озер к эвтрофированию.

В пространственном распределении озер с различной устойчивостью к эвтрофированию выявлена зависимость величины интегрального индекса устойчивости от морфологии и типа рельефа, в котором расположен водоем. Именно эти показатели обуславливают физико-географические особенности водосборов и морфологию котловин. На равнинах и низменностях различных генетических типов преобладают мелководные озера со значительными по площади водосборами, поэтому они обладают высокой скоростью водообмена, а вертикальная стратификация водных масс в них не выражена. Водоемы, расположенные в пределах ледниковых возвышенностей, имеют укрытые котловины и небольшие по площади водосборы. Следовательно, перемешивание водной массы и внешний водообмен в них происходят медленно, а процесс антропогенного эвтрофирования протекает более интенсивно.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании развития озер под влиянием естественных природных процессов и антропогенного фактора, управлении озерными экосистемами, их рекультивации, для природоохранных и рекреационных целей, а также в образовательном процессе в области гидрологии суши, лимнологии, гидроэкологии.

#### Список использованных источников

1. Scheffer, M. Alternative Attractors of Shallow Lakes / M. Scheffer // *The Scientific World*. – 2001. – № 1. – Pp. 254–263.
2. Scheffer, M. Alternative equilibria in shallow lakes / M. Scheffer [et al.] // *Trends in Ecology and Evolution*. – 1993. – Vol. 8, Issue 8. – Pp. 275–279.
3. Jeppesen, E. The ecology of shallow lakes – trophic interactions on the pelagial / E. Jeppesen. – Silkeborg : National Environmental Research Institute, 1998. – 420 p.
4. Scheffer, M. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation / M. Scheffer, S. Carpenter // *Trends in Ecology and Evolution*. – 2003. – Vol. 18, № 12. – Pp. 15 – 22.
5. Михайлов, В. Н. Оценка устойчивости и уязвимости водных экосистем с позиций гидроэкологии / В. Н. Михайлов, К. К. Эдельштейн // *Вестник Московского университета. Сер. 5 : География*. – 1996. – № 3. – С. 27–35.
6. Даценко, Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты / Ю. С. Даценко. – М. : ГЕОС, 2007. – 252 с.
7. Дмитриев, В. В. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем / В. В. Дмитриев, А. Н. Огурцов // *Вестник Санкт-Петербургского университета*, 2012. – Сер. 7, вып. 3. – С. 65–78.
8. Дмитриев, В. В. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем / В. В. Дмитриев, А. Н. Огурцов // *Вестник Санкт-Петербургского университета*, 2013. – Сер. 7, вып. 3. – С. 88–103.
9. Дмитриев, В. В. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Ч. IV : Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем / В. В. Дмитриев, И. В. Федорова, А. С. Бирюкова // *Вестник СПбГУ*, 2016. – Сер. 7, вып. 2. – С. 37–53.
10. Примак, Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / Е. А. Примак. – СПб., 2009. – 24 с.
11. Якушко, О. Ф. Белорусское Поозерье / О. Ф. Якушко. – Минск, 1971. – 334 с.
12. Якушко, О. Ф. Проблемы экологической устойчивости ледниковых ложбинных озер Белорусского Поозерья / О. Ф. Якушко, А. А. Новик // *Вестник БГУ*, Сер. 2. – 2005. – № 1. – С. 55–59.
13. Власов, Б. П. Антропогенная трансформация озер Беларуси: геоэкологическое состояние, изменения и прогноз / Б. П. Власов. – Минск : БГУ, 2004. – 207 с.
14. Гурьянова Л. В. Оценка гидродинамических факторов малых эвтрофных озер Белоруссии / Л. В. Гурьянова, Г. М. Базыленко // *Вестник БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. – 1985. – № 2. – С. 60–64.
15. Гурьянова, Л. В. Гидродинамическая оценка устойчивости водных экосистем малых озер к эвтрофированию / Л. В. Гурьянова, Г. М. Базыленко // *Вестник БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. – 1986. – № 3. – С. 73–76.
16. 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.
17. Власов, Б. П. Озера Беларуси : справочник / Б. П. Власов [и др.]. – Минск : РУП «Минсктиппроект», 2004. – 284 с.
18. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод. – Минск, 1978–2016. – Т. 3.
19. Ежегодник качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям на территории Республики Беларусь. – Минск, 1983–2015.
20. Хованов, Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците / Н. В. Хованов. – СПб. : Издательство Санкт-Петербургского университета, 1996. – 196 с.
21. Теоретические вопросы классификации озер / Н. П. Смирнова [и др.] – СПб. : Наука, 1993. – 192 с.
22. Логинова, Е. В. Гидроэкология : курс лекций / Е. В. Логинова, П. С. Лопух. – Минск : БГУ, 2011. – 300 с.
23. Нацыянальны атлас Беларусі / рэдкал.: М. У. Мясніковіч [і інш.]. – Мінск : Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь, 2002. – 299 с.

