DOI 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-10

УДК 551.480+556.555.4/5

© *И. А. Суторихин*[1,3]*, *В. В. Кириллов*[1], *С. А. Литвиненко*[1], *Р. К. Свиридов*[1], *В. А. Соловьев*[2], *Г. В. Феттер*[1], 2024

[1]Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038 РФ Алтайский край г. Барнаул ул. Молодежная, 1
[2]Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656049, РФ Алтайский край, г. Барнаул, пр-кт Ленина, 46
[3]Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, РФ Новосибирская область, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6
*sia@iwep.ru

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЗЕРА МАНЖЕРОКСКОГО ПОСЛЕ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Статья поступила в редакцию 23.01.2024, после доработки 17.09.2024, принята в печать 25.09.2024

Аннотация

Приведены данные по сезонной и многолетней динамике гидрофизических характеристик на акватории Манжерокского озера (Республика Алтай) после дноуглубительных работ 2017–2018 гг. Экспедиционные исследования были проведены в период ледостава в апреле 2021, а также летнего прогрева озера в июле 2021 и 2023 гг. Исследованы спектральный показатель ослабления света в диапазоне 400–800 нм, относительная прозрачности воды по белому диску, скорость движения воды в поверхностных и придонных горизонтах, а также температурная стратификация. Установлено, что открывшиеся придонные источники грунтовых вод способствовали размыву и растворению не полностью удаленного илового слоя, что определило высокие значения спектрального показателя ослабления света и низкую относительную прозрачность воды. Результаты исследований в июле 2023 г. показали существенные изменения гидрофизических характеристик по сравнению с 2021 г., свидетельствующие об улучшении экологического состояния озера в многолетнем аспекте за период с 2018 по 2023 год. Сравнение весенних и летних данных динамики спектрального показателя ослабления света на разных глубинах для озера Манжерокского с другими пресноводными слабопроточными озерами показало, что этот гидрооптический параметр для исследуемого озера максимален в период ледостава, в то время как для других озер отмечается его минимум в эту фазу годового лимнического цикла.

Ключевые слова: озеро Манжерокское, дноуглубительные работы, иловый слой, грунтовые воды, относительная прозрачность воды, спектральный показатель ослабления, скорость движения воды, температурная стратификация

UDC 551.480+556.555.4/5

© *I. A. Sutorikhin*[1,3]*, *V. V. Kirillov*[1], *S. A. Litvinenko*[1], *R. K. Sviridov*[1], *V. A. Soloviev*[2], *G. V. Fetter*[1], 2024

[1]Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 656037 Russian Federation, Altai Territory, Barnaul, Molodezhnaya str., 1
[2]Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 656049, Russian Federation, Altai Territory, Barnaul, ave. Lenin Street, 46
[3]Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Russian Federation Novosibirsk Region, 630090, Novosibirsk, Akademika Lavrentieva Avenue, 6
* sia@iwep.ru

HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF LAKE MANZHEROK AFTER DREDGING

Received 23.01.2024, Revised 17.09.2024, Accepted 25.09.2024

Abstract

Data on seasonal and long-term dynamics of hydrophysical characteristics in the water area of Lake Manzheroksky (Altai Republic) after dredging in 2017–2018 are presented. The expedition studies were conducted during the ice age in April 2021, as well as the summer warming of the lake in July 2021 and 2023. The spectral index of light attenuation in the range of 400–800 nm, the relative transparency of water over a white disk, the velocity of water movement in surface and bottom horizons, as well as temperature stratification are studied. It was found that the discovered bottom groundwater sources contributed to the erosion and

Ссылка для цитирования: *Суторихин И.А.*, *Кириллов В.В.*, *Литвиненко С.А.*, *Свиридов Р.К.*, *Соловьев В.А.*, *Феттер Г.В.* Гидрофизические характеристики озера Манжерокского после дноуглубительных работ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. Т. 17, № 3. С. 115–126. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-10
For citation: Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Litvinenko S.A., Sviridov R.K., Soloviev V.A., Fetter G.V. Hydrophysical Characteristics of Lake Manzherok after Dredging. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(3):115–126. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-10

dissolution of the not completely removed silt layer, which determined high values of the spectral index of light attenuation and low relative transparency of the water. The research results in July 2023 showed significant changes in hydrophysical characteristics compared to 2021, indicating an improvement in the ecological condition of the lake in a long-term aspect for the period from 2018 to 2023.

A comparison of spring and summer data on the dynamics of the spectral index of light attenuation at different depths for Lake Manzheroksky with other freshwater low-flow lakes showed that this hydro-optical parameter for the studied lake is maximum during the ice age, while for other lakes its minimum is noted in this phase of the annual limnic cycle.

Keywords: lake Manzheroksky, dredging, silt layer, groundwater, relative water transparency, spectral attenuation index, water velocity, temperature stratification

1. Введение

Естественная эволюция озер включает изменение морфометрии их котловин и эвтрофирование. Под воздействием хозяйственной деятельности на расположенном в Майминском районе Республики Алтай озере Манжерокском и его водосборном бассейне, произошло ускорение этих процессов и ухудшение условий для рекреационного использования водоема [1]. В 2017–2018 гг. с целью замедления зарастания и заполнения чаши оз. Манжерокское илами с высоким содержанием органического вещества был реализован проект по экологической реабилитации озера, в котором в качестве основного мероприятия было предусмотрено дноуглубление с удалением донных илов в его центральной части [2].

Результаты экологических исследований по комплексу физических, химических и биологических характеристик воды и донных отложений озера сразу после проведения этих работ свидетельствовали, в соответствии с Критериями оценки экологической обстановки [3], о «чрезвычайной экологической ситуации» на озере Манжерокское в августе 2018 г. [4].

