

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ И СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА НА УЧАСТКЕ ВЕРХНЕЙ ОБИ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ

E-mail: akulova8282@mail.ru, v.bukaty@mail.ru, heller53@mail.ru, pshipunov95@gmail.com, paradossky@mail.ru

Ключевые слова: река Обь; показатель ослабления света; показатель поглощения света жёлтым веществом; оптически активные компоненты воды; хлорофилл; трофический статус.

Дата поступления: 12.12.2025. Принята к печати: 13.02.2026

В настоящее время усиливающееся антропогенное воздействие на крупные водотоки и водоёмы неизбежно приводит к снижению класса качества их вод. Здесь важное место занимает изучение сезонных изменений основных оптически активных компонентов природных вод (чистой воды, окрашенных растворённых органических веществ, органо-минеральной взвеси и водорослей фитопланктона), влияющих на оптические характеристики воды, что служит основой успешного их применения для диагностики экологического состояния одного из крупных водотоков Сибири – реки Обь.

Оптические характеристики рек мало изучены, но имеющаяся информация показывает, что реки заметно контрастируют с озёрами [Davies-Colley, 1990; Карбышев, Павлов, 2000; Davies-Colley et al., 2003; Pawlak et al., 2003; Julian et al., 2008; Lobo et al., 2017; Akulova et al., 2021]. В отличие от озёр, реки представляют собой сравнительно мелководные экосистемы, характеризующиеся однонаправленностью течений. Кроме того, течения в реках переносят частицы органо-минеральной взвеси, тогда как в озёрах взвешенные вещества имеют тенденцию оседать с глубиной. Эти принципиальные различия между стоячими и проточными водами имеют серьёзные последствия для оптических характеристик таких как, прозрачность и цвет воды. Будет справедливо отметить, что реки оптически более сложны, чем озёра. Оценка качества речной воды и контроль за состоянием таких крупных водотоков как Обь необходимы для проведения и выполнения комплекса водоохраных мероприятий,

направленных на предотвращение отрицательных экологических последствий антропогенного воздействия, защиту рек от истощения, загрязнения и эвтрофикации.

Целью работы явилось исследование некоторых первичных гидрооптических характеристик – показателя ослабления света, показателя поглощения света жёлтым веществом и содержание главного пигмента водорослей фитопланктона – хлорофилла *a* для оценки качества воды и экологического статуса Верхней Оби в период открытой воды.

Материалы и методы

В летний период (23–30 июня 2025 г.) на десяти створах верхнего течения реки Обь на участке ниже Бийска до с. Елунино собрано и обработано 26 гидрооптических и гидробиологических проб речной воды с поверхностного горизонта. В полевых условиях проведено 208 отдельных измерений коэффициента пропускания T (спектральной прозрачности) воды на портативном спектрофотометре DR1900 до и после фильтрации проб через мембраны с диаметром пор 0.22 мкм.

Для определения коэффициента пропускания воды применили спектрофотометрический метод, в основу которого, как известно, положен принцип измерения отношения интенсивностей двух световых потоков, проходящих через объёмы с исследуемой и эталонной средами. Расчёты спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda')$ (при натуральном основании логарифма) провели по формуле, вытекающей из закона Бугера:

$$\varepsilon(\lambda') = (1/L) \cdot \ln(1/T(\lambda')), \quad (1)$$

где λ' – длина волны света, L – длина оптического пути (размер кюветы), $T(\lambda') = I(\lambda') / I_0(\lambda')$ – коэффициент пропускания слоя водной среды в относительных единицах, $I(\lambda')$, $I_0(\lambda')$ – интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно.

Показатель поглощения света жёлтым веществом $\kappa_{ys}(\lambda')$ определили после измерения коэффициента пропускания воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0.22 мкм. В эксперименте использовали кварцевые кюветы длиной $L = 10$ мм. Максимальная абсолютная погрешность расчёта спектрального показателя ослабления света и спектрального показателя поглощения света жёлтым веществом для створов реки

Обь составила 0.5 м^{-1} .

Концентрации основного фотосинтетического пигмента водорослей фитопланктона – хлорофилла a определили в Лаборатории гидробиологии стандартным спектрофотометрическим методом в соответствии с ГОСТом 17.1.4.02-90. Дополнительно рассчитали концентрации жёлтого вещества согласно работам [Nyquist, 1979; Маньковский, 2015].

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов речной воды (взвеси, жёлтого вещества, хлорофилла a и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda')$ рассчитали с использованием модифицированной полуэмпирической спектральной модели показателя ослабления света [Акулова, 2015], которая впервые предложена О.В. Копелевичем [1983] и имеет вид:

$$\varepsilon(\lambda') = \kappa_{chl}(\lambda') + \kappa_{ys}(\lambda') + \sigma_{mol}(\lambda') + \sigma_s(\lambda') + \kappa_{pw}(\lambda') \quad (2)$$

где $\kappa_{chl}(\lambda')$ и $\kappa_{ys}(\lambda')$ – спектральные показатели поглощения хлорофиллом a и жёлтым веществом, соответственно, $\sigma_{mol}(\lambda')$ – спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $\sigma_s(\lambda')$ – спектральный показатель рассеяния взвесью, $\kappa_{pw}(\lambda')$ – спектральный показатель поглощения чистой водой. Как видно из данного выражения спектральное ослабление света описано с помощью трёхпараметрической модели. Рассчитанный нами показатель ослабления по формуле (1) не содержит данные о показателе ослабления чистой водой $\varepsilon_{pw}(\lambda') = \kappa_{pw}(\lambda') + \sigma_{mol}(\lambda')$. Таким образом, в формуле (2) значения $\varepsilon(\lambda')$, полученные из измерений на спектрофотометре, должны суммироваться со значениями $\varepsilon_{pw}(\lambda')$,

взятых из справочных данных [Pope, Fry, 1997; Smith, Baker, 1981], что и выполнено в наших исследованиях.

