

ДИНАМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ К ВНЕШНЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Н. Ю. СУХОВИЛО¹⁾, Б. П. ВЛАСОВ¹⁾, А. А. НОВИК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Изложены результаты исследования влияния внешнего и внутреннего водообмена на устойчивость озер к внешнему воздействию. Объектами исследования послужили 24 разнотипных водоема Белорусского Поозерья, различающихся происхождением, морфометрическими показателями, температурным режимом и степенью использования в хозяйственной деятельности. Расчет показателей перемешивания и стратификации осуществлялся с помощью *online*-модели *Lake Analyzer*. Выявление закономерностей изменения изучаемых характеристик производилось на основе методов математической статистики. В ходе исследования такие закономерности установлены для гидро- и термодинамических показателей в зависимости от морфометрии котловин и метеоусловий, рассмотрены особенности их влияния на устойчивость озер к внешней нагрузке. Анализ взаимосвязей комплекса зональных и азональных, внешних и внутренних факторов и их количественная оценка позволили выделить три группы водоемов по устойчивости к антропогенному воздействию: устойчивые, среднеустойчивые и неустойчивые. Полученные результаты могут использоваться для управления водными экосистемами и определения допустимой нагрузки на них.

Ключевые слова: озеро; ветровая работа; термическая устойчивость; устойчивость к внешнему воздействию; водообмен.

DYNAMIC CRITERIA FOR EVALUATION OF THE RESISTANCE OF LAKE ECOSYSTEMS OF BELARUSIAN POOZERIE TO EXTERNAL IMPACT

N. Y. SUKHOVILO^a, B. P. VLASOV^a, A. A. NOVIK^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: B. P. Vlasov (vlasov_@tut.by)

The article describes the results of the investigation of influence of external and internal water exchange on the stability of lakes to external impact. The objects of the study are 24 reservoirs of the Belarusian Poozerie, differing in origin, morphometric parameters, temperature regime and degree of economic using. The calculation of the mixing and

Образец цитирования:

Суховило НЮ, Власов БП, Новик АА. Динамические критерии оценки устойчивости озерных экосистем Белорусского Поозерья к внешнему воздействию. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2018; 2:13–24.

For citation:

Sukhovilo NY, Vlasov BP, Novik AA. Dynamic criteria for evaluation of the resistance of lake ecosystems of Belarusian Poozerie to external impact. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2018;2:13–24. Russian.

Авторы:

Нина Юрьевна Суховило – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории озераведения географического факультета.

Борис Павлович Власов – доктор географических наук, профессор; заведующий научно-исследовательской лабораторией озераведения географического факультета.

Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии географического факультета.

Authors:

Nina Y. Sukhovilo, junior researcher at the laboratory of lake research, faculty of geography.

nina_s3894@mail.ru

Boris P. Vlasov, doctor of science (geography), full professor; head of the laboratory of lake research, faculty of geography.

vlasov_@tut.by

Aliaksei A. Novik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of earth science and hydrometeorology, faculty of geography.

novikA@bsu.by

stratification was carried out using the *online* model *Lake Analyzer*. The determination of the regularities of changes in the characteristics studied was based on methods of mathematical statistics. In the course of the study, regularities for the changes in hydro- and thermodynamic parameters were established, depending on the morphometry of their basins and weather conditions, and the features of their influence on the stability of lakes to the external load were considered. The analysis of the interconnections of the complex zonal and azonal, external and internal factors and their quantitative assessment made it possible to distinguish three groups of reservoirs in terms of their resistance to anthropogenic effects: stable, medium-stable and unstable. The results obtained can be used to manage water ecosystems and determine the permissible load on them.

Key words: lake; wind work; thermal stability; resistance to external impact; water exchange.

Введение

Скорость водообмена и характер перемешивания водной массы являются факторами, которые в наибольшей мере влияют на гидрохимические и гидробиологические процессы. В условиях антропогенного воздействия меняются все компоненты лимносистем, поэтому установление пределов допустимой нагрузки на них невозможно без всестороннего анализа гидро- и термодинамических показателей.

Начало изучению термодинамического перемешивания было положено Ф. Форелем в XIX в. Дальнейшее развитие представлений о формировании термической структуры водоемов и ее влиянии на внутриводоемные процессы связано с именами Э. А. Берджа, В. Шмидта, Э. Горхама, Дж. Имбергера и др. [1–7]. Исследованию термической и экологической устойчивости озер Беларуси посвящены работы О. Ф. Якушко, Л. В. Гурьяновой, Б. П. Власова и др. В большинстве случаев при ее оценке использовались отдельные характеристики, в том числе температурная стратификация. В то же время необходим учет всего комплекса показателей во главе с динамикой водной массы как связующим звеном между морфометрией, гидрохимическими процессами и биологической продуктивностью.

Цель данного исследования – оценка устойчивости озер Белорусского Поозерья к внешнему воздействию по динамическим критериям.

Общая характеристика и местоположение объектов исследования

Исследуемые озера расположены в бассейне Западной Двины. Площади их водосборов, оказывающие непосредственное влияние на водообмен, изменяются от 3 км² у оз. Болойсо до 1279,6 км² у оз. Лепельского. Котловины водоемов относятся к подпрудному (Богинское, Лукомское, Дривяты), ложбинному (Долгое, Сарро), эвразийному (Болойсо), сложному (Мядель, Отолово, Гомель) и остаточному (Россоно, Добеевское) типам. Из-за различий в происхождении и строении котловин водоемы обладают различными морфометрическими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Морфометрические характеристики исследованных озер [8]

Table 1

Morphometric characteristics of studied lakes [8]

Озеро	Объем, млн м ³	Площадь, км ²	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Период водообмена, лет
Богинское	64,42	13,2	15	4,7	0,35
Болойсо	7,29	1,4	15,6	5,3	11,74
Волосо Южный	15,07	1,2	40,4	12,5	12,25
Гомель	19,01	3,5	23	5,5	0,12
Девинское	9,73	2	9,6	4,9	1,76
Добеевское	1,65	2,3	3,6	0,7	0,24
Долгое	43,17	2,6	53,6	16,6	7,01
Дривяты	223,52	36,1	12	6,1	2,58
Езерище	66,95	15,4	11,5	4,4	1,24
Лепельское	74,67	10,2	33,7	7,3	0,14
Лосвида	82	11,4	20,2	7,2	3,73

