

УДК 911.52:910.3

DOI 10.17513/use.38180

ВЛИЯНИЕ ОТКРЫТОСТИ ИВАНО-АРАХЛЕЙСКИХ ОЗЕР НА ФОРМИРОВАНИЕ В НИХ ДОННЫХ ЛАНДШАФТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНО МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД

Матафонов П.В., Шойдоков А.Б., Базарова Б.Б., Матюгина Е.Б., Михеев И.Е.

*ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита,
e-mail: benthos@yandex.ru*

Ивано-Арахлейские озера – модельная группа озер в Восточной Сибири, при изучении которых была предложена гипотеза зависимости степени гидрофитности озер от колебаний уровня воды и ветрового взмучивания. В гипотезе не рассматривался вопрос влияния открытости озер на формирование в них донных ландшафтов. В 2016 г. в Ивано-Арахлейских озерах выполнены исследования распределения донных осадков и макрофитов. Снижение уровня воды в озерах к 2016 г. до экстремально низких за 70-летний период наблюдений отметок привело к осушению песчаных и галечниковых мелководий и преобладанию илистых осадков, в глубоком озере Арахлей произошло уменьшение максимальной глубины произрастания макрофитов. Корреляционный анализ выявил связь прозрачности воды и глубины распространения макрофитов в озерах. Факторным анализом выявлено наибольшее негативное влияние открытости озер на прозрачность воды и глубину зарастания в озерах Шакшинское и Иргень. В фазу экстремально низкой водности озер большая открытость озер способствует взмучиванию преобладающих в озерах илистых грунтов. Особенности формирования донных ландшафтов в озере Шакшинском необходимо принимать во внимание при проведении экологической экспертизы и оценки осуществляемых на озере хозяйственных проектов.

Ключевые слова: ландшафты, Ивано-Арахлейские озера, показатель открытости озер, прозрачность воды, глубина зарастания, донные осадки

Завершающий анализ всех материалов, собранных летом 2016 г., выполнен в 2023 году в рамках договора № 2.0110.23.05-НИР от 20 июля 2023 г. для реализации крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» в процессе реализации проекта (мероприятия): «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

INFLUENCE THE OPENNESS OF THE IVANO-ARAKHLEI LAKES ON THE FORMATION OF BOTTOM LANDSCAPES IN THEM IN AN EXTREMELY LOW-WATER PERIOD

Matafonov P.V., Shoydakov A.B., Bazarova B.B., Matyugina E.B., Mikheev I.E.

*FSBIS Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita,
e-mail: benthos@yandex.ru*

Ivano-Arakhley Lakes are a model group of lakes in Eastern Siberia. During their study, the hypothesis of the dependence of lake overgrowth on fluctuations in water level and wind stirring was proposed. The hypothesis did not consider the influence of the openness of lakes on the formation of bottom landscapes in them. In 2016, studies of the distribution of bottom sediments and macrophytes were carried out in the Ivano-Arakhley lakes. Reduction of water level in lakes by 2016 the extremely low levels over the 70-year period of observations led to the drainage of sandy and pebble shallow waters and the predominance of silty sediments, in the deep lake Arachley there was a decrease in the maximum depth of macrophyte growth. Correlation analysis revealed a relationship between water transparency and the depth of macrophyte distribution in lakes. Factor analysis revealed the greatest negative impact of the openness of lakes on the transparency of water and the depth of overgrowth in lakes Shakshinskoe and Irgen. In the phase of extremely low water content of lakes, the great openness of lakes contributes to the agitation of the silty soils prevailing in the lakes. The peculiarities of the formation of bottom landscapes in Lake Shakshinsky must be taken into account when conducting an environmental assessment and evaluation of economic projects carried out on the lake.

Keywords: landscapes, Ivano-Arakhley lakes, indicator of lake openness, water transparency, depth of overgrowth, bottom sediments

The final analysis of all materials collected in the summer of 2016 was carried out in 2023 within the framework of agreement № 2.0110.23.05-NIR dated July 20, 2023 for the implementation of a major scientific project in priority areas of scientific and technological development within the framework of the subprogram “Fundamental scientific research for long-term development and ensuring the competitiveness of society and the state” of the state program of the Russian Federation “Scientific and technological development of the Russian Federation” in the process of implementing the project (event): “Fundamental principles, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation of the Baikal natural territory”.