Показатель поглощения хлорофиллом рассчитали по формуле:

$$\kappa_{chl}(\lambda') = \kappa_{sp.chl}(\lambda') \cdot C_{chl}, \quad (3)$$

где C_{chl} – концентрация хлорофилла a , в мг/м^3 , $\kappa_{sp.chl}(\lambda')$ – удельный показатель поглощения хлорофиллом, в $\text{м}^2/\text{мг}$, его значения приведены в работе [Копелевич, 1983]. Для расчётов $\kappa_{pw}(\lambda')$ использовали табличные данные [Pope, Fry, 1997; Smith, Baker, 1981], а для $\sigma_{mol}(\lambda')$ – взяли из работы [Smith, Baker, 1981].

Так как в эксперименте определяли параметр $\kappa_{ys}(\lambda')$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_s(\lambda')$ можно найти по формуле:

$$\sigma_s(\lambda') = \varepsilon(\lambda') - [\kappa_{chl}(\lambda') + \kappa_{ys}(\lambda') + \sigma_{mol}(\lambda') + \kappa_{pw}(\lambda')]. \quad (4)$$

Трофический статус и класс качества воды на исследуемых участках реки оценили в соответствии с классификациями, представленных в работах [Оксиюк и др., 1993; Трифонова, 1993].

Результаты и обсуждение

В период 23–30 июня 2025 г. в верхнем течении реки Обь (на участке ниже г. Бийска до села Елунино) были проведены комплексные экспедиционные исследования, в результате которых были получены натурные данные по спектральным показателям ослабления света $\varepsilon(\lambda')$ и поглощения света жёлтым веществом $\kappa_{ys}(\lambda')$ в воде по измерениям коэффициента пропускания T на четырёх длинах волн – 430, 450, 550 и 670 нм. Определены концентрации хлорофилла a и жёлтого вещества. Рассчитаны относительные спектральные вклады основных оптически активных компонентов речной воды (жёлтого вещества, взвеси, хлорофилла и чистой воды) в показатель ослабления света для десяти исследуемых створов реки Обь.

В результате расчётов получено, что значения спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda')$ на 26 станциях Верхней Оби в период исследования варьировали в диапазоне 6.6–19.0 м⁻¹, что соответствует эвтрофному типу водотоков. Максимальные значения $\varepsilon(\lambda')$ (до 19.0 м⁻¹) зафиксированы у левого берега р. Обь, ниже Елунино (замыкающий створ), минимальные значения $\varepsilon(\lambda')$ (6.6 м⁻¹) – на первом створе – р. Бия, ниже г. Бийска. Величины свыше 18.0 м⁻¹ наблюдались на р. Катунь, Катунское. Значения показателя поглощения све-

та жёлтым веществом $\kappa_{ys}(\lambda')$ находились в пределах 5.7–12.8 м⁻¹, данные представлены в табл. 1.

Аналогичный подход, основанный на физической модели ослабления света, был ранее использован при исследовании сезонной динамики и пространственного распределения некоторых оптических характеристик – ε (300–800) и κ_{ys} (440) речных вод в Новой Зеландии [Davies-Colley et al., 2003; Davies-Colley et al., 2014], Европе [Pawlak et al., 2003], США [Julian et al., 2008] и Южной Америке [Costa et al., 2013; Lobo et al., 2017].

Полученные нами данные для участка Верхней Оби величины показателя поглощения света жёлтым веществом κ_{ys} на длине волны $\lambda' = 450$ нм варьировали в пределах 6.6–9.5 м⁻¹, значения концентрации жёлтого вещества C_{ys} в период исследования изменялись в диапазоне от 31.1 до 44.8 г/м³, амплитуда колебаний мало отличалась для различных створов. Максимальная величина C_{ys} зафиксирована на замыкающем створе (табл. 2).

Универсальным экологическим маркером степени развития и фотосинтетической активности водорослей фитопланктона считается хлорофилл a , его уровень содержания положен в основу различных классификаций, разработанных для оценки трофического статуса водоёмов (водотоков), качества воды и включён в систему комплексных мониторинговых наблюдений [Carlson, 1977; Оксиюк и др., 1993; Трифонова, 1993; Сиротский, 2005; Сиротский и др., 2011; Котовщиков, Долматова, 2018; Ярушина и др., 2024].