В 2019–2020 гг. в соответствии с Программой Министерства природных ресурсов и экологии Республики Алтай по мониторингу состояния акватории озера был изучен химический состав, содержание взвешенных веществ, мутность и окисляемость воды. Была установлена тенденция последовательного ежегодного снижения содержания взвешенных частиц и улучшения экологического состояния озера после проведения реабилитационных мероприятий с прогнозом на ближайшие 1–2 года сохранения позитивных трендов самовосстановления его экосистемы [2].

Цель наших исследований — сделать количественную оценку изменения гидрофизических параметров озерной воды после дноуглубления с удалением донных илов в центральной части озера, выявить их сезонную и межгодовую динамику в период ледостава и летнего прогрева. Для этого в 2021 и 2023 гг. на разных участках акватории были исследованы относительная и спектральная прозрачность, горизонтальные и вертикальные скорости движения воды, температурная стратификация по глубине.

2. Объект исследований

Предгорное озеро Манжерокское, расположено на древней террасе правого берега реки Катунь на 90–92 м выше уреза и на высоте 376–380 м над уровнем моря (Цимбалей, 2008). Озеро имеет форму эллипса, вытянутого с юго-запада на северо-восток на 1100 м с наибольшей шириной около 400 м. Водосборный бассейн озера небольшой — всего 7,67 км^2. Питание озера осуществляется временным поверхностным стоком с горы Синюхи, атмосферными осадками и грунтовыми водами. Водоем относится к слабопроточным с замедленным водообменом. На юго-западе из него вытекает руч. Озерный, впадающий в р. Едрала (приток р. Катунь).

При отметке уровня 375,5 м, соответствующей среднегодовому меженному уровню воды в озере и обеспечивающей его режим постоянного функционирования, в 2015 г. по данным ООО «Запсибгипроводхоз» (г. Новосибирск) площадь акватории составляла 0,35 км^2, объем — 568,6 тыс. м^3. Максимальная глубина — 3 м. Почти все дно озера в 2015 г. покрывали высокодисперсные минерально-органические илы (сапропель) мощностью 2–2,5 м. по данным [1].

В 2017–2018 гг. с использованием электрического земснаряда ЛС-27 на площади 0,15 км^2 было изъято и перемещено на северный фланг озерной котловины 217,3 тыс. м^3 донных илов. Средняя глубина расчистки составила 1,34 м при максимальной 2,06 м. Вероятно, вследствие активизации источников подземных вод (родников) на дне и в восточном борту озера, вскрывшихся после дноуглубительных работ, в течение всего 2020 года наблюдался стабильно высокий уровень воды –376,2 м [1]. По данным ООО «Центр инженерных технологий» (г. Барнаул) в 2021 г. при отметке уровня 375,5 м площадь акватории составляла 0,38 км^2, объем — 680,5 тыс. м^3.

3. Пункты и методы исследований

Для сравнительной оценки изменения гидрофизических характеристик воды на разных участках акватории озера были выбраны шесть станций (рис. 1), координаты которых приведены в табл. 1.

Первая серия экспедиционных работ на озере была проведена в апреле 2021 г. в период наличия ледового покрова. Вторая и третья — в июле 2021 и 2023 годов.

Пробы воды отбирали батометром Рутнера. В период ледостава в 2021 г. — из пробуренных лунок диаметром 18 см из подледного горизонта и слоя, близкого к придонному. Толщина льда для разных станций изменялась от 45 до 55 см. Летом 2021 и 2023 гг. пробы отбирали с катамарана из поверхностного и придонного слоев воды.

В камеральных условия в отобранных пробах на спектрофотометре ПЭ-5400УФ определяли спектральный коэффициент пропускания света. Измерения проводили с шагом 30 нм в интервале 400–800 нм. Водные пробы помещали в кварцевые (измерительные) кюветы размером 20 × 50 мм. В канале сравнения в аналогичных кюветах находилась деионизированная бидистиллированная вода.

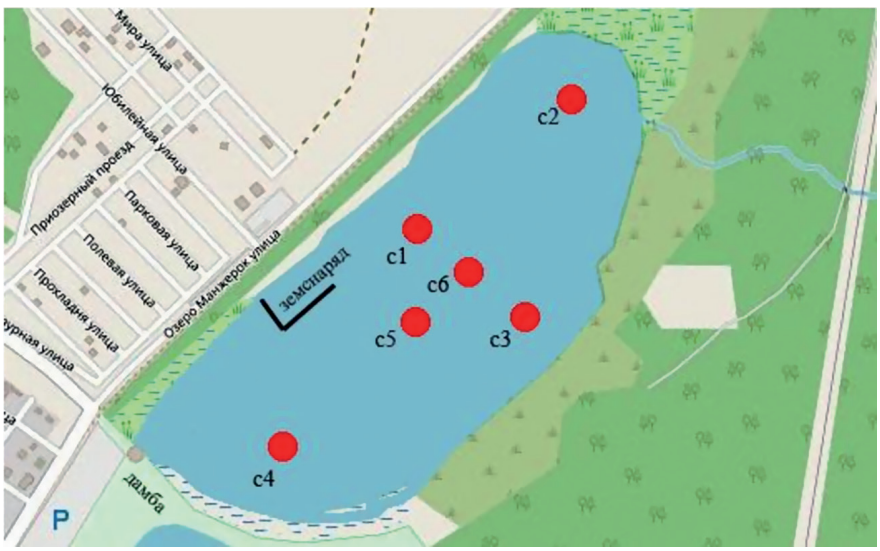

Рис. 1. Схема расположения станции при измерении гидрофизических параметров и отборе проб воды на акватории озера Манжерокского

Fig. 1. The layout of the station for measuring hydrophysical parameters and sampling water in the water area of Lake Manzheroksky

Таблица 1

Table 1

Координаты станций и глубина в местах проведения измерений в 2021 и 2023 гг.