Для обоснованного выбора методологии рационального воздействия на экологическую ситуацию в озерах используют экологически ориентированные лимнологические исследования с использованием ландшафтного подхода [1, с. 434]. При этом, как в отношении прибрежно-морского ландшафтоведения [2, с. 14-15], перспективы озерного ландшафтоведения очевидно связаны со стационарными исследованиями и моделированием динамики гидродинамических и биогеохимических параметров экосистем, а также с предоставлением базовой эколого-географической информации для целей пространственного планирования.

Ивано-Арахлейские озера – модельная группа озер, на которых в Восточной Сибири выполняются многолетние стационарные гидробиологические исследования закономерностей динамики структурно-функциональной организации пресноводных экосистем в условиях ультраконтинентального климата и циклических изменений увлажненности территории [3]. Исследования озер были начаты в 60-е гг. XX века. В дальнейшем на их основе была предложена гипотеза об изменении степени гидрофитности озер под влиянием колебания уровня и его ветрового ресуспендирования [3, с. 94]. В гипотезе рассматривались преимущественно мелководные Ивано-Арахлейские озера в период средней и высокой водности. Было выявлено, что при снижении уровня воды возрастает степень ветрового ресуспендирования донных отложений. Известно, что влияние климатических факторов наиболее сильно выражено в водоемах с высоким показателем открытости [4, с. 160]. Однако, влияние открытости котловин Ивано-Арахлейских озер как фактора формирования в них донных ландшафтов не рассматривалось.

Цель исследования – выявить влияние открытости озерных котловин на формирование донных ландшафтов в Ивано-Арахлейских озерах в экстремально маловодный период.

Материалы и методы исследования

В состав системы Ивано-Арахлейских озер (52.208200°с.ш., 112.869338°в.д.) входят глубоководное оз. Арахлей с максимальной глубиной 17 м и мелководные озера: Тасей, Иван, Шакшинское, Большой Ундугун и Иргень. Данная система расположена в лесостепной зоне Забайкальского края на стыке водосборных бассейнов рек

Лены и Енисея. Господствующими ветрами являются северо-западные и западные. За период с 1953 по 2023 гг. в динамике уровня воды наиболее маловодными были 1980 г. и 2016 г. Уровень воды в 2016 г. в озерах достигал экстремально низких значений за 70 лет наблюдений. В настоящее время озера являются популярным местом отдыха забайкальцев и ядром одноименного природного парка.

Исследования макрофитов, донных осадков и прозрачности воды в Арахлейских озерах выполнены с 6 по 15 августа 2016 г. Станции исследований равномерно распределены во всем диапазоне глубин в западной части озер: оз. Тасей (52.29536°с.ш., 113.06544°в.д.–52.29620°с.ш., 113.08640°в.д.), оз. Иван (52.24957°с.ш., 112.97673°в.д. – 52.24151°с.ш., 112.99957°в.д.), оз. Арахлей (52.21675°с.ш., 112.83456°в.д.–52.20597°с.ш., 112.86735°в.д.), оз. Шакшинское (52.18121°с.ш., 112.69888°в.д.–52.17641°с.ш., 112.78133°в.д.), оз. Б. Ундугун (52.09536°с.ш., 112.53239°в.д. – 52.09380°с.ш., 112.56997°в.д.), оз. Иргень (52.00136°с.ш., 112.50854°в.д.–51.99377°с.ш., 112.54353°в.д.). Пробы донных осадков и макрофитов отобраны дночерпателем Петерсена (ДЧ-0,025) в одной повторности на станции: четыре – в оз. Тасей; по пять – в озерах Шакшинское и Иван; шесть – в оз. Б. Ундугун и Ирень; семь – в оз. Арахлей. Всего отобрано 33 комплексных проб. Прозрачность воды оценена по диску Секки. Тип донных осадков определен непосредственно на водоеме. Названия видов дано по Catalogue of Life (<https://www.catalogueoflife.org/?taxonKey=664D>). Значения фитомассы макрофитов приведены в воздушно-сухом весе. Глубина распространения макрофитов определена как среднее значение между максимальной глубиной обнаружения постоянных зарослей макрофитов и следующей за ней по глубине станции, где макрофиты отсутствовали. Статистическая обработка данных выполнена в программах Excel Stat. Для выявления взаимосвязи между открытостью озер, прозрачностью воды, морфометрическими параметрами озер и максимальной глубиной произрастания макрофитов проведен факторный анализ методом главных компонент. В анализе использованы основные морфометрические показатели озер за многоводные годы и 2016 г. (табл. 1). Эти же показатели использованы для расчета коэффициента открытости озер – отношения площади озера к его средней глубине.