Таблица 1

Изменения спектральных показателей ослабления света $\varepsilon(\lambda')$ и поглощения света жёлтым веществом $\kappa_{ys}(\lambda')$ в поверхностном слое Верхней Оби на разных створах

Table 1

Changes in the spectral coefficient of light attenuation $\varepsilon(\lambda')$ and coefficient of light absorption by yellow substance $\kappa_{ys}(\lambda')$ in the surface layer of the Upper Ob on different sections

Название створа	Станция	Расположение станции на створе	$\varepsilon(\lambda')$, M^{-1}			$\kappa_{ys}(\lambda')$, M^{-1}		
			$\lambda'=430$ нм	$\lambda'=550$ нм	$\lambda'=670$ нм	$\lambda'=430$ нм	$\lambda'=550$ нм	$\lambda'=670$ нм
р. Бия, ниже г. Бийска	2.1	левый берег	8.6	6.9	6.8	7.4	6.1	6.0
	2.2	середина	8.6	6.7	6.6	7.2	6.0	5.9
	2.3	правый берег	8.6	6.7	6.6	7.3	6.1	5.9
р. Катунь, Катунское	3.1	левый берег	18.5	13.9	12.6	6.8	6.0	6.4
	3.3	правый берег	18.2	14.5	11.5	6.9	6.8	6.3
р. Обь, Фоминское	4.1	левый берег	15.6	12.4	11.1	6.8	6.2	6.0
	4.2	середина	16.3	12.0	11.3	6.9	6.1	5.9
	4.3	правый берег	8.8	7.0	6.7	7.3	6.2	5.7
р. Обь, Усть-Ануй	8.1	левый берег	14.6	11.7	10.4	7.5	6.3	6.0
	8.2	середина	17.0	11.9	10.7	7.0	6.2	6.0
	8.3	правый берег	8.8	7.0	6.8	7.5	6.2	6.0
р. Обь, ниже Солдатово	10'.1	левый берег	12.8	10.1	9.5	7.0	6.2	5.8
	10'.2	середина	12.3	9.9	9.2	7.2	6.2	5.9
	10'.3	правый берег	10.4	8.3	8.0	7.5	6.4	6.0
р. Обь, выше Солдатово	10.3	правый берег	9.7	7.9	7.5	7.5	6.3	6.0
р. Чарыш	12	левый берег	11.7	8.8	8.3	7.2	6.3	6.0
р. Обь, Вяткино	13.3	правый берег	13.7	13.0	10.7	10.5	6.8	6.6
р. Обь, Рассказиха	18.3	правый берег	12.8	10.0	8.7	7.4	6.8	6.4
р. Обь, выше Усть-Чумыш	24.1	левый берег	16.1	13.9	12.6	12.8	10.9	6.9
	24.3	правый берег	15.9	12.6	12.2	8.6	8.3	6.9
р. Обь, ниже Усть-Чумыш	24'.1	левый берег	16.5	13.2	12.4	8.3	6.9	6.6
	24'.3	правый берег	16.0	13.2	13.0	7.8	6.5	6.1
р. Обь, выше Елунино	26.1	левый берег	17.2	11.0	10.0	8.1	7.5	6.7
	26.3	правый берег	14.3	10.7	10.5	7.7	6.8	6.2
р. Обь, ниже Елунино	26'.1	левый берег	19.0	14.6	14.1	8.6	6.7	6.1
	26'.3	правый берег	18.2	13.5	13.0	8.8	7.2	6.7

Концентрация хлорофилла a за время наблюдений на исследуемых створах Верхней Оби варьировала в широких пределах от 0.8 до 19.3 мг/м³ (табл. 3). Наибольшие значения $C_{chl} a$ – свыше 15.0 мг/м³ зарегистрированы на двух замыкающих створах (уровень эвтрофных водотоков), наименьшее – 0.8 мг/м³ в середине ство-

ра 4.2. р. Обь, Фоминское (уровень олиготрофных водотоков). По классификации [Трифорова, 1993] концентрации фотосинтетических пигментов в период открытой воды при среднем значении (по 10 створам) $C_{chl} a = 8.5$ мг/м³ исследуемый речной участок соответствует уровню мезотрофных водотоков.

Таблица 2

Показатель поглощения света жёлтым веществом κ_{ys} при $\lambda' = 450$ нм и концентрация жёлтого вещества C_{ys} в поверхностном слое Верхней Оби

Table 2

The coefficient of light absorption by yellow substance κ_{ys} at $\lambda' = 450$ nm and the concentration of yellow substance C_{ys} in the surface layer of the Upper Ob

Название створа	Станция	Расположение станции на створе	$\kappa_{ys}(450), м^{-1}$	$C_{ys}, г/м^3$
р. Бия, ниже г. Бийска	2.1	левый берег	6.9	32.5
	2.2	середина	6.9	32.5
	2.3	правый берег	7.3	34.4
р. Катунь, Катунское	3.1	левый берег	6.8	32.1
	3.3	правый берег	6.7	31.6
р. Обь, Фоминское	4.1	левый берег	6.6	31.1
	4.2	середина	6.7	31.6
	4.3	правый берег	6.9	32.5
р. Обь, Усть-Ануй	8.1	левый берег	7.0	33.0
	8.2	середина	6.7	31.6
	8.3	правый берег	6.9	32.5
р. Обь, ниже Солдатово	10'.1	левый берег	6.9	32.5
	10'.2	середина	7.0	33.0
	10'.3	правый берег	7.2	34.0
р. Обь, выше Солдатово	10.3	правый берег	6.8	32.1
р. Чарыш	12	левый берег	7.0	33.0
р. Обь, Вяткино	13.3	правый берег	7.6	35.8
р. Обь, Рассказиха	18.3	правый берег	6.9	32.5
р. Обь, выше Усть-Чумыш	24.1	левый берег	9.3	43.9
	24.3	правый берег	8.2	38.7
р. Обь, ниже Усть-Чумыш	24'.1	левый берег	7.2	34.0
	24'.3	правый берег	7.6	35.8
р. Обь, выше Елунино	26.1	левый берег	8.2	38.7
	26.3	правый берег	7.2	34.0
р. Обь, ниже Елунино	26'.1	левый берег	7.6	35.8
	26'.3	правый берег	9.5	44.8

В результате расчётов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов речной воды для 26 разных станций на 10 исследуемых створах реки Обь получено, что максимальное влияние на суммарное ослабление света в речной воде оказывают жёлтое вещество и взвесь (табл. 4).