Station coordinates and depth at the measurement sites in 2021 and 2023

№ станции	Координаты	Глубина, см		
		10.04.2021	11.07.2021	06.07.2023
С1	51°49′20,6″ 85°48′36,7″	280	280	270
С2	51°49′27,2″ 85°48′51,8″	120	110	100
С3	51°49′15,7″ 85°48′45,7″	360	350	350
С4	51°49′09,5″ 85°48′27,2″	150	150	140
С5	51°49′15,7″ 85°48′36,7″	400	400	390
С6	51°49′18,2″ 85°48′40,7″	370	370	360

Гидрооптическая характеристика — спектральный показатель ослабления света ε(λ) рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{1}{L} In1 / T,$$

где L — длина кюветы, $T = I / I_0$ — прозрачность в относительных единицах, I, I_0 — интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно, λ — длина волны света. Абсолютная погрешность величины ε(λ) обусловлена погрешностью измерения коэффициента пропускания с помощью спектрофотометра и погрешностью определения длины кюветы. Максимальная абсолютная погрешность измерений показателя ослабления света составила около 0,5 $м^{-1}$.

В серии экспедиционных измерений в июле 2023 г. дополнительно проводилась фильтрация водных проб через мембранные фильтры. Были использованы мембранные фильтры «Владипор» ОС-3 с диаметром пор 0,85–1,0 мкм. Фильтры выполнены в виде дисков с диаметром 35 мм и общей пористостью 80–85 %. После фильтрации вновь проводилось определение ε(λ), что позволило из сравнения фильтрованных и нефильтрованных проб оценить влияние нерастворимых веществ на ход зависимости ε(λ).

4. Результаты и обсуждение

4.1. Гидрооптика

Результаты определения ε(λ) в подледном и придонных горизонтах в апреле 2021 г. для станций № 1 и № 3 приведены на рис. 2.

Наиболее замутненный слой воды был зарегистрирован на придонных горизонтах для всех станций в зоне проведенных дноуглубительных работ.

Исследования пресноводных озер Алтайского края и Республики Алтай (Большое Островное, Красиловское, Иткуль, Телецкое) в период ледостава, проведенные ранее в ИВЭП СО РАН, показывают [5], что наиболее высокая спектральная прозрачность воды отмечается именно в этот период. Причин здесь несколько: во-первых, угнетается деятельность гидробиологических процессов внутри водоема; во-вторых, водная поверхность экранируется от атмосферы слоем льда и снега; в-третьих, отсутствуют ветровые волны, перемешивающие и перемещающие поверхностный слой воды [6, 7].

Для летнего периода 2021 г. тенденция повышенной мутности придонных слоев сохранилась, так же как и в апреле, хотя можно отметить некоторое уменьшение значений ε(λ) по сравнению с поверхностным слоем (рис. 3).

Измерения в летний период 2023 г. показали существенное увеличение по сравнению с 2021 г. относительной прозрачности воды по белому диску до 45–55 см. Ход зависимости ε(λ) на разных станциях и глубинах также претерпел изменения в плане уменьшения ее значений (рис. 4).

Определение зависимости ε(λ) после фильтрации показало существенный вклад не растворенных взвешенных веществ в уменьшение ее значений. В качестве примера для станций № 1 и № 3 показан ход графиков ε(λ) на рис. 5 и 6.

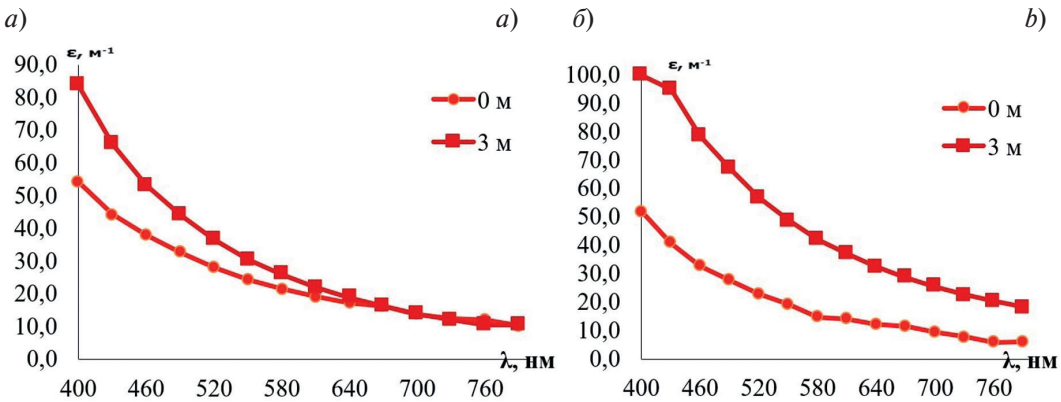

Рис. 2. Зависимость спектрального показателя ослабления света от глубины в период ледостава для станций № 1 (*а*) и № 3 (*б*)

Fig. 2. Dependence of the spectral index of light attenuation on depth during the ice age for stations No. 1 (*a*) and No. 3 (*b*)

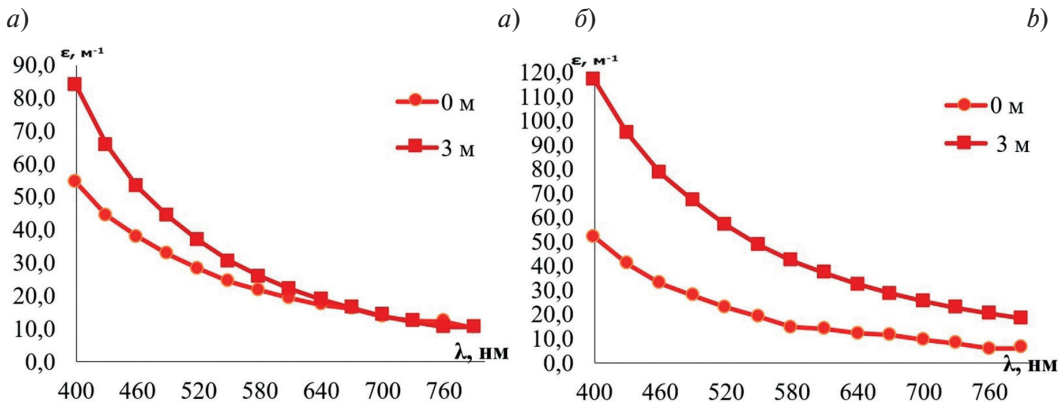

Рис. 3. Зависимость спектрального показателя ослабления света от глубины в летний период 2021 г. для станций № 1 (*а*) и № 3 (*б*)