#### References

1. Scheffer M. Alternative Attractors of Shallow Lakes. *The Scientific World*. 2001. no 1, pp. 254–263.
2. Scheffer M., Hopper S. H., Meijer M.-L., Moss B. and Jeppesen E. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution*. 1993. Vol. 8, Iss. 8, pp. 275–279.

3. Jeppesen E. The ecology of shallow lakes – trophic interactions on the pelagial. Silkeborg: National Environmental Research Institute, 1998. 420 p.
4. Scheffer M., Carpenter S. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*. 2003. Vol. 18, no 12, pp. 15–22.
5. Mikhaylov V. N., *Otsenka ustoychivosti i uyazvimosti vodnykh ekosistem s pozitsiy gidroekologii* [Assessment of the sustainability and vulnerability of aquatic ecosystems from the standpoint of hydroecology]. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of Moscow University*, 1996. no 3, pp. 27–35 (in Russian).
6. Datsenko Yu. S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty* [Eutrophication of water reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, GEOS Publ., 2007. 252 p. (in Russian).
7. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. *Podkhody k integralnoy otsenke i GIS-kartografirovaniyu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchiya geosistem I Integralnaya otsenka ustoychivosti nazemnykh i vodnykh geosistem* [Approaches to integrated assessment and GIS mapping of sustainability and ecological well-being of geosystems. I. Integral assessment of the resistance of terrestrial and aquatic geosystems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta = Bulletin of St. Petersburg University*, 2012, vol. 7, iss 3, pp. 65–78 (in Russian).
8. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. *Podkhody k integralnoy otsenke i GIS-kartografirovaniyu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchiya geosistem II Metody integralnoy otsenki ustoychivosti nazemnykh i vodnykh geosistem* [Approaches to integrated assessment and GIS mapping of sustainability and ecological well-being of geosystems. II. Methods of integral assessment of the resistance of terrestrial and aquatic geosystems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta = Bulletin of St. Petersburg University*, 2013, v l. 7, iss. 3, pp. 88–103 (in Russian).
9. Dmitriev V. V., Fedorova I. V., Birukova A. S. *Podkhody k integralnoy otsenke i GIS-kartografirovaniyu ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchiya geosistem IV Integralnaya otsenka ekologicheskogo blagopoluchiya nazemnykh i vodnykh geosistem* [Approaches to integrated assessment and GIS mapping of sustainability and ecological well-being of geosystems. Part IV. Integral assessment of the ecological well-being of terrestrial and aquatic geosystems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta = Bulletin of St. Petersburg University*. 2016, vol. 7, iss. 2. pp. 37–53 (in Russian).
10. Primak Ye. A. *Integralnaya otsenka ustoychivosti i ekologicheskogo blagopoluchiya vodnykh obyektov* [Integral assessment of the sustainability and environmental well-being of water bodies. Cand. geogr. sci. Abstr]. Saint Petersburg, 2009. 24 p. (in Russian).
11. Yakuchko O. F. *Belorusskoe Poozerie* [Belarusian Poozerie]. Minsk, 1971. 334 p. (in Russian).