Наибольший вклад жёлтого вещества при $\lambda' = 430$ нм приходится на первый

створ (р. Бия, ниже г. Бийска), где он составляет 86.0%. При длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьирует в пределах от 43.1% (левый берег створа р. Катунь, Катунское) до 91.0% (правый берег створа р. Бия, ниже г. Бийска). При длине волны 670 нм вклад жёлтого вещества – от 43.3% (левый берег створа р. Обь, ниже Елунино) до 89.4% (середина и правый берег створа р. Бия, ниже г. Бийска).

Таблица 3

Концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое Верхней Оби

Table 3

Chlorophyll *a* concentrations in the Upper Ob surface layer

Название створа	Станция	Расположение станции на створе	$C_{chl} a$, мг/м ³
р. Бия, ниже г. Бийска	2.1	левый берег	2.1
	2.2	середина	1.8
	2.3	правый берег	2.2
р. Катунь, Катунское	3.1	левый берег	1.3
	3.3	правый берег	1.1
р. Обь, Фоминское	4.1	левый берег	1.6
	4.2	середина	0.8
	4.3	правый берег	4.6
р. Обь, Усть-Ануй	8.1	левый берег	10.3
	8.2	середина	1.7
	8.3	правый берег	3.5
р. Обь, ниже Солдатово	10'.1	левый берег	7.8
	10'.2	середина	5.6
	10'.3	правый берег	5.8
р. Обь, выше Солдатово	10.3	правый берег	5.9
р. Чарыш	12	левый берег	16.7
р. Обь, Вяткино	13.3	правый берег	4.8
р. Обь, Рассказиха	18.3	правый берег	12.2
р. Обь, выше Усть-Чумыш	24.1	левый берег	18.5
	24.3	правый берег	16.5
р. Обь, ниже Усть-Чумыш	24'.1	левый берег	15.0
	24'.3	правый берег	15.8
р. Обь, выше Елунино	26.1	левый берег	18.6
	26.3	правый берег	19.3
р. Обь, ниже Елунино	26'.1	левый берег	16.4
	26'.3	правый берег	12.1

Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda' = 430$ нм на станции 3.1 (левый берег створа р. Катунь, Катунское) и составляет 62.6%. Вклад взвеси при $\lambda' = 550$ нм находится в диапазоне от 7.5% (правый берег створа р. Обь, Усть-Ануй) до 56.4% (левый берег створа р. Катунь, Катунское). Вклад взвеси при $\lambda' = 670$ нм – от 2.7% (правый берег створа р. Бия, ниже г. Бийска) до 49.0% (левый берег створа р. Обь, ниже Елунино).

Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda' = 430$ нм на

всех станциях и составляет не более 0.1%, но резко увеличивается в длинноволновой области спектра – до 6.6% при $\lambda' = 670$ нм.

Вклад хлорофилла *a* при $\lambda' = 430$ нм находился в диапазоне от 0.4 (середина створа р. Обь, Фоминское) до 11.4% (станция 12, р. Чарыш), при $\lambda' = 550$ нм – от 0.1% до 1.2%, при $\lambda' = 670$ нм – от 0.3% до 8.0%.

Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет около 0.1%.

Таблица 4

Спектральный вклад компонентов речной воды (%) в показатель ослабления света в
поверхностном слое Верхней Оби

Table 4

Spectral contribution of river water components (%) to the light attenuation coefficient in the
Upper Ob surface layer