Fig. 3. Dependence of the spectral index of light attenuation on depth in the summer period of 2021 for stations No. 1 (*a*) and No. 3 (*b*)

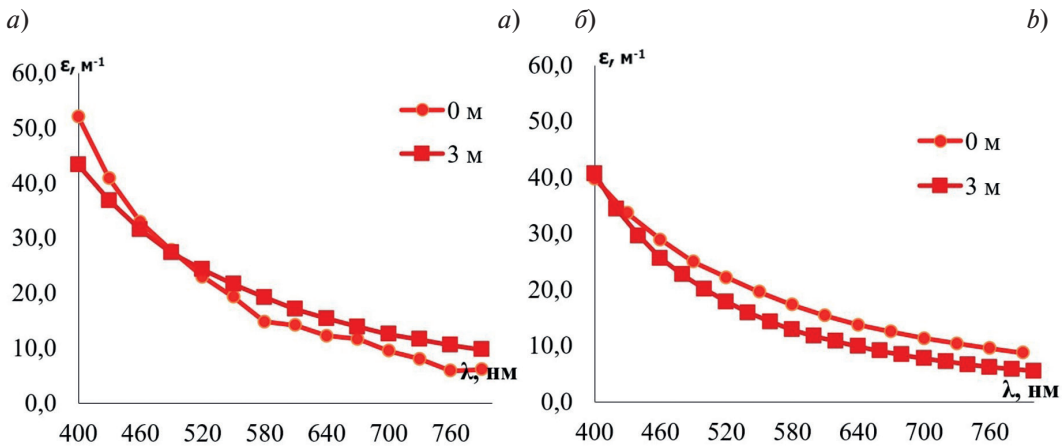

Рис. 4. Зависимость спектрального показателя ослабления света от глубины в летний период 2023 г. для станций № 1 (*а*) и № 3 (*б*)

Fig. 4. Dependence of the spectral index of light attenuation on depth in the summer period of 2023 for stations No. 1 (*a*) and No. 3 (*b*)

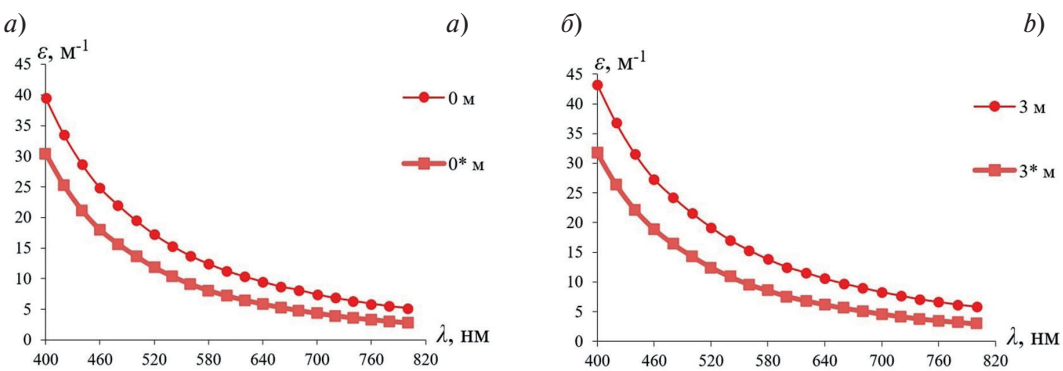

Рис. 5. Зависимость спектрального показателя ослабления света до фильтрации (0 м) и после фильтрации (0 * м) для станций № 1 в поверхностном (*а*) и в придонном (*б*) слое воды

Fig. 5. Dependence of the spectral index of light attenuation before filtration (0 m) and after filtration (0 * m) for stations No. 1 in the surface (*a*) and bottom (*b*) water layer

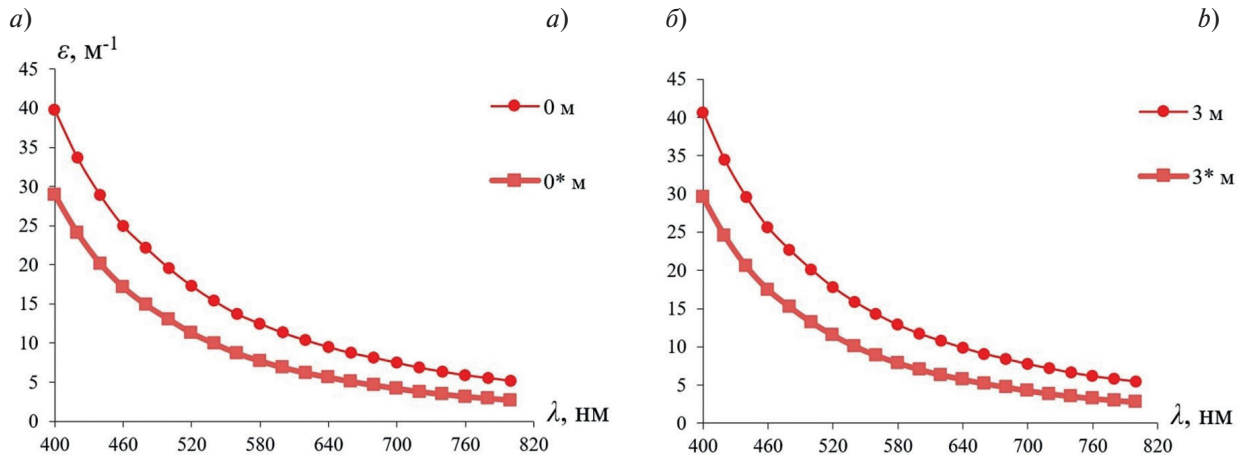

Рис. 6. Зависимость спектрального показателя ослабления света до фильтрации и после фильтрации для станций № 3 в поверхностном (*а*) и в придонном (*б*) слое воды