Окончание табл. 1
Ending table 1

Озеро	Объем, млн м ³	Площадь, км ²	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Период водообмена, лет
Лукомское	249	37,7	11,5	6,6	6,62
Лядно	4,35	0,6	22	7,5	1,49
Миорское	5,24	1,2	13,2	4,5	1,64
Мядель	102	16,2	24,6	6,3	4,86
Нещердо	84,72	24,6	8,1	3,4	2,5
Обстерно	50	9,9	12	5,1	2,06
Освейское	104	52,8	7,5	2	2,13
Отолово	27,86	8,2	16,4	3,5	0,43
Потех	4,52	1,4	9,1	3,4	0,71
Ричи	131,5	12,8	51,9	10,2	4,52
Россоно	4,93	2,4	3,3	2,1	0,7
Савонар	1,41	0,5	3,8	1,9	0,01
Сарро	60,76	5,3	36,3	11,4	2,84

В гидрологическом режиме озер существуют некоторые различия. По условиям водообмена они относятся к слабопроточным, оз. Лукомское после сооружения плотины на р. Лукомке стало бессточным. Водообмен в нем осуществляется путем забора воды на охлаждение агрегатов Лукомльской ГРЭС с последующим возвратом подогретых вод в озеро.

Термический режим озер и водохранилищ в наибольшей степени зависит от географического положения и морфометрии котловин. Расположение в умеренном климатическом поясе определяет особенности годового хода температуры воды и ледового режима. В зимний период, когда водоемы покрыты льдом, наблюдается обратная температурная стратификация, летом же прямая стратификация прослеживается только в глубоких озерах с достаточно укрытыми котловинами, что не способствует интенсивному ветровому перемешиванию.

Химический состав вод сформировался под воздействием климатических условий, главным из которых является преобладание осадков над испарением, а также пород, слагающих водосбор. По гидрохимической классификации все изучаемые водоемы относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Минерализация воды колеблется от 136 до 280 мг/дм³ и более. При этом максимальные показатели характерны для водоемов, расположенных вблизи городов и промышленных предприятий (Лепельское, Болойсо). Распределение кислорода в водной толще определяется особенностями динамических процессов и биологической продуктивностью. В мелководных высокоэвтрофных, а также в глубоких мезотрофных с признаками олиготрофии озерах может наблюдаться дефицит кислорода. Гидрохимические и гидробиологические характеристики изученных озер представлены в табл. 2.

Таблица 2

Гидрохимические и гидробиологические характеристики озер [8]

Table 2

Hydrochemical and hydrobiological characteristics of lakes [8]

Озеро	Прозрачность, м	Общая минерализация, мг/дм ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	Биомасса фитопланктона, мг/дм ³	Трофический статус
Богинское	3	204,9	0,04	13,78	Эвтрофное
Болойсо	3,6	195,8	0,08	4,5	Эвтрофное
Волосо Южный	5,8	186,3	0,015	1	Мезотрофное с признаками олиготрофии
Гомель	3	220	–	2,57	Эвтрофное
Девинское	2	217,1	0,008	2,73	Эвтрофное
Добеевское	3,6	139,8	0,085	0,58	Эвтрофное

Окончание табл. 2
Ending table 2

Озеро	Прозрачность, м	Общая минерализация, мг/дм ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	Биомасса фитопланктона, мг/дм ³	Трофический статус
Долгое	4	220,4	0,004	0,56	Мезотрофное с признаками олиготрофии
Дривяты	2,5	187,5	0,021	4,8	Эвтрофное
Езерище	1,4	163,3	0,186	25,18	Эвтрофное
Лепельское	2	280,3	0,056	0,98	Мезотрофное
Лосвида	3,6	173,1	0,187	0,72	Мезотрофное
Лукомское	2,5	213,3	0,006	1,97	Эвтрофное
Лядно	1,1	278,8	0,29	1,48	Эвтрофное
Миорское	1,5	185,9	0,058	3,84	Эвтрофное
Мядель	3	240,8	0,012	1,83	Мезотрофное
Нещердо	2	255,4	0,006	4,36	Эвтрофное
Обстерно	2,75	152	0,025	30,6	Эвтрофное
Освейское	2,5	153,9	0,036	6,82	Эвтрофное
Оголово	2	234	0,002	27,57	Эвтрофное
Потех	1,8	234,9	0,057	13,2	Эвтрофное
Ричи	5,3	136,8	0,005	0,43	Мезотрофное с признаками олиготрофии
Росоно	0,8	187,6	0,014	13,59	Эвтрофное
Савонар	1,5	225,3	0,222	7,38	Эвтрофное
Сарро	3,9	250,1	0,002	0,24	Мезотрофное с признаками олиготрофии

Особенности распространения макрофитов и их состав обусловлены морфометрией котловин. Мелководные озера (Добеевское, Россоно) зарастают по всей акватории, в то время как глубокие ложбинные водоемы (Сарро, Долгое) зарастают незначительно и только в прибрежной части. Качественный и количественный состав макрофитов тесно связан с общими экологическими условиями водоемов, формой их котловин, химической структурой воды, характером донных отложений и др. Занимая прибрежную зону, именно макрофиты принимают на себя и усваивают основные сбросы биогенных веществ с водосбора. В этом смысле прибрежные водные растения в определенной степени регулируют расход питательных элементов и проникновение их в пелагическую зону озера. Глубина распространения высших водных растений зависит прежде всего от прозрачности водоемов.

Биомасса фитопланктона изменяется от 0,1–1,2 мг/дм³ в мезотрофных озерах до 8–15 мг/дм³ и более в высокоэвтрофных. При этом преобладающей группой являются диатомовые (в периоды цветения – синезеленые) водоросли.

Донные отложения есть результат взаимодействия всех внешних (геологических, геоморфологических, климатических, хозяйственной деятельности человека) и внутриводоемных (главным образом биотических) факторов. В эвтрофных водоемах сформировались мощные толщи органоминеральных отложений, оказывающих достаточно сильное воздействие на температурный режим водоемов в период ледостава. Зимой за счет выделения тепла при разложении органического вещества в озерах Освейском и Нещердо происходит разогревание придонных слоев до 5,5–5,8 °С – это выше температуры максимальной плотности, что сказывается на газовом режиме и гидробионтах.