$\lambda', \text{ нм}$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda'), \text{ м}^{-1}$
	$\frac{\kappa_{pw}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\kappa_{ys}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\kappa_{chl}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\sigma_s(\lambda') + \sigma_{mol}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	
р. Бия, ниже г. Бийска, левый берег, станция 2.1 (при $C_{chl} = 2.1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	86.0	1.9	12.0	8.6
550	0.8	88.4	0.2	10.6	6.9
670	6.4	88.2	1.2	4.2	6.8
р. Бия, ниже г. Бийска, середина, станция 2.2 (при $C_{chl} = 1.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	83.7	1.7	14.5	8.6
550	0.8	89.5	0.1	9.6	6.7
670	6.6	89.4	1.0	3.0	6.6
р. Бия, ниже г. Бийска, правый берег, станция 2.3 (при $C_{chl} = 2.2 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	84.8	2.0	13.1	8.6
550	0.8	91.0	0.1	8.1	6.7
670	6.6	89.4	1.3	2.7	6.6
р. Катунь, Катунское, левый берег, станция 3.1 (при $C_{chl} = 1.3 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	36.7	0.6	62.6	18.5
550	0.4	43.1	0.1	56.4	13.9
670	3.4	50.8	0.4	45.4	12.6
р. Катунь, Катунское, правый берег, станция 3.3 (при $C_{chl} = 1.1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	37.9	0.5	61.5	18.2
550	0.4	46.9	0.1	52.6	14.5
670	3.8	54.8	0.4	41.0	11.5
р. Обь, Фоминское, левый берег, станция 4.1 (при $C_{chl} = 1.6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	43.6	0.8	55.5	15.6
550	0.4	50.0	0.1	49.5	12.4
670	3.9	54.0	0.6	41.5	11.1
р. Обь, Фоминское, середина, станция 4.2 (при $C_{chl} = 0.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	42.3	0.4	57.2	16.3
550	0.5	50.8	0.1	48.6	12.0
670	3.8	52.2	0.3	43.7	11.3
р. Обь, Фоминское, правый берег, станция 4.3 (при $C_{chl} = 4.6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	82.9	4.2	12.8	8.8
550	0.8	88.6	0.3	10.3	7.0
670	6.5	85.0	2.7	5.8	6.7
р. Обь, Усть-Ануй, левый берег, станция 8.1 (при $C_{chl} = 10.3 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	51.4	5.6	42.9	14.6
550	0.5	53.8	0.6	45.1	11.7
670	4.2	57.7	4.0	34.1	10.4
р. Обь, Усть-Ануй, середина, станция 8.2 (при $C_{chl} = 1.7 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	41.2	0.8	57.9	17.0
550	0.5	52.1	0.1	47.3	11.9
670	4.1	56.1	0.6	39.2	10.7
р. Обь, Усть-Ануй, правый берег, станция 8.3 (при $C_{chl} = 3.5 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	85.2	3.2	11.5	8.8
550	0.8	88.5	0.3	7.5	7.0
670	6.4	88.2	2.1	3.3	6.8
р. Обь, ниже Солдатова, левый берег, станция 10'.1 (при $C_{chl} = 7.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	54.6	4.8	40.5	12.8
550	0.6	61.4	0.5	37.5	10.1
670	4.6	61.0	3.3	31.1	9.5

$\lambda', \text{ нм}$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda'), \text{ м}^{-1}$
	$\frac{\kappa_{pw}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\kappa_{ys}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\kappa_{chl}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	$\frac{\sigma_s(\lambda') + \sigma_{mol}(\lambda')}{\varepsilon(\lambda')}$	
р. Обь, ниже Солдатово, середина, станция 10'.2 (при $C_{chl} = 5.6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	58.5	3.6	37.8	12.3
550	0.6	62.6	0.4	36.4	9.9
670	4.7	64.1	2.4	28.8	9.2
р. Обь, ниже Солдатово, правый берег, станция 10'.3 (при $C_{chl} = 5.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	72.1	4.5	23.3	10.4
550	0.7	77.1	0.4	21.8	8.3
670	5.4	75.0	2.9	16.7	8.0
р. Обь, выше Солдатово, правый берег, станция 10.3 (при $C_{chl} = 5.9 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	77.3	4.8	17.8	9.7
550	0.7	79.7	0.5	19.1	7.9
670	5.8	80.0	3.5	10.7	7.5
р. Чарыш, левый берег, станция 12 (при $C_{chl} = 16.7 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	61.5	11.4	27.0	11.7
550	0.6	71.6	1.2	26.6	8.8
670	5.2	72.3	8.0	14.5	8.3
р. Обь, Вяткино, правый берег, станция 13.3 (при $C_{chl} = 4.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	76.6	2.8	20.5	13.7
550	0.4	52.3	0.2	47.1	13.0
670	4.1	61.6	1.8	32.5	10.7
р. Обь, Рассказиха, правый берег, станция 18.3 (при $C_{chl} = 12.2 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	57.8	7.6	34.5	12.8
550	0.5	68.0	0.8	30.7	10.0
670	5.0	73.6	5.6	15.8	8.7
р. Обь, выше Усть-Чумыш, левый берег, станция 24.1 (при $C_{chl} = 18.5 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	79.5	9.1	11.3	16.1
550	0.4	78.4	0.8	20.4	13.9
670	3.4	54.7	5.8	36.1	12.6
р. Обь, выше Усть-Чумыш, правый берег, станция 24.3 (при $C_{chl} = 16.5 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	54.0	8.3	37.6	15.9
550	0.4	65.8	0.8	33.0	12.6
670	3.5	56.5	5.4	34.6	12.2
р. Обь, ниже Усть-Чумыш, левый берег, станция 24'.1 (при $C_{chl} = 15.0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	50.3	7.3	42.3	16.5
550	0.4	52.2	0.7	46.7	13.2
670	3.5	53.2	4.8	38.5	12.4
р. Обь, ниже Усть-Чумыш, правый берег, станция 24'.3 (при $C_{chl} = 15.8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	48.8	7.9	43.2	16.0
550	0.4	49.2	0.8	49.6	13.2
670	3.3	46.9	4.8	45.0	13.0
р. Обь, выше Елунино, левый берег, станция 26.1 (при $C_{chl} = 18.6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	47.1	8.6	44.2	17.2
550	0.5	68.2	1.1	30.2	11.0
670	4.3	67.0	7.4	21.3	10.0
р. Обь, выше Елунино, правый берег, станция 26.3 (при $C_{chl} = 19.3 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	53.8	10.8	35.3	14.3
550	0.5	63.5	1.2	34.8	10.7
670	4.1	59.0	7.3	29.6	10.5
р. Обь, ниже Елунино, левый берег, станция 26'.1 (при $C_{chl} = 16.4 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	45.3	6.9	47.7	19.0
550	0.4	45.9	0.7	53.0	14.6
670	3.1	43.3	4.6	49.0	14.1
р. Обь, ниже Елунино, правый берег, станция 26'.3 (при $C_{chl} = 12.1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0.1	48.4	3.8	47.7	18.2
550	0.4	53.3	0.6	45.7	13.5
670	3.3	51.5	3.7	41.5	13.0