Fig. 6. Dependence of the spectral index of light attenuation before and after filtration for stations No. 3 in the surface (*a*) and bottom (*b*) water layer

По результатам определения массовой концентрации нерастворимых веществ, осевших на фильтрах, и после высушивания их до постоянного веса с учетом объема фильтрата были получены значения объемной концентрации на разных глубинах участков акватории оз. Манжерокское, которые приведены в табл. 2.

Диапазон изменений объемной концентрации нерастворимых веществ на разных глубинах озера составил от 22 до 62 мг/л. Наибольшие значения были зарегистрированы в придонных слоях.

Относительная прозрачность воды по белому диска на участках акватории озера в 2021 и 2023 гг. приведены в табл. 3.

Таблица 2

Table 2

Объемная концентрация не растворимых веществ на разных глубинах участков акватории оз. Манжерокское

Volume concentration of insoluble substances at different depths of the lake water area Manzheroksky

№ станции	Глубина, м	Объемная концентрация, мг/л
С1	0	30
	2	48
С2	0	36
С3	0	25
	3,5	54
С4	0	33
С5	0	22
	3,6	28
С6	0	35
	3,4	62

Таблица 3

Table 3

Относительная прозрачность воды по белому диска на участках акватории озера в июле 2021 и 2023 гг.

Relative transparency of water according to the white disk in sections of the lake's water area in July 2021 and 2023

№ станции	Глубина видимости белого диска, см/	
	2021	2023
С1	15	40
С2	12	45
С3	15	45

Окончание табл. 3

Fin table 3

№ станции	Глубина видимости белого диска, см/	
	2021	2023
С4	12	40
С5	15	40
С6	15	45

В целом за исследуемый период с 2021 по 2023 гг. изменения гидрооптических характеристик в озере составило: видимость белого диска увеличилась с 12–15 см до 40–45 см, и ход зависимости ε(λ) в диапазоне 400–800 нм на разных глубинах существенно уменьшился, что свидетельствует о положительной динамике в изменении экологического состояния озера по гидрооптическим характеристикам.

Как показали наши исследования в 2021 г. [8], проведенные дноуглубительные работы вскрыли мощные придонные источники грунтовых вод, которые стали интенсивно размывать и растворять не полностью удаленный иловый слой и препятствовать оседанию взвеси. Повторные гидрооптические исследования в июле 2023 г. позволили получить данные, свидетельствующие о существенном изменений в положительную сторону экологического состояния озера по этому показателю.

4.2. Измерение скоростей течений

Измерение скоростей течений на разных глубинных горизонтах — довольно сложная проблема, поскольку величины скоростей, как правило, имеют малые значения и стандартные гидрологические вертушки из-за большой массы и высокой инертности оказываются неприменимы.

Для измерения скоростей подледных течений на разных глубинах водоемов был создан макет прибора, в основе которого применен механизм от водоизмерительного устройства СГВ-15. Как показали предварительные стендовые исследования, указанные водоизмерительные устройства довольно чувствительны к малым скоростям движения воды и имеют малую инерционность. Это обусловлено тем, что крыльчатка счетчика закреплена в конусных подвесах, выполнена из пластмассы и имеет массу порядка 6 г. Со счетным механизмом крыльчатка связана через водонепроницаемую прочную диафрагму посредством взаимодействия постоянных магнитов, что в свою очередь обеспечивает герметичность измерительной части датчика [7].

Калибровка макета прибора проводилась в стендовых условиях, когда макет погружался в бассейн с водой, а штанга вертикально закреплялась на подвижной каретке. Скорость движения каретки задавалась электродвигателем с шестеренчатым редуктором и могла изменяться в диапазоне от 1 до 40 мм/с. Для повышения чувствительности прибора на входной патрубок измерительного блока диметром 20 мм устанавливалась воронка внешним диаметром 100 мм. По результатам калибровки был получен график, который определял величину импульсно-модулированного сигнала с оптоэлектронной пары от скорости движения воды. В ходе калибровки было установлено, что предельная чувствительность макета прибора для малых скоростей движения равна 1 мм/с. Абсолютная погрешность измерений в указанном диапазоне скоростей соответствовала 0,5 мм/с. Результаты калибровки были запрограммированы в блоке обработки и на экране дисплея выводились данные о скорости движения воды в мм/с. Для учета неоднородности скорости движения воды при проведении измерений было предусмотрено усреднение по времени с интервалом в 10, 15 и 20 с.

Результаты измерений скоростей течений в 2021 и 2023 приведены в таблицах 4–6.