Материалы и методы

Оценка устойчивости экосистем озер производилась с помощью анализа условий водообмена, термодинамических особенностей (термической устойчивости, числа Веддерберна, ветровой работы Берджа), морфометрических показателей и выявления их связи с гидрохимическими характеристиками. Информационной основой исследования послужили результаты проведенного НИЛ озераведения комплексного

обследования более 800 озер Беларуси. Из них выбраны 24 репрезентативных водоема Белорусского Поозерья, различающихся по происхождению, морфометрии, условиям проточности и антропогенного воздействия и находящихся на различных стадиях эволюции. Указанное обследование проводилось в период 1967–2015 гг. Источником данных метеорологических и гидрологических наблюдений стали фондовые материалы Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды [9].

Под воздействием всего комплекса описанных выше факторов в озерах создаются определенные динамические условия, которые в сочетании с другими компонентами лимносистемы формируют фон для протекания всех внутриводоемных процессов.

Основными показателями, используемыми при оценке энергии, затрачиваемой ветром на нагревание водной толщи водоема, являются термическая устойчивость и ветровая работа Берджа.

Для оценки количества работы, затрачиваемой ветром на перераспределение тепла в водной массе, использовано понятие ветровой работы, предложенное американским лимнологом Э. А. Берджем. Она рассчитывается по формуле

$$W_b = RT \cdot Z(1 - D_n),$$

где W_b – работа ветра по перераспределению тепла в воде, г-см/см²; RT – приведенная мощность слоя, см; Z – расстояние от поверхности воды до данного слоя, см; D_n – плотность воды при температуре n °С, г/см³ [10].

На скорость перемешивания также значительно влияет устойчивость водной массы. Термическая устойчивость озер определяется как работа, которую необходимо совершить для перевода озера в состояние гомотермии в адиабатических условиях. Для ее расчета используется формула

$$W_t = \frac{g}{A_0} \int_0^{z_m} z \rho_z A_z dz - z_v V \rho_{av},$$

где W_t – термическая устойчивость, Дж/м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_{av} – средняя плотность воды, кг/м³; z_v – глубина центра масс озера при постоянной плотности, м; z_m – максимальная глубина, м; ρ_z – плотность воды на глубине z , кг/м³; A_0 – общая площадь озера, м²; A_z – площадь озера под изобатой z м, м²; V – общий объем озера, м³ [11].

Главное различие этих двух параметров заключается в том, что в первом случае речь идет о работе по перемешиванию и разрушению стратификации, уже совершенной ветром, а во втором – о теоретическом ее количестве, необходимом для приведения озера или водохранилища в состояние гомотермии. Оба параметра имеют свои достоинства и недостатки. Так, ночное остывание и перемешивание верхних слоев воды (в том числе под действием ветра) сменяется дневным нагреванием и возвратом к первоначальному их состоянию. Работа против силы тяжести совершена, но при измерении температуры на следующий день результат оказывается очень близким к исходному. Поэтому без частого измерения температуры адекватная оценка количества ветровой работы затруднительна. Термическая устойчивость также не лишена недочетов, наиболее явным из которых является отсутствие в реальных условиях адиабатических процессов. Кроме этого, она не позволяет точно оценить ту часть ветровой энергии, которая будет использована для разрушения стратификации, поскольку не учитывает геометрические характеристики водоема. Для устранения таких недостатков используются другие термодинамические параметры, приведенные ниже.

Безразмерное число Веддерберна показывает баланс между ветровым воздействием и силой плавучести и рассчитывается по формуле

$$W = \frac{g' z_e^2}{u_*^2 L_s},$$

где W – число Веддерберна; $g' = g(\Delta\rho/\rho_h)$ – приведенное ускорение свободного падения (g) из-за изменения плотности ($\Delta\rho$) между гипolimнионом (ρ_h) и эпилимнионом (ρ_e), м/с²; z_e – глубина перемешиваемого слоя, м; u_* – сила трения из-за ветрового воздействия, Н; L_s – длина разгона волны, м [11]. Если число Веддерберна намного больше единицы, то ветровое воздействие играет решающую роль в перераспределении тепла в водной толще.

Для сопоставления динамических условий в озерах с различными морфометрией и периодом водообмена использовался показатель гидравлической нагрузки, определяемый как частное от деления средней глубины на удельную водообменность.

Показатели перемешивания и стратификации рассчитывались с помощью *online*-модели *Lake Analyzer* [12], созданной в Западно-Австралийском университете и представляющей собой программный код с поддержкой инструментов визуализации полученных результатов. Допустимая фосфорная нагрузка определялась по формуле Фолленвайдера.

Результаты и их обсуждение

На основании проведенных расчетов были выявлены закономерности изменения термодинамических показателей в зависимости от морфометрических параметров, метеорологических условий и водообмена.

Анализ зависимости термической устойчивости от температуры воздуха показал наличие средней по силе прямой связи между исследуемыми параметрами в июне – августе. В остальные месяцы она выражена слабее из-за большой теплоемкости воды [13]. Полученную закономерность на примере оз. Лукомского иллюстрирует рис. 1.

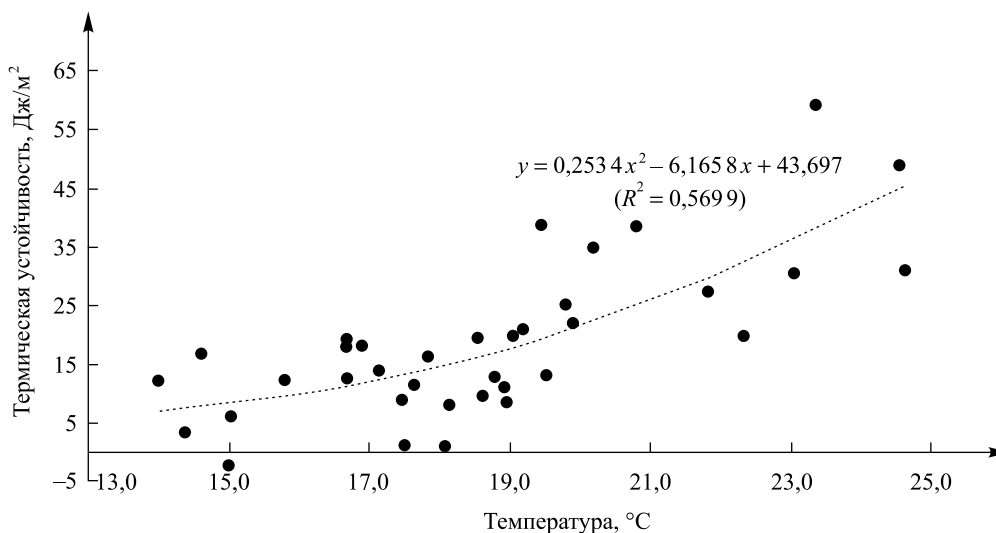


Рис. 1. Зависимость термической устойчивости оз. Лукомского на 1 августа от температуры воздуха 27–31 июля (1974–2015)