Таким образом, для 10 исследуемых створов реки Обь жёлтое вещество и взвесь оказались наиболее значимыми оптически активными компонентами, влияющие на суммарный показатель ослабления света.

В табл. 5 приведены уровни трофности и классы качества воды на десяти створах р. Оби за период исследования.

Согласно классификации [Трифенова, 1993], основанной на содержании хлорофилла *a*, исследованные участки Верхней Оби можно отнести к следующим уровням: эвтрофному (четыре створа), мезотрофному (пять створов), олиготрофному (один створ).

По унифицированной экологической классификации поверхностных вод суши [Оксиюк и др., 1993] речная вода на десяти створах Верхней Оби относится к разрядам от «предельно чистая», что соответствует разряду 1 до «достаточно чистая» – разряду 3а. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических и гидробиологических характеристик при исследовании крупных рек для наблюдения за неоднородностью уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворённых веществ и, следовательно, для мониторинга экологического состояния вод различного типа.

Таблица 5

Уровни трофности и классы качества речной воды на исследуемых створах по содержанию хлорофилла *a*

Table 5

Trophicity levels and river water quality classes at the study sites by chlorophyll *a* content

Номер створа	Название створа	* $C_{chl\ a}$, мг/м ³	Уровень трофности [Трифенова, 1993]	Класс / разряд качества воды [Оксиюк и др., 1993]
1	р. Бия, ниже г. Бийска	2.0	мезотрофный	1 – предельно чистая
2	р. Катунь, Катунское	1.2	олиготрофный	1 – предельно чистая
3	р. Обь, Фоминское	2.3	мезотрофный	1 – предельно чистая
4	р. Обь, Усть-Ануй	5.2	мезотрофный	2 – чистая / 2а – очень чистая
5	р. Обь, ниже и выше Солдатово	6.3	мезотрофный	2 – чистая / 2а – очень чистая
6	р. Чарыш	16.7	эвтрофный	3 – удовлетворительной чистоты / 3а – достаточно чистая
7	р. Обь, Вяткино	4.8	мезотрофный	1 – предельно чистая
8	р. Обь, Рассказиха	12.2	эвтрофный	2 – чистая / 2б – вполне чистая
9	р. Обь, ниже и выше Усть-Чумыш	16.5	эвтрофный	3 – удовлетворительной чистоты / 3а – достаточно чистая
10	р. Обь, ниже и выше Елунино	16.6	эвтрофный	3 – удовлетворительной чистоты / 3а – достаточно чистая

Примечание: * $C_{chl\ a}$, мг/м³ – среднее значение по створу.

Заключение

На десяти участках Верхней Оби, включая устья образующих рек Бия и Катунь, в период 23–30 июня 2025 г. были проведены исследования биооптических характеристик речных вод и получены натурные данные по пространственной неоднородности в летний период спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света жёлтым веществом, концентраций хлорофилла *a* и жёлтого вещества.

В результате экспериментальных данных получено, что рассчитанные значения показателя ослабления света на 26 станциях Верхней Оби варьировали в диапазоне 6.6–19.0 м⁻¹, показателя поглощения света жёлтым веществом – 5.7–12.8 м⁻¹, что соответствует эвтрофному типу водотоков. Уровень трофности по средним значениям концентрации хлорофилла *a* для каждого из десяти исследуемых створов можно оха-

рактеризовать как эвтрофный (для четырёх створов), мезотрофный (для пяти створов) и олиготрофный (для одного створа). По унифицированной экологической классификации поверхностных вод суши по концентрациям хлорофилла *a* речная вода на десяти створах Верхней Оби относится к разрядам от «предельно чистая», что соответствует разряду 1 до «достаточно чистая» – разряду 3а. На основе модифицированной полуэмпирической модели ослабления света выполнен детальный анализ влияния основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, фитопланктона, жёлтого вещества, взвеси) в суммарный показатель ослабления света, что позволило оперативно определить физические параметры отдельных компонентов речной воды – концентрацию хлорофилла *a* и жёлтого вещества, а также трофический статус и класс качества исследуемого водного объекта по его биооптическим свойствам.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Авторы выражают благодарность начальнику отряда канд. биол. наук, ст. науч. сотр. А.В. Котовицикову за организацию полевых выездов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН с использованием оборудования ЦКП НИС ИВЭП СО РАН.

Список литературы

Акулова О.Б. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоёмов (на примере озёр Алтайского края): Дис. ... канд. тех. наук. Барнаул, 2015. 176 с.

ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. Москва: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.

Карбышев С.Ф., Павлов В.Е. Спектральная прозрачность поверхностных вод средней Оби // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 2. С. 171–174.

Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Ред. А.С. Монин. Москва: Наука, 1983. С. 208–235.