Таблица 4

Table 4

Данные измерений скоростей движения воды в поверхностном и придонном слоях воды в горизонтальном и вертикальном направлениях на оз. Манжерокском 14 апреля 2021 года

Data of measurements of the velocities of water movement in the surface and bottom layers of water in the horizontal and vertical directions on the Lake Manzheroksky on April 14, 2021

№ станции	Скорость в поверхностном слое, мм/с		Скорость в придонном слое, мм/с	
	горизонтальная	вертикальная	горизонтальная	вертикальная
С1	0	0	3	1
С2	0	0	2	0

Окончание табл. 4

Fin table 4

№ станции	Скорость в поверхностном слое, мм/с		Скорость в придонном слое, мм/с	
	горизонтальная	вертикальная	горизонтальная	вертикальная
С3	5	4	8	5
С4	0	0	3	1
С5	2	3	4	3
С6	3	1	4	3

Таблица 5

Table 5

Данные измерений скоростей движения воды в поверхностном и придонном слоях воды в горизонтальном и вертикальном направлениях на оз. Манжерокском 13 июля 2021 года

Measurement data of the velocities of water movement in the surface and bottom layers of water in the horizontal and vertical directions on the Lake Manzheroksky on July 13, 2021

№ станции	Скорость в поверхностном слое, мм/с		Скорость в придонном слое, мм/с	
	горизонтальная	вертикальная	горизонтальная	вертикальная
С1	0	0	1	1
С2	0	0	1	0
С3	2	1	5	3
С4	0	0	2	0
С5	1	1	2	3
С6	2	1	2	3

Таблица 6

Table 6

Данные измерений скорости движения воды в поверхностном и придонном слоях воды в горизонтальном и вертикальном направлениях на оз. Манжерокском 6 июля 2023 года

Measurement data of the velocity of water movement in the surface and bottom layers of water in the horizontal and vertical directions on the Lake Manzheroksky on July 6, 2023

№ станции	Скорость в поверхностном слое, мм/с		Скорость в придонном слое, мм/с	
	горизонтальная	вертикальная	горизонтальная	вертикальная
С1	0	0	0	0
С2	0	0	0	0
С3	0	0	1	2
С4	0	0	0	2
С5	0	0	1	0
С6	0	0	1	1

В целом, полученные данные указывают на существование в озере Манжерокском течений воды, вызванных разгрузкой (выходом) на расчищенном дне озера грунтовых вод, поступающих с подземных стоков с северо-западного и юго-восточного борта озерной котловины.

Поскольку юго-восточный борт котловины (макросклон г. Мал. Синюха) более крутой и протяженный, по сравнению с выположенным северо-западным бортом, то подземный сток с него создает более значительный гидродинамический напор и обусловливает в весенний период 2021 г. на дне озера максимальные скорости течения, как в поверхностном, так и в придонных слоях — до 5–8 мм/с (табл. 4).

В летнее время горизонтальные и вертикальные скорости течений существенно уменьшились (табл. 5), а в 2023 г. из-за заиливания дна для большей части станций практически не регистрировались (табл. 6).

Как показали наши исследования в 2021 г. [8], причина заключалась в том, что проведенные дноочистительные работы вскрыли мощные придонные источники, которые стали интенсивно размывать и растворять не полностью удаленный иловый слой и препятствовать оседанию гидровзеси. Повторные гидрооптические исследования в июле 2023 г. позволили получить данные, свидетельствующие о существенном изменении в положительную сторону экологического состояния этого озера.

4.3. Измерения температуры

Профиль температуры по глубине определяли с использованием дискретного цифрового измерителя ДЦИТ — 10/0,5 [9]. Цифровые температурные датчики DS-18 на кабель-тросе располагались с интервалом 0,5 м. Опрос датчиков мог задаваться программно и был установлен с периодом 30 с. Точность измерения температуры составляла +/– 0,1 °С.

Графики температурных стратификаций по глубине воды озера в период ледостава и фазу летнего прогрева приведены на рис. 7 и 8.

Анализ полученных термограмм озерной воды показал следующее:

– минимальная температура воды 0–0,5 °С была зарегистрирована подо льдом;

– распределение температур воды по глубине на расчищенной и нерасчищенной части озера в целом различается, как для периода ледостава, так и фазы летнего прогрева, что объясняется влиянием придонных источников;

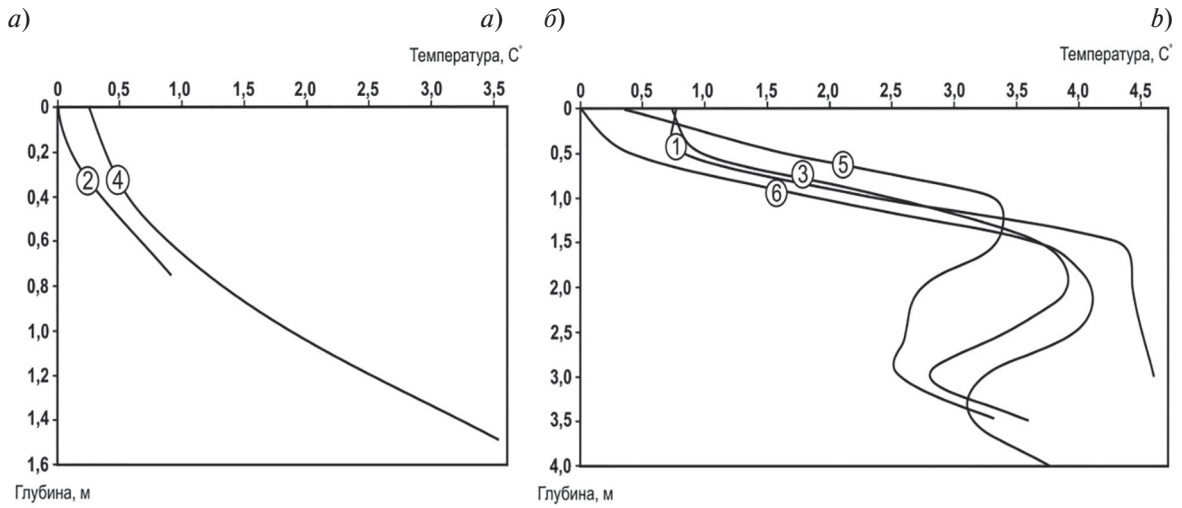

Рис. 7. Графики температуры воды на нерасчищенной (*а*) и расчищенной (*б*) части озера Манжерокского во время ледостава

Fig. 7. Graphs of the water temperature on the untreated (*a*) and cleared (*b*) parts of Lake Manzheroksky during the ice age