Таблица 1

Морфометрические, гидрологические и биологические показатели состояния Ивано-Арахлейских озер

Озера	S, км ²	V, м ³	W _м , м	L, м	T, м	D, м	D _м , м	H _{макр} , м	K _{отп}
Арахлей	59	0,6	5,3	11	4,5	13,7	10,2	4,5	5,8
Шакшинское	51,8	0,23	4,8	11	0,75	4,5	4,4	1,1	11,8
Иван	15,2	0,05	2,1	7,1	2,9	4,4	3,1	2,9	4,9
Тасей	14,5	0,045	1,8	8,1	1,1	2,1	3,1	2	4,7
Большой Ундугун	11,6	0,026	2,3	5	1,1	3,3	2,2	2,1	5,3
Иргень	33,2	0,06	4,2	8	0,6	3,1	1,8	0,85	18,4

Примечание: S – площадь озера [5, с. 46], V – объем озера [5, с. 46], W_м – средняя ширина озера [5, с. 46], L – длина озера [5, с. 46], T – прозрачность воды в озере в 2016 г., D – максимальная глубина озера на профиле в 2016 г., D_м – средняя глубина озера [5, с. 46], H_{макр} – глубина распространения макрофитов в озере в 2016 г., K_{отп} – коэффициент открытости озера.

Результаты исследования и их обсуждение

В 2016 г. глубина оз. Арахлей в центральной части достигала 13,7 м, прозрачность воды составила 4,5 м. Наименьшая глубина и прозрачность воды зарегистрирована в оз. Иргень. Показатель открытости озер Арахлей, Иван, Тасей и Б. Ундугун варьировал в относительно узком диапазоне – от 4,7 до 5,8. На этом фоне значительно большим показателем открытости отличались озера Шакшинское и, особенно, озеро Иргень (табл. 1).

Основным типом донных отложений Арахлейских озер в 2016 г. были серые илы. Галечниковые, гравийные, песчаные и заиленно-песчаные грунты занимали преимущественно очень узкую прибрежную зону озер (табл. 2), только в оз. Шакшинском заиленные с дресвой пески отмечены до максимальных глубин. В оз. Ундугун и, особенно, в оз. Иргень преобладал комковатый ил, что обусловлено перемешиванием водной толщи и донных осадков. В отличие от других озер в оз. Шакшинское преобладали темно-серые и черные илы, что свидетельствует об анаэробных условиях в придонном слое.

Таблица 2

Типы донных осадков и фитомасса (г/м²) макрофитов в зоне зарослей в Ивано-Арахлейских озерах, июль 2016 г.

Вид	Озера						Тип донных осадков	Глубина, м
	Арахлей	Шакшинское	Иван	Тасей	Б.ольшой Ундугун	Иргень		
<i>Potamogeton praelongus</i> Wulf	180	–	–	–	–	–	заиленный песок, детрит	3,6
<i>P. perfoliatus</i> L.	–	–	–	13	18,3	13,2	песок, серый заиленный песок, серый ил	0,3-0,4
<i>P. compressus</i> L.	–	–	–	31	7,7	20	серый заиленный песок, серый и черный ил	0,3-1,5
<i>Myriophyllum sibiricum</i> Kom	3	320	52	142	–	120	песок, серый и черный ил	0,5-1,5
<i>Elodea canadensis</i> Michx	–	400	373	8,3	98	–	серый заиленный песок, серый и черный ил	0,5-2,3
<i>Lemna trisulca</i> L	8,4	–	–	–	–	–	песок	1,4
<i>Chara arcuatofolia</i> Vilh.	120	–	–	–	–	–	песок	1,4
<i>Chara</i> sp.	–	–	–	65	10,7	–	серый заиленный песок, серый ил	1,5-2,1
<i>Nymphoides peltata</i> (S. G. Gmel.) Kuntze	–	–	–	–	–	11	песок	0,2
Всего	312	720	425	259	135	164		

Снижение уровня воды в 2016 г. сопровождалось сокращением максимальной глубины озер, уменьшением глубины зарастания макрофитами [6], осушением песчаных и галечниковых грунтов [7, 8]. Так снижение уровня воды на два метра в озере Арахлей привело в 2017 г. к сокращению песчаных и преобладанию илистых биотопов [8]. Если в многоводные годы пески с галькой распространены до глубины три метра, то в 2016–2017 г. в западной литорали озера на глубине два метра и более грунты были представлены илами. Так, влажность грунтов в зоне глубин до 1,5 м включительно изменялась от 25 до 30%, а на глубине два метра и глубже не была меньше 90%, что в озере Арахлей соответствует илам [8, с. 4].