Котовщиков А.В., Долматова Л.А. Динамика содержания хлорофилла а в р. Обь и её связь с абиотическими факторами // Биология внутренних вод. 2018. № 1. С. 29–38.

Маньковский В.И. Жёлтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 3. С. 53–61.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, вып. 4. С. 62–76.

Сиротский С.Е. Трофический статус водотоков бассейна рек Буря, Зея, Бурейского и Зейского водохранилищ // Научные основы экологического мониторинга водохранилищ: Матер. Всерос. науч.-практич. конф. (28 февраля – 03 марта 2005 г., Хабаровск). Хабаровск, 2005. С. 95–99.

Сиротский С.Е., Медведева Л.А., Пархомук Ю.В. Трофический статус некоторых водотоков бассейна реки Тимптон (Южная Якутия) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2011. № 5. С. 483–487.

Трифонов И.С. Оценка трофического статуса водоёмов по содержанию хлорофилла а в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоёмов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 158–166.

Ярушина М.И., Мухутдинов В.Ф., Степанов Л.Н. Экологическая оценка состояния водоёмов различного типа бассейна залива Шарапов Шар по концентрации хлорофилла «а» (Средний Ямал) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 71–88. doi:10.35567/19994508-2024-1-71-88

Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. Optical characteristics of water at the mouth of the Ob River // Limnology and Freshwater Biology. 2021. 3. P. 1147–1151. doi: 10.31951/2658-3518-2021-A-3-1147

Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361

Costa M.P.F., Novo E. M.L.M., Telmer K.H. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon // Hydrobiologia. 2013. Vol. 702 (1). P. 171–190. doi: 10.1007/s10750-012-1319-2

Davies-Colley R.J. Frequency distributions of visual water clarity in 12 New Zealand rivers // N. Z. J. Mar. Freshwater Res. 1990. Vol. 24. P. 453–460.

Davies-Colley R.J., Ballantine D., Elliott S., Swales A., Hughes A.O., Gall P.M. Light attenuation – a more effective basis for the management of fine suspended sediment than mass concentration? // Water Science & Technology. 2014. Vol. 69 (9). P. 867–1874. doi: 10.2166/wst.2014.096

Davies-Colley R.J., Vant W.N., Smith D.G. Colour and clarity of natural waters: science and management of optical water quality. New York; London: Ellis Horwood, 2003. 310 p.

Julian J.P., Doyle M.W., Powers S.M., Stanley E.H., Riggsbee J.A. Optical water quality in rivers // *Water Resources Research*. 2008. Vol. 44. W10411. P. 1–19. doi:10.1029/2007WR006457

Lobo F.L., Costa M.P.F., Novo E.M., Telmer K. Effects of small-scale gold mining tailings on the underwater light field in the Tapajós River Basin. Brazilian Amazon // *Remote Sens. Environ.* 2017. Vol. 9. 861. doi:10.3390/rs9080861

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances: Summary of PhD thesis. Göteborg, Sweden, 1979. 200 p.

Pawlak B., Gąsowski R., Banaszak A., Andrzejewska A. Seasonal changes of light attenuation coefficient in selected points of the Oder River in the Szczecin Region. Poland // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2003. Vol. 12, no. 2. P. 221–226.

Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, no. 33. P. 8710–8723. doi:10.1364/AO.36.008710

Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, no. 2. P. 177–184. doi: 10.1364/AO.20.000177

References

Akulova O.B. Razrabotka metodov i izmeritelno-vychislitelnogo kompleksa dlya otsenki ekologicheskikh znachimykh gidroopticheskikh kharakteristik presnovodnykh vodoemov (na primere ozer Altayskogo kraia) [Development of methods and a measuring and computing complex for assessing environmentally significant hydrooptical characteristics of freshwater reservoirs (using the example of lakes in the Altai Region)]: DSc (Cand. of Tech.) thesis. Barnaul, 2015. 176 p. (in Russian).

GOST 17.1.4.02–90. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla *a* [Technique of spectrophotometric determination of chlorophyll *a*]. Moscow: Izd-vo standartov, 2003. P. 587–600. (in Russian).

Karbyshev S.F., Pavlov V.E. Spektralnaya prozrachnost poverkhnostnykh vod sredney Obi [Spectral transparency of surface waters of the middle Ob] // *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean]. 2000. Vol. 13, no. 2. P. 171–174. (in Russian).

Kopelevich O.V. Maloparametricheskaya model opticheskikh svoystv morskoy vody [Low-parameter model of optical properties of seawater] // *Optika okeana*. T. 1. Fizicheskaya optika okeana [Ocean optics. Vol. 1. Physical optics of the ocean] / Ed. A.S. Monin. Moscow: Nauka, 1983. P. 208–235. (in Russian).

Kotovshchikov A.V., Dolmatova L.A. Dinamika soderzhaniya khlorofilla *a* v r. Ob i ee svyaz s abioticheskimi faktorami [Dynamics of chlorophyll *a* content in the Ob River and its

relationship with abiotic factors] // *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology]. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 21–28. (in Russian).

Mankovskiy V. I. Zheltoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh vostochnoy chasti Tropicheskoy Atlantiki [Yellow matter in the surface waters of the eastern Tropical Atlantic] // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal]. 2015. No. 3. P. 53–61. (in Russian).