Fig. 1. The dependence of thermal stability of Lukomskoe Lake in August, 1st on air temperature in July 27–31 (1974–2015)

Прямая зависимость термической устойчивости от температуры воздуха может нарушаться под действием других метеорологических факторов, главным образом ветра. При возрастании его скорости термическая устойчивость падает, так как происходит перемешивание поверхностного слоя с более глубокими, холодными и оттого плотными водами и выравнивание температурного профиля. Кроме этого, для оз. Лукомского большую роль играет направление ветра. Если он дует с востока, теплые воды с водосброса Лукомльской ГРЭС распространяются по всей водной массе и термическая устойчивость повышается даже в районе рейдовой вертикали. Ветры западного направления, наоборот, способствуют аккумуляции подогретой воды у восточного берега, сохраняя естественный термический режим на большей части акватории. Анализ многолетней динамики показал наличие слабой тенденции к росту термической устойчивости в озерах с длительными рядами наблюдений, но это пока не повлекло значительных изменений в их вертикальной термической структуре и газовом режиме.

Для сравнения термодинамических условий разнотипных водоемов были установлены закономерности их изменения в озерах с различной морфометрией. На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости термической устойчивости и ветровой работы от средней глубины водоема. Как видно, эти зависимости носят нелинейный характер, а существующие отклонения обусловлены различиями морфометрии котловин и метеоусловий в период наблюдений за температурой воды. Так, в озерах со средней глубиной до 7,5 м термическая устойчивость изменяется слабо. Это означает, что прямая стратификация в них не формируется, а для того чтобы привести их в состояние гомотермии, не требуется большого количества энергии [14; 15]. Сильное отклонение для самого глубокого озера – Долгого – от полученной зависимости обусловлено тем, что температура воды в его поверхностных слоях составляла всего около 21 °C, а для распределения такого количества тепла по водной массе было затрачено меньше энергии, чем в случае с менее глубокими, но более теплыми озерами Ричи и Волосо Южный.

Следует отметить, что общая устойчивость озера к внешнему воздействию имеет прямую зависимость от показателя ветровой работы. Чем более равномерно распределено тепло, а следовательно, и плотность в водной массе, тем более сильное воздействие необходимо для выведения экосистемы из состояния равновесия.

Сопоставление факторов внешнего и внутреннего водообмена в озерах позволило установить связь между термической устойчивостью и периодом водообмена (см. рис. 4).

На графиках (см. рис. 4) отчетливо выделяются две группы озер с близким периодом водообмена и различной внутренней структурой водной массы. Верхняя линия тренда иллюстрирует взаимосвязь между двумя группами динамических факторов в глубоких стратифицированных озерах, нижняя – в мелководных, хорошо перемешиваемых. Иными словами, данное соотношение отражает влияние морфометрии как азонального фактора на внутриводоемные процессы. Она же во многом определяет баланс силы Архимеда и ветрового воздействия в перераспределении тепла по глубине, который показывает число Веддерберна. Последнее возрастает по мере увеличения глубины озер и уменьшения их открытости, но сильно зависит от метеоусловий, определяющих температуру воды. Поэтому для выявления закономерностей его изменения необходимы синхронные наблюдения на разнотипных озерах.

Допустимая величина воздействия на водоем во многом определяется показателем гидравлической нагрузки. Максимальные ее значения, достигающие $52 \text{ м}^3/\text{м}^2$, характерны для среднеглубоких озер с достаточно интенсивным внешним водообменом (Гомель, Лепельское, Богинское), что значительно повышает их способность поддерживать равновесие в экосистеме при усилении антропогенного давления. Наименьшим значением данного показателя характеризуется оз. Болойсо ($0,45 \text{ м}^3/\text{м}^2$), отличающееся значительным периодом водообмена. В результате в нем происходит аккумуляция загрязняющих веществ, поступающих из расположенного рядом г. Браслава, что приводит к антропогенному эвтрофированию [16].