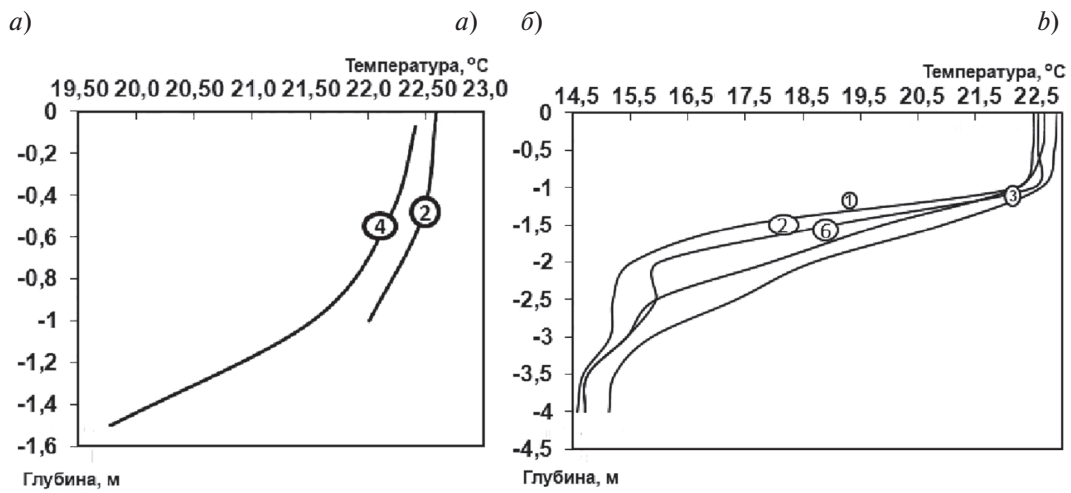

Рис. 8. График температуры воды на нерасчищенной части Манжерокского озера (*а*) и на расчищенной части (*б*) в фазу летнего прогрева

Fig. 8. Graph of the water temperature on the untreated part of Lake Manzheroksky (*a*) and on the cleared part (*b*) during the summer warming phase

– для периода ледостава графики температур воды на площади расчистки дна озера однотипны и в целом характеризуются постепенным увеличением до 3–4 °С на глубине 1–3 м и затем ее стабилизацией и небольшим увеличением в придонной части озера. Это указывает на поступление со дна озера более теплых (> 4 °С) подземных вод и их смешивание с поверхностным слоем на глубинах 1–3 м (см. рис. 6.). Подтверждение этому дают и измерения вертикальной и горизонтальной скорости движения воды в отмеченных местах (см. табл. 4 и 5):

– в фазу летнего прогрева воды в озере ход температурной стратификации по глубине относительно периода ледостава меняется на противоположный (рис. 8, *а* и *б*) с характерным влиянием на динамику температуры грунтовых источников на глубинах ниже 2,5 м.

5. Заключение и выводы

На основании проведенных в 2021 г. гидрофизических исследований оз. Манжерокское в период ледостава и фазу летнего прогрева воды были получены данные о спектральном показателе ослабления света в диапазоне 400–800 нм, обнаружены и измерены скорости горизонтального и вертикального движения воды, обусловленные грунтовыми источниками, открывшимися после дноуглубления озера в 2017–2018 гг., измерена прозрачность воды по белому диску, определена стратификация температуры по глубине на разных участках акватории. Сравнение весенних и летних данных динамики спектрального показателя ослабления света на разных глубинах для озера Манжерокского с другими пресноводными слабопроточными озерами показало, что этот гидрооптический параметр для исследуемого озера максимален в период ледостава, в то время как для других озер отмечается его минимум в эту фазу годового лимнического цикла. Повышенная мутность и низкие значения относительной прозрачности воды озера по белому диску до 15–20 см определяют открывшиеся придонные источники грунтовых вод, которые способствовали размыву и растворению не полностью удаленного илового слоя и противодействовали оседанию взвеси. Это подтверждается обнаруженными вертикальными потоками воды у дна и значительной неоднородностью температурной стратификации по глубине.

Результаты экспедиционных исследований в июле 2023 г. показали существенные изменения гидрофизических характеристик по сравнению с 2021 г., свидетельствующие об улучшении экологического состояния озера в многолетнем аспекте за период 2018–2023 гг.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к. б. н., н. с. Ковешникову М.И. за содействие в отборе водных проб и проведении измерений.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Ph.D., Researcher. Koveshnikov M.I. for assistance in collecting water samples and carrying out measurements.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН по проекту FUFZ-2021-0001 при частичной финансовой поддержке экспедиционных исследований Всесезонным курортом Манжерок.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences under the project FUFZ-2021-0001 with partial financial support for expeditionary research by the Manzherok all-season resort.

Литература

1. *Робертус Ю.В., Кивацкая А.В., Любимов Р.В., Ситникова В.А.* Экологическое состояние акватории Манжерокского озера // Природные ресурсы Горного Алтая. 2019. № 1–2. С. 85–89.
2. *Робертус Ю.В., Пузанов А.В., Кивацкая А.В., Любимов Р.В.* Экологические последствия реабилитации Манжерокского озера (Республика Алтай) // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1 (85). С. 41–49. doi:10.23968/2305-3488.2021.26.1.41-49