Макрофиты в материалах исследования представлены девятью видами (табл. 2). В 2010 г. в оз. Шакшинское впервые зарегистрирован чужеродный вид *E. canadensis*. К 2016 г. она расселилась по всем водоемам Ивано-Арахлейской системы.

Зарастаемость макрофитами озер была от полной (оз. Тасей) до незначительной (оз. Шакшинское и Иргень) (табл. 1). В озере Арахлей заросли макрофитов обнаружены до глубины 3,6 м – здесь они были сформированы *P. praelongus* (табл. 2). В оз. Иван в зоне глубин от 0,6 до 2,3 м заросли формировала *Elodea canadensis* (до 320–400 г/м²). В озере Тасей на глубинах от 0,3 м до 1,5 м в структуре зарослей доминировала *Myriophyllum sibiricum* с фитомассой 240–320 г/м², а в зоне наибольших глубин озера обнаружены заросли харовых водорослей. Постоянные заросли макрофитов в оз. Б. Ундугун обнаружены до глубины 1,1 м, где они были представлены небольшим количеством *Sparganium* sp. и харовых водорослей. Зона меньших глубин довольно плотно (90–200 г/м²) зарастала *Elodea canadensis*. В озерах Шакшинском и Иргень макрофиты занимали очень узкую прибрежную зону до глубины 0,5 и 0,4 м соответственно. В оз. Шакшинском заросли были сформированы *Elodea canadensis* (до 400 г/м²) и *Myriophyllum sibiricum*, в оз. Иргень – преимущественно *Myriophyllum sibiricum*, а также рдестом *P. perfoliatus* и *Nymphaoides peltata*.

В целом по доминированию в фитомассе ландшафтообразующими в зоне зарослей Ивано-Арахлейских озер были *Potamogeton praelongus*, *Myriophyllum sibiricum*, *Elodea canadensis*, харовые водоросли (табл. 2). При этом в озерах Б. Ундугун и, особенно,

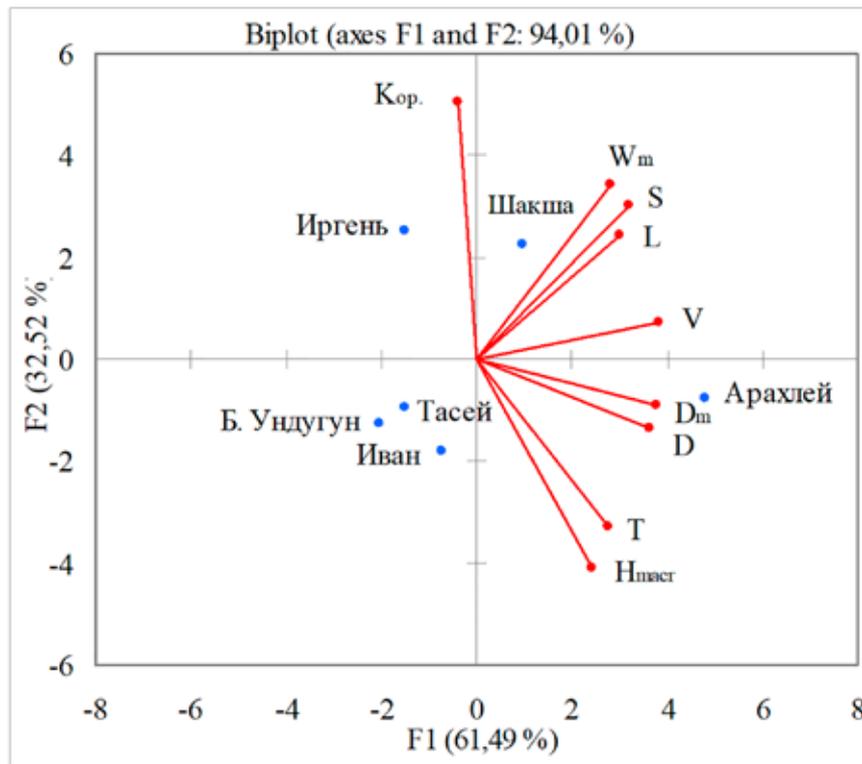
оз. Иван инвазионный вид *Elodea canadensis* сформировала новые ландшафты. По глубине распространения макрофитов зарослевые сообщества в 2016 г. в озере Арахлей занимали глубины до 4,5 м, в оз. Иван – до 2,9 м, оз. Тасей – до 2,1 м, в оз. Б. Ундугун – до 1,5 м, в оз. Шакшинском – до 1,1 м, в оз. Иргень – до 0,9 м. Глубже в озерах были распространены свободные от макрофитов фации илов.