12. Yakuchko O.F., Novik A. A. *Problemy ekologicheskoy ustoychivosti lednikovyykh lozhbinnykh ozer Belorusskogo Poozerya* [Problems of ecological sustainability of glacial hollow lakes of the Belarusian Poozerie]. *Bulletin of the BSU*, Vol. 2, no 1. 2005, pp. 55–59 (in Russian).
13. Vlasov B.P. *Antropogennaya transformatsiya ozer Belarusi: geoekologicheskoye sostoyaniye, izmeneniya i prognoz* [Anthropogenic transformation of the lakes of Belarus: geoecological status, changes and forecast]. Minsk, BSU Publ., 2004. 207 p. (in Russian).
14. Guryanova L. V., Bazylenko G. M. *Otsenka gidrodinamicheskikh faktorov malykh evtrofnykh ozer Belorussii* [Evaluation of the hydrodynamic factors of small eutrophic lakes in Belarus]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*. Iss. 2 Chemistry. Geography. 1985. no 2, pp. 60–64 (in Russian).
15. Guryanova L. V., Bazylenko G. M. *Gidrodinamicheskaya otsenka ustoychivosti vodnykh ekosistem malykh ozer k evtrofirovaniyu* [Hydrodynamic assessment of the resistance of aquatic ecosystems of small lakes to eutrophication]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*. Iss.2 Chemistry. Biology. Geography. 1986. no 3, pp. 73–76 (in Russian).
16. Sukhovilo N. Y., Vlasov B. P., Novik A. A. *Dinamicheskiye kriterii otsenki ustoychivosti ozernyykh ekosistem Belorusskogo Poozerya k vneshnemu vozdeystviyu* [Dynamic criteria for evaluation of the resistance of lake ecosystems of Belarusian Poozerie to external impact]. *Jurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2018. no 2, pp. 13–24 (in Russian).
17. Vlasov B. P. [et al.] *Ozyora Belarusi: spravochnik* [Lakes of Belarus: handbook]. Minsk, RUE “Minsktipproekt” Publ., 2004. 284 p. (in Russian).
18. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Yezhegodnyye dannyye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod* [State Water Cadastre. Annual data on surface water regime and resources]. Minsk, 1978–2018, vol. 3 (in Russian).
19. *Yezhegodnik kachestva poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam na territorii Respubliki Belarus* [Surface Water Quality Yearbook on hydrochemical indicators in the territory of the Republic of Belarus]. Minsk, 1983–2018 (in Russian).
20. Hovanov N.V. *Analiz i sintez pokazateley pri informatsionnom defitsite* [Analysis and synthesis of indicators in conditions of information deficit]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg University Publ., 1996. 196 p. (in Russian).
21. Smirnova N. P. [et al.]. *Teoreticheskiye voprosy klassifikatsii ozer* [Theoretical questions of the classification of lakes]. Saint-Petersburg, Science Publ., 1993. 192 p. (in Russian).
22. Loginova E. V., Lopukh P. S. *Hydroecology: a course of lectures*. Minsk, BSU Publ., 2011. 300 p. (in Russian).
23. *Nacyjanalny Atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. Ed. M. Myasnikovich [et al.]. Minsk, Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus Publ., 2002. 299 p. (in Belarusian).

**Информация об авторах**

*Нина Юрьевна Суховило* – мл. науч. сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by.

*Алексей Александрович Новик* – канд. геогр. наук, доцент, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: novikA@bsu.by

**Information about the authors**

*Nina Yu. Sukhovilo* – Junior Researcher, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

*Aliaksei A. Novik* – Ph.D (Geography), Associate Professor, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: novikA@bsu.by

---