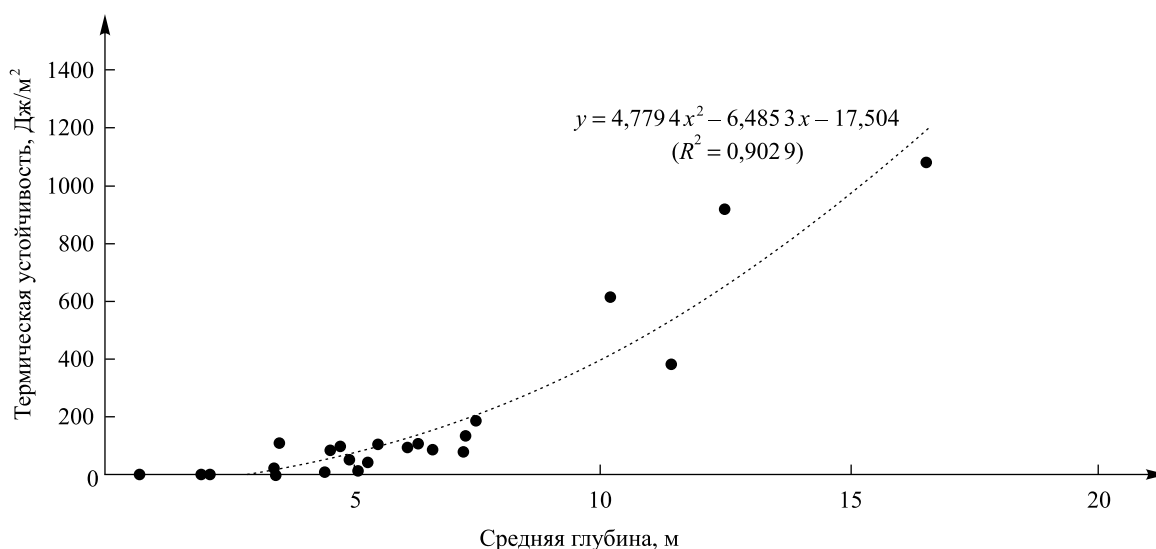


Рис. 2. Зависимость термической устойчивости от средней глубины озера

Fig. 2. The dependence of thermal stability on mean depth of the lake

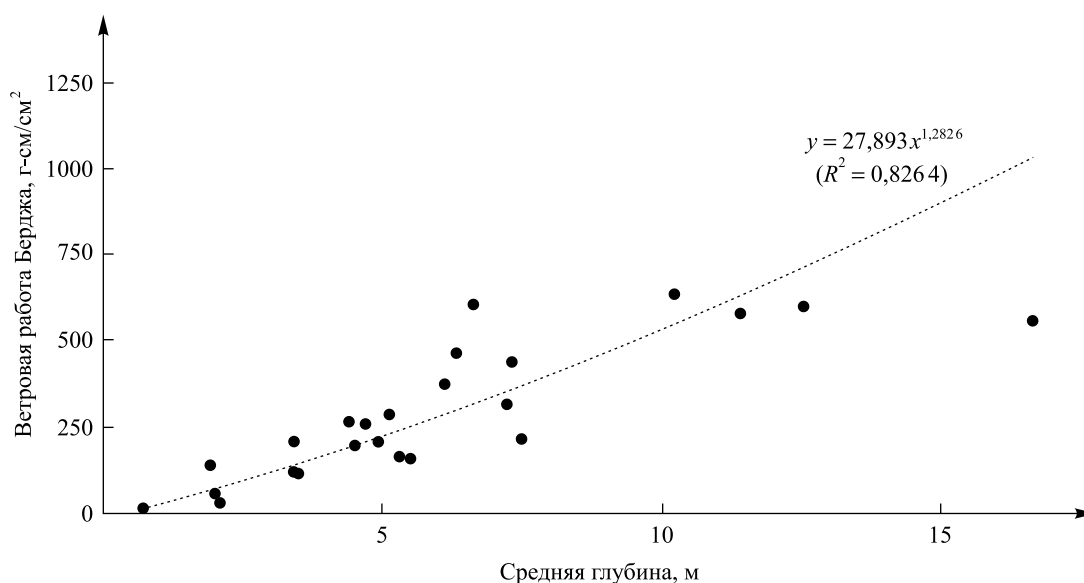


Рис. 3. Зависимость ветровой работы Берджа от средней глубины озера

Fig. 3. Relationship between Birgean work and mean depth of the lake

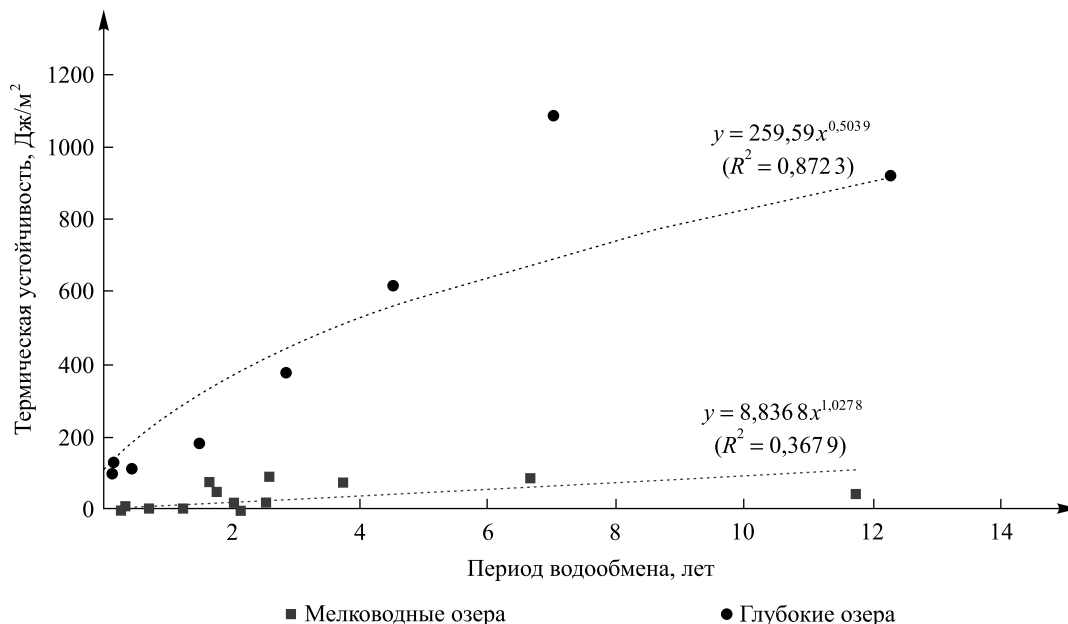


Рис. 4. Связь между термической устойчивостью и периодом водообмена
 Fig. 4. Connection between thermal stability and residence time of lake

Скорость эвтрофирования в наибольшей мере зависит от поступления соединений азота и фосфора с водосбора. Взаимосвязь между периодом водообмена и допустимой фосфорной нагрузкой иллюстрирует рис. 5.

Выявленная зависимость показывает, что с увеличением периода водообмена до двух лет резко сокращается допустимая фосфорная нагрузка на водоем. Ее зависимость от гидравлической нагрузки носит линейный характер с небольшими отклонениями, обусловленными морфометрией или высокой проточностью. Реальная фосфорная нагрузка существенно отличается от расчетной. Максимальные ее значения характерны для озер, расположенных на урбанизированных территориях или в непосредственной близости от них, а также для водоемов, водосборы которых активно используются в сельском хозяйстве. Например, для оз. Миорского она составляет 7,75 г/м² при допустимой 0,3 г/м². Наиболее уязвимы экосистемы тех озер, на водосборах которых расположены локальные источники загрязнения (животноводческие комплексы, промышленные предприятия), осуществляющие сброс в водоем неочищенных или недостаточно очищенных вод. Яркими примерами таких водоемов являются озера Миорское и Болойсо.