Показатель открытости позволяет судить о степени перемешиваемости водных масс. С увеличением площади водоема или снижением его глубины открытость водоема возрастает – это, в свою очередь, ведет к увеличению ветрового воздействия на водные массы и улучшению их перемешивания. Негативным эффектом является взмучивание донных осадков, что в случае преобладания илов, сопровождается значительным снижением прозрачности воды и ухудшением условий обитания макрофитов. Таким образом, опосредованно открытость озер оказывает влияние на формирование зарослевых и свободных от макрофитов донных геосистем.

Корреляция глубины распространения макрофитов и прозрачности воды в Ивано-Арахлейских озерах в 2016 г. составила 0,96 ($p=0,002$). Их связь в озерах в 2016 г. достаточно точно можно описать функцией: $y = 1,6364 \ln(x) + 1,7069$ ($R^2 = 0,94$), где y – глубина распространения макрофитов, x – прозрачность воды.

Выявленная закономерность показывает, что в экстремально маловодную фазу глубина распространения макрофитов и прозрачность воды в Ивано-Арахлейских озерах имеют тесную связь. Представление о взаимосвязи прозрачности воды и глубины распространения макрофитов в Арахлейских озерах использовалось при создании концептуальной модели изменений их экосистем под влиянием колебаний уровня режима озер [3]. Связь прозрачности воды и глубины зарастания взаимообусловленная, при этом оба эти показателя в Ивано-Арахлейских озерах находятся под влиянием ветрового взмучивания донных осадков [3, с. 95].

Для выявления взаимосвязи между открытостью озер, прозрачностью воды, морфометрическими параметрами озер и максимальной глубиной произрастания макрофитов выполнен факторный анализ. Первые две компоненты факторного анализа объясняют 94% дисперсии (рисунок).



Биplot ориентации параметров Ивано-Арахлейских озер в пространстве первых двух главных компонент PCA: Шакша – оз. Шакшинское; D – максимальная глубина озера, D_m – средняя глубина озера, H_{max} – глубина распространения макрофитов в озере, K_{op} – коэффициент открытости озера, L – длина озера, S – площадь озера, T – прозрачность воды в озере, V – объем озера, W_m – средняя ширина озера

Первая компонента характеризуется высокой положительной связью с объемом (0,99), средней (0,98) и максимальной (0,94) глубиной, площадью (0,82), прозрачностью воды (0,72) и глубиной произрастания макрофитов (0,62). Она относится преимущественно к озеру Арахлей, вклад которого из озер в первую компоненту определяющий – 69%. Вторая компонента характеризуется высокой корреляцией с показателем открытости озер (0,90). Основной вклад в эту компоненту из озер вносят Иргень (35,7%) и Шакшинское (28,7%), из морфометрических параметров озер – открытость озер (31%), средняя ширина (14%) и площадь озер (11%).

Донные макрофиты, в особенности харовые водоросли, выполняют ландшафтообразующую функцию, стабилизируя илстые осадки и снижая мутность воды. При реализации хозяйственных проектов на Ивано-Арахлейских озерах не всегда принимается во внимание ландшафтообразующая роль макрофитов. Примером может быть неводный лов рыбы на озерах,

а также вселение в озера *Cyprinus carpio haematopterus* (Linnaeus, 1758), способного оказывать негативное влияние на макрофиты [9, с. 379]. Указанные мероприятия осуществлялись на одном из основных рыбохозяйственных водоемов Ивано-Арахлейской системы – озере Шакшинском.

Недостаточное внимание комплексности связей в донных ландшафтах озера и их влиянию на качество воды приводит к цветению озер вследствие массового развития цианобактерий. Необходимо отметить, что существенные негативные эффекты, вплоть до антропогенного метаболического регресса, в толще воды и донных сообществах отмечаются даже в случае выполнения мероприятий по экореставрации водоемов [10, с. 119; 11, с. 83].