Oksiyuk O.P., Zhukinskii V.N., Braginskii L.P., Linnik P.N., Kuz'menko M.I., Klenus V.G. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushy [Complex ecological classification of surface waters quality]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological J.]. 1993. Vol. 29, is. 4. P. 62–76. (in Russian).

Sirotskiy S.E. Troficheskiy status vodotokov basseyna rek Bureya, Zeya, Bureyskogo i Zeyskogo vodokhranilishch [Trophic status of the watercourses of the Bureya, Zeya, Bureysky and Zeysky reservoirs] // *Nauchnye osnovy ekologicheskogo monitoringa vodokhranilishch: Mater. Vseros. nauch.-praktich. konf. (28 fevralya – 03 marta 2005 g.)* [Scientific basis of environmental monitoring of reservoirs: Mater. All-Russia. scientific-practical. conf. (February 28 – March 03, 2005)]. Khabarovsk, 2005. P. 95–99. (in Russian).

Sirotskiy S.E., Medvedeva L.A., Parkhomuk Yu.V. Troficheskiy status nekotorykh vodotokov basseyna reki Timplon (Yuzhnaya Yakutiya) [Trophic status of some watercourses of the Timplon River basin (South Yakutia)] // *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova* [Readings in memory of Vladimir Yakovlevich Levanidov]. 2011. no. 5. P. 483–487. (in Russian).

Trifonova I.S. Otsenka troficheskogo statusa vodoemov po sodержaniyu khlorofilla *a* v planktone [Assessment of the trophic status of reservoirs by the content of chlorophyll in plankton] // *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoy produktsii planktona vnutrennikh vodoemov* [Methodological issues of studying the primary production of plankton in inland reservoirs]. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1993. P. 158–166. (in Russian).

Yarushina M.I., Mukhutdinov V.F., Stepanov L.N. Ekologicheskaya otsenka sostoyaniya vodoemov razlichnogo tipa basseyna zaliva Sharapov Shar po kontsentratsii khlorofilla «a» (Sredniy Yamal) [Ecological assessment of the state of reservoirs of various types of the Sharapov Shar Bay basin by the concentration of chlorophyll “a” (Middle Yamal)] // *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2024. No. 1. P. 71–88. (in Russian).

Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. Optical characteristics of water at the mouth of the Ob River // *Limnology and Freshwater Biology*. 2021. 3. P. 1147–1151. doi: 10.31951/2658-3518-2021-A-3-1147

Carlson R.E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361

Costa M.P.F., Novo E. M.L.M., Telmer K.H. Spatial and temporal variability of light attenuation in large rivers of the Amazon // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 702 (1). P. 171–190. doi: 10.1007/s10750-012-1319-2

Davies-Colley R.J. Frequency distributions of visual water clarity in 12 New Zealand rivers // *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* 1990. Vol. 24. P. 453–460.

Davies-Colley R.J., Ballantine D., Elliott S., Swales A., Hughes A.O., Gall P.M. Light attenuation – a more effective basis for the management of fine suspended sediment than mass concentration? // *Water Science & Technology*. 2014. Vol. 69 (9). P. 867–1874. doi: 10.2166/wst.2014.096

Davies-Colley R.J., Vant W.N., Smith D.G. Colour and clarity of natural waters: science and management of optical water quality. New York; London: Ellis Horwood, 2003. 310 p.

Julian J.P., Doyle M.W., Powers S.M., Stanley E.H., Riggsbee J.A. Optical water quality in rivers // *Water Resources Research*. 2008. Vol. 44. W10411. P. 1–19. doi:10.1029/2007WR006457

Lobo F.L., Costa M.P.F., Novo E.M., Telmer K. Effects of small-scale gold mining tailings on the underwater light field in the Tapajós River Basin. Brazilian Amazon // *Remote Sens. Environ.* 2017. Vol. 9. 861. doi:10.3390/rs9080861

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances: Summary of PhD thesis. Göteborg, Sweden, 1979. 200 p.

Pawlak B., Gąsowski R., Banaszak A., Andrzejewska A. Seasonal changes of light attenuation coefficient in selected points of the Oder River in the Szczecin Region. Poland // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2003. Vol. 12, no. 2. P. 221–226.

Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, no. 33. P. 8710–8723. doi:10.1364/AO.36.008710

Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, no. 2. P. 177–184. doi: 10.1364/AO.20.000177

OPTICAL CHARACTERISTICS OF WATER AND CHLOROPHYLL CONTENT IN THE UPPER OB AREA DURING THE OPEN WATER PERIOD

O.B. Akulova, V.I. Bukaty, V.V. Kirillov, P.A. Shipunov, V.L. Paradosky

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

*E-mail: akulova8282@mail.ru, v.bukaty@mail.ru, heller53@mail.ru, pshipunov95@gmail.com,
paradosky@mail.ru*

*Based on field data collected from June 23 to June 30, 2025 at ten selected sections of the upper reaches of the Ob River (in the area below Biysk to the village of Elunino), trophism and water quality class were assessed. The study included an analysis of the primary hydrooptic characteristics – the coefficient of light attenuation and the coefficient of light absorption by yellow substance, as well as the content of the main pigment of phytoplankton – chlorophyll *a*. The values of the spectral coefficient of light attenuation at 26 stations of the Upper Ob varied in the range of 6.6–19.0 m⁻¹, the coefficient of light absorption by yellow substance was