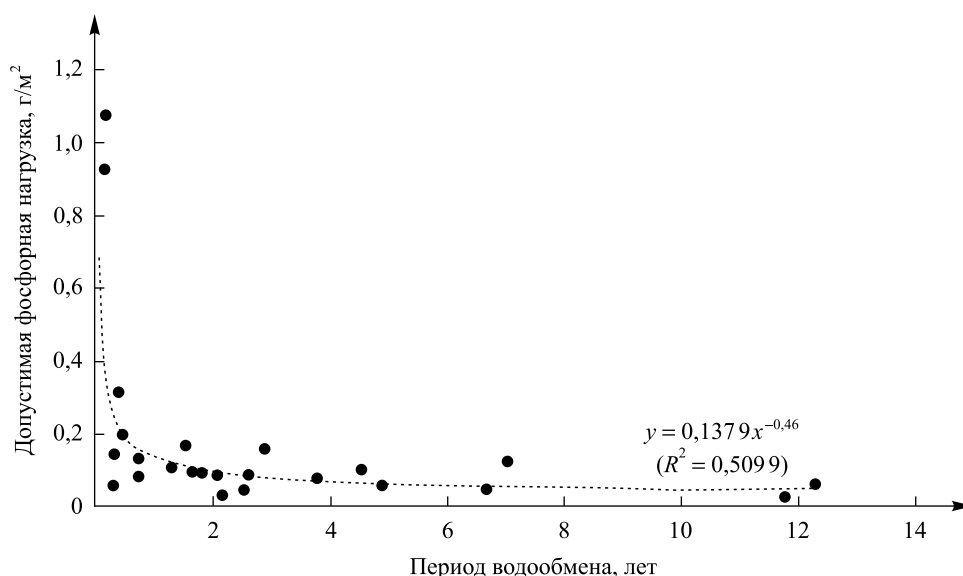
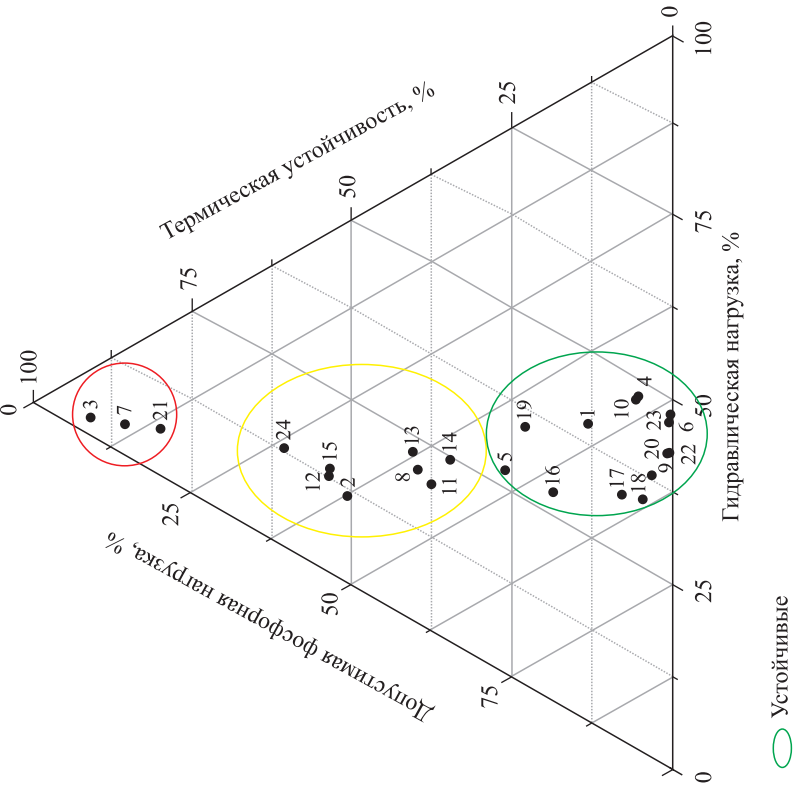


Рис. 5. Зависимость допустимой фосфорной нагрузки от периода водообмена озера
 Fig. 5. The dependence of permissible phosphorus load on the period of lake water exchange



- Озера:
- 1 – Богинское
 - 2 – Боллойсо
 - 3 – Волосо Южный
 - 4 – Гомель
 - 5 – Девинское
 - 6 – Добевское
 - 7 – Долгое
 - 8 – Дривяты
 - 9 – Езериче
 - 10 – Лепельское
 - 11 – Лосвида
 - 12 – Лукомское
 - 13 – Лядно
 - 14 – Минорское
 - 15 – Мядель
 - 16 – Нешердо
 - 17 – Обстерно
 - 18 – Освейское
 - 19 – Оголово
 - 20 – Потех
 - 21 – Ричи
 - 22 – Россоно
 - 23 – Савонар
 - 24 – Сарро

Устойчивые

Среднеустойчивые

Неустойчивые

Рис. 7. Группы озер по устойчивости к внешнему воздействию, выделенные по динамическим критериям

Fig. 7. Groups of lakes for resistance to external influences, distinguished by dynamic criteria