3. Методика (утв. Минприроды РФ 30.11.1992) «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» [Электронный ресурс]: СПС «Консультант Плюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/ (дата обращения: 04.11.2021).
4. *Безматерных Д.М., Кириллов В.В., Ермолаева Н.И., Киприянова Л.М., Яныгина Л.В., Митрофанова Е.Ю, Вдовина О.Н. Зарубина Е.Ю* Влияние дноуглубительных работ на санитарно-микробиологические и гидробиологические характеристики озера Манжерокского (Республика Алтай) // Водное хозяйство России. 2020. № 3. С. 106–127. doi:10.35567/1999-4508-2020-3-8
5. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б.* Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края/отв. редактор В.Н. Седалищев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.
6. *Dokulil M.T., Herziga A., Somogyib B. et al.* Winter conditions in six European shallow lakes: a comparative synopsis // Estonian Journal Ecology. 2014. Vol. 63, N 3. P. 111. doi:10.3176/eco.2014.3.01
7. *Суторихин И.А., Литвиненко С.А., Соловьев В.А., Каменев А.Р.* Измерение малых скоростей подледных течений на разных глубинах Телецкого озера // Ползуновский альманах. 2021. № 4. С. 39–42.
8. *Sutorikhin I.A., Vinokurov Yu.I., Vinokurova G.V., Kirillov V.V., Litvinenko S.A., Robertus Yu.V., Soloviev V.A.* Hydrophysical Researches of Manzherokskoye Lake Water After Dredging // Proc. SPIE12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123414J. doi:10.1117/12.2644897
9. *Зуев В.В., Кураков С.А., Суторихин И.А. и др. 2014.* Автономный многоканальный измерительный комплекс для регистрации метеорологических и гидрофизических параметров. Измерение, контроль, информатизация // Материалы XV международной научно-технической конференции. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. С. 186.
10. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2019 году / Под ред. Ю.В. Робертуса. Горно-Алтайск, 2019. 120 с.

References

1. Robertus Yu.V., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V., Sitnikova V.A. Ecological state of the water area of Lake Manzherok. *Natural Resources of Gorny Altai*. 2019;1–2:85–89 (in Russian).
2. Robertus Yu.V., Puzanov A.V., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V. Environmental consequences of the rehabilitation of Lake Manzherok (Altai Republic). *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021;1(85):41–49. doi:10.23968/2305-3488.2021.26.1.41-49 (in Russian).
3. Methodology (approved by the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation on November 30, 1992) “Criteria for assessing the environmental situation of territories to identify zones of environmental emergency and zones of environmental disaster” [Electronic resource]: SPS “Consultant Plus”. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90799/ (date of access: 11.04.2021) (in Russian).
4. Bezmaternykh D.M., Kirillov V.V., Ermolaeva N.I., Kipriyanova L.M., Yanygina L.V., Mitrofanova E. Yu., Vdovina O.N. Zarubina E. Yu. Influence of dredging on the sanitary-microbiological and hydrobiological characteristics of Lake Manzherokskoye (Altai Republic). *Water Management of Russia*. 2020;3:106–127. doi:10.35567/1999-4508-2020-3-8. (in Russian)
5. Sutorikhin I.A., Bukaty V.I., Kharlamova N.F., Akulova O.B. *Climatic conditions and hydro-optical characteristics of freshwater lakes in the Altai Territory*/resp. editor V.N. Sedalishchev. Novosibirsk: Publishing house SB RAS; 2016. 162 p. (in Russian).
6. Dokulil M.T., Herziga A., Somogyib B. et al. Winter conditions in six European shallow lakes: a comparative synopsis. *Estonian Journal Ecology*. 2014;63(3):111. doi:10.3176/eco.2014.3.01
7. Sutorikhin I.A., Litvinenko S.A., Solovyov V.A., Kamenev A.R. Measurement of low velocities of subglacial currents at different depths of Lake Teletskoye. *Polzunovsky Almanac*. 2021;4:39–42 (in Russian).
8. Sutorikhin I.A., Vinokurov Yu.I., Vinokurova G.V., Kirillov V.V., Litvinenko S.A., Robertus Yu.V., Soloviev V.A. Hydrophysical Researches of Manzherokskoye Lake Water After Dredging. *Proceedings SPIE12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 123414J. doi:10.1117/12.2644897
9. Zuev V.V., Kurakov S.A., Sutorikhin I.A. et al. Autonomous multichannel measuring complex for recording meteorological and hydrophysical parameters. Measurement, control, informatization. *Mater. XV International Scientific-Technical Conf. Barnaul*, *AltGTU Publishing House*. 2014. P. 186. (in Russian).
10. Report on the state and protection of the environment of the Altai Republic in 2019 / Ed. Yu.V. Robertus. Gorno-Altaisk: 2019. 120 p. (in Russian).

Об авторах

СУТОРИХИН Игорь Анатольевич, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН, ведущий научный сотрудник ФИЦ ИВТ доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0003-3029-7215, Scopus AuthorID: 12789775100, WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-код (РИНЦ): 6819-2512, e-mail: sia@iwep.ru

КИРИЛЛОВ Владимир Викторович, заведующий Лабораторией водной экологии ИВЭП СО РАН, кандидат биологических нук, доцент, ORCID: 0000-0001-9626-7153, Scopus AuthorID: 35233910500, WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-код (РИНЦ): 7749-7710, e-mail: vkirillov@iwep.ru

ЛИТВИНЕНКО Светлана Александровна, младший научный сотрудник ИВЭП СО РАН, кандидат технических наук, SPIN-код (РИНЦ): 8426-5747, e-mail: gsa@iwep.ru

СВИРИДОВ Роман Константинович, лаборант ИВЭП СО РАН, e-mail: roman-sviridov@outlock.com

СОЛОВЬЕВ Виталий Андреевич, старший преподаватель кафедры ИТ АлтГТУ им. И.И, Ползунова, ORCID: 0000-0002-8856-5094, Scopus AuthorID: 56121765000, SPIN-код (РИНЦ): 3957-9951, e-mail: solvitali@mail.ru

ФЕТТЕР Глеб Витальевич, младший научный сотрудник ИВЭП СО РАН, ORCID: 0000-0002-1313-7730, Scopus AuthorID: 57224525966, WoS ResearcherID: LKO-1902-2024, SPIN-код (РИНЦ): 4505-3833, e-mail: gleb_fetter@mail.ru