В совокупности с большой открытостью водного зеркала озер неводный лов и вселение бентосоядных рыб в оз. Шакшинское способствуют взмучиванию илстых осадков, снижению зарастаемости озера и уменьшению прозрачности воды. Другой угрозой коренным ландшафтам и качеству

воды в озере Шакшинском и прочих Ивано-Арахлейских озерах является *Elodea canadensis*, которая может ускорить негативные процессы вследствие нестабильности формируемых ею биоценозов.

Методы восстановления или биологической мелиорации Ивано-Арахлейских озер путем воздействия на донные ландшафты должны предусматривать возможные негативные эффекты на качество воды, обусловленные многофакторным влиянием донных ландшафтов или их компонентов на состояние водной толщи. На озерах должна осуществляться экологическая экспертиза и оценка воздействия хозяйственных проектов, предусматривающая возможность их негативного влияния на донную растительность и прозрачность вод с учетом показателей открытости водоемов и фазы водности.

Заключение

Снижение глубины Ивано-Арахлейских озер привело к сокращению в озерах площади песчаных мелководий и увеличению доли илистых ландшафтов. В этих условиях прозрачность воды и глубина зарастания озер показывают тесную связь и зависимость от открытости озер. Наибольшее влияние ветровой нагрузки проявляется в условиях геосистем водоемов с высоким коэффициентом открытости – озера Иргень и Шакшинское. Ивано-Арахлейские озера имеют важную социальную и природоохранную функцию, поэтому в целях рационального природопользования и недопущения перехода озер в нежелательные состояния необходимо принимать во внимание и рассчитывать нагрузку на донные ландшафты, исходя из открытости каждого из озер и фазы водности.

Список литературы

1. Дудакова Д.С., Анохин В.М., Поздняков Ш.Р., Дудаков М.О., Юдин С.Н. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера // Известия РАН. Серия географическая. 2021. №3. С. 433-445. DOI: 10.31857/S2587556621030043.
2. Жариков В.В. Развитие ландшафтного подхода к изучению подводных геосистем в Тихоокеанском институте географии // Тихоокеанская география. 2022. №1. С. 5-17 DOI: 10.35735/26870509_2022_9_1.
3. Шишкин Б.А. Об основных закономерностях межгодовых изменений режима Ивано-Арахлейских озер // Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск: Издательство СО РАН, 2013. С. 94-99.
4. Тальских В.Н., Шардакова Л.Ю. Разработка индикаторов экологически допустимого состояния для озерных экосистем бассейна Аральского моря в условиях антропогенного воздействия и изменения климата // Гидрометеорология и экология. 2019. №2. С. 158-169.
5. Обязов В.А. Динамика климатических и гидрологических параметров // Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. С. 34-37.
6. Базарова Б.Б. Макрофиты / Ивано-Арахлейские озера на рубеже веков (состояние и динамика). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. С.142-158.
7. Kuklin A.P., Bazarova B.B. Macrophytes in the littoral of lake Arakhley in different states of water regime // Ekológia (Bratislava). 2019. Vol. 38. № 3. pp. 225–239. DOI: 10.2478/eko-2019-0018.8.
8. Matafonov P.V. Diversity of littoral zoobenthos in Lake Arakhley (Transbaikalia) during the arid phase // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. V.908. P. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/908/1/012020.
9. Bajer P.G., Beck M.W., Hundt P.J. Effect of non-native versus native invaders on macrophyte richness: are carp and bullheads ecological proxies? // Hydrobiologia. 2018. 817. P. 379–391. DOI: 10.1007/s10750-018-3592-1.
10. Безматерных Д.М., Кириллов В.В., Ермолаева Н.И., Киприянова Л.М. Яныгина Л.В., Митрофанова Е.Ю., Вдовина О.Н., Котовщиков А.В., Зарубина Е.Ю. Влияние дноуглубительных работ на гидробиологические и санитарно-микробиологические характеристики озера Манжерокское (Республика Алтай) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. №3. С. 106-127. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-3-8.
11. Деревенская О.Ю. Сукцессии зоопланктона малых мелководных озер после проведения мероприятий по эко-реабилитации // Трансформация экосистем. 2022. №2. DOI: 10.23859/estr-220207.