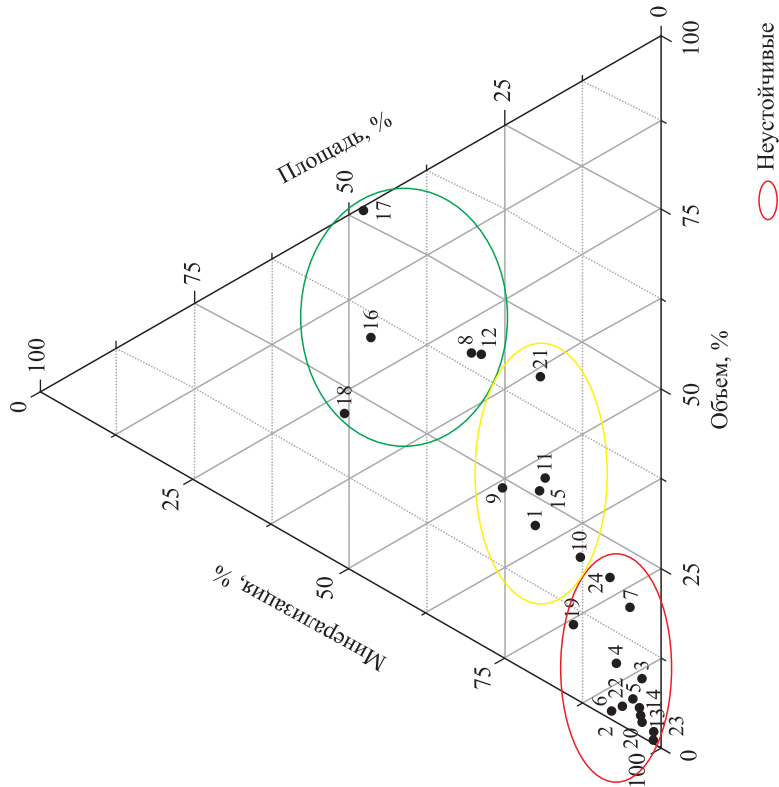


Рис. 6. Группы озер по устойчивости к внешнему воздействию, выделенные по статическим критериям

Fig. 6. Groups of lakes for resistance to external influences, distinguished by static criteria

На основании произведенных расчетов и сопоставления морфометрических, гидравлических, гидрохимических, термодинамических показателей, а также периода водообмена произведена группировка исследованных озер по степени устойчивости к внешнему воздействию. При этом определяющими статическими параметрами стали площадь и объем водоема, а также величина минерализации как результат воздействия природных и антропогенных факторов (рис. 6).

Оценка роли динамических критериев в формировании устойчивости исследованных озер к внешнему воздействию проводилась на основе сопоставления гидравлической нагрузки, допустимой фосфорной нагрузки и термической устойчивости (рис. 7). Использование комплекса этих показателей позволяет выявить особенности внешнего и внутреннего водообмена в отдельном водоеме.

Всего было выделено три группы озер: устойчивые, среднеустойчивые и неустойчивые. К группе устойчивых можно отнести слабопроточные неглубокие водоемы с объемом более 50 млн м³ и интенсивным внутренним водообменом (Дривяты, Лукомское, Освейское, Нещердо, Обстерно). Если рассматривать динамические критерии оценки устойчивости, к этой же группе будет отнесен ряд нестратифицированных озер с меньшей площадью и достаточно интенсивным водообменом (Езерище, Россоно, Богинское, Гомель).

Согласно группировке по статическим критериям к группе среднеустойчивых принадлежат озера с меньшей, чем у первой группы, площадью, но большей средней глубиной (Богинское, Езерище, Лосвида, Мядель). Их объем меняется от 64,4 до 131,5 млн м³. В них ярче выражена прямая температурная стратификация в летний период, а потому внутренний водообмен не затрагивает всю водную толщу. При наличии точечного источника загрязнения водоемы этой группы быстро переходят на более высокий трофический уровень. При учете динамических критериев оз. Дривяты является среднеустойчивым, так как термическая стратификация в нем выражена ярче, чем в близком к нему по морфометрическим показателям оз. Лукомском.

Неустойчивыми к внешнему воздействию благодаря наличию четко выраженных слоев в водной массе являются небольшие по площади стратифицированные озера (Долгое, Сарро, Волосо Южный). В то же время из-за большого периода водообмена и незначительного поступления веществ с водосбора, при отсутствии антропогенного воздействия они способны длительное время сохранять свои свойства. Неглубокие нестратифицированные озера (Россоно, Добеевское) также являются неустойчивыми, так как сток с водосборов в них интенсивнее, чем в глубокие водоемы. Второе по глубине оз. Ричи по динамическим критериям относится к группе неустойчивых, но его устойчивость, обусловленная морфометрией, выше, чем у других водоемов с глубиной более 40 м.

Заключение

В ходе исследования установлены достаточно сильные прямые зависимости термодинамических показателей от морфометрических характеристик, температуры воздуха и периода водообмена. Допустимые нормы воздействия, напротив, имеют обратную зависимость от этих показателей, что свидетельствует о снижении устойчивости озер к внешней нагрузке при ослаблении взаимодействия между слоями внутри водной массы.

В многолетнем разрезе в водоемах с длительными рядами наблюдений (Нещердо, Дривяты, Лукомское) отмечается рост термической устойчивости и числа Веддерберна, что свидетельствует об усилении стратификации и снижении допустимой нагрузки на водные экосистемы. Несмотря на это, в настоящее время вертикальная структура нестратифицированных озер, а соответственно и их устойчивость к внешнему воздействию не претерпевает значительных изменений. Если данная тенденция сохранится, возможно ослабление способности озер к самовосстановлению. Предположительно, в стратифицированных озерах вертикальные температурные и плотностные градиенты также возрастают. Для их экосистем эта тенденция более опасна, так как с уменьшением гидродинамического объема уменьшается и объем окислительной среды, в котором происходит нейтрализация загрязняющих веществ.

Выделение трех групп водоемов по устойчивости к внешнему воздействию позволит более эффективно производить управление их экосистемами путем определения допустимой величины воздействия с учетом особенностей сочетания всех местных факторов и условий.

Полученные результаты могут быть применены в целях гидрологического прогнозирования и моделирования процессов, происходящих в водоемах как под влиянием природных процессов, так и при антропогенной нагрузке, а также при определении способов наиболее рационального использования водных и минеральных ресурсов, для рекреационных целей и в рыбохозяйственных организациях.

Библиографические ссылки

1. Adrian R, O'Reilly CM, Zagarese H, Baines SB, Hessen DO, Keller W, et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*. 2009;54(6–2):2283–2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. Ambrosetti W, Barbanti L. Physical limnology of Italian lakes. 1. Relationship between morphometry and heat content. *Journal of Limnology*. 2002;61(2):147–157. DOI: 10.4081/jlimnol.2002.147.
3. Ambrosetti W, Barbanti L. Physical limnology of Italian lakes. 2. Relationship between morphometric parameters, stability and Birgean work. *Journal of Limnology*. 2002;61(2):159–167. DOI: 10.4081/jlimnol.2002.159.
4. Fischer H, List J, Koh C, Imberger J, Brooks N. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. New York: Academic Press; 1979. 487 p.
5. Gorham E. Morphometric control of annual heat budgets in temperate lakes. *Limnology and Oceanography*. 1964;9(4):525–529. DOI: 10.4319/lo.1964.9.4.0525.
6. Idso SB. On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography*. 1973;18(4):681–683. DOI: 10.4319/lo.1973.18.4.0681.
7. Imboden DM, Wüest A. Mixing mechanisms in lakes. In: *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin: Springer; 1995. p. 83–138.
8. Власов БП, Якушко ОФ, Гигевич ГС, Рачевский АН, Логинова ЕВ. *Озера Беларуси*. Минск: Минсктиппроект; 2004. 284 с.
9. Государственный водный кадастр. *Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши*. Минск: ЦНИИ-КИВР; 1965–2016 [до 1977 г. – Гидрологический ежегодник].
10. Birge EA. The work of the wind in warming a lake. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*. 1916; 18(2):341–391.
11. Read JS, Muraoka K. Lake Analyzer. Ver. 3.3. User Manual. *The Global Lake Ecological Observatory Network*. 2011. 21 p.
12. Lake analyzer web [Internet]. [Cited 2017 October 25]. Available from: <http://lakeanalyzer.gleon.org>.
13. Суховило НЮ. Роль метеорологических факторов в перемешивании водоемов Беларуси. В: *Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси. Часть 2*. Павловский АИ, редактор. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины; 2017. с. 198–203.
14. Суховило НЮ. Тепловой режим озер Белорусского Поозерья как фактор их экологического состояния. В: *Новые идеи в науках о Земле. XIII Международная научно-практическая конференция; 5–7 апреля 2017 г.; Москва, Россия. Том 2*. Москва: МГРИ – РГГРУ; 2017. с. 99–100.
15. Суховило НЮ. Формирование термической структуры водоемов Беларуси. В: *Теория и практика современных географических исследований. Материалы Международной научно-практической конференции 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; 7–9 апреля 2017 г.; Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Свое издательство; 2017. с. 233–239.
16. Власов БП, Самойленко ВМ, Грищенко НД. Антропогенные изменения экосистемы озера Болойсо и пути ее восстановления. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2017;1:14–25.

References

1. Adrian R, O'Reilly CM, Zagarese H, Baines SB, Hessen DO, Keller W, et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*. 2009;54(6–2):2283–2297. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. Ambrosetti W, Barbanti L. Physical limnology of Italian lakes. 1. Relationship between morphometry and heat content. *Journal of Limnology*. 2002;61(2):147–157. DOI: 10.4081/jlimnol.2002.147.
3. Ambrosetti W, Barbanti L. Physical limnology of Italian lakes. 2. Relationship between morphometric parameters, stability and Birgean work. *Journal of Limnology*. 2002;61(2):159–167. DOI: 10.4081/jlimnol.2002.159.
4. Fischer H, List J, Koh C, Imberger J, Brooks N. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. New York: Academic Press; 1979. 487 p.
5. Gorham E. Morphometric control of annual heat budgets in temperate lakes. *Limnology and Oceanography*. 1964;9(4):525–529. DOI: 10.4319/lo.1964.9.4.0525.
6. Idso SB. On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography*. 1973;18(4):681–683. DOI: 10.4319/lo.1973.18.4.0681.
7. Imboden DM, Wüest A. Mixing mechanisms in lakes. In: *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin: Springer; 1995. p. 83–138.
8. Vlasov BP, Yakushko OF, Gigevich GS, Rachevskii AN, Loginova EV. *Ozera Belarusi* [Lakes of Belarus]. Minsk: Minsktipproekt; 2004. 284 p. Russian.
9. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [State water cadaster. Annual data on the regime and resources of surface waters]. Minsk: TsNIKIIVR; 1965–2016 [by 1977 – Gidrologicheskii ezhegodnik [Hydrological yearbook]]. Russian.
10. Birge EA. The work of the wind in warming a lake. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*. 1916; 18(2):341–391.
11. Read JS, Muraoka K. Lake Analyzer. Ver. 3.3. User Manual. *The Global Lake Ecological Observatory Network*. 2011. 21 p.
12. Lake analyzer web [Internet]. [Cited 2017 October 25]. Available from: <http://lakeanalyzer.gleon.org>.
13. Sukhovilo NY. [The role of meteorological factors in mixing of water bodies in Belarus]. In: *Voprosy nauk o Zemle v kontseptsii ustoychivogo razvitiya Belarusi. Chast' 2* [Questions of earth sciences in the concept of sustainable development of Belarus. Part 2]. Pavlovsky AI, editor. Gomel: Francisk Skorina Gomel State University; 2017. p. 198–203. Russian.
14. Sukhovilo NY. [Thermal regime of lakes of the Belarusian Poozerie as a factor of their ecological state]. In: *Novye idei v nauках o Zemle. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya; 5–7 aprelya 2017 g.; Moskva, Rossiya. Tom 2* [New ideas in the earth sciences. XIII International scientific and practical conference; 2017 April 5–7; Moscow, Russia. Volume 2]. Moscow: MGRI – RGGRU; 2017. p. 99–100. Russian.

15. Suhovilo NY. [Formation of the thermal structure of water reservoirs of Belarus]. In: *Teoriya i praktika sovremennykh geograficheskikh issledovaniy. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoi 220-letiyu vydavushchegosya russkogo moreplavatelya, geografa, vitse-predsedatelya Russkogo geograficheskogo obshchestva F. P. Litke v ramkakh XIII Bol'shogo geograficheskogo festivalya; 7–9 aprelya 2017 g.; Sankt-Peterburg, Rossiya* [Theory and practice of modern geographical research. Proceedings of the International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, dedicated to the 220th anniversary of the outstanding Russian navigator, geographer, vice-chairman of the Russian Geographical Society F. P. Litke as part of the XIII Grand Geographic Festival; 2017 April 7–9; Saint Petersburg, Russia]. Saint Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2017. p. 233–239. Russian.

16. Vlasov BP, Samoilenka VM, Hryshchankava ND. Anthropogenic changes of the Boloysko Lake ecosystem and ways of its restoration. *Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*. 2017;1:14–25. Russian.

Статья поступила в редакцию 29.03.2018.
Received by editorial board 29.03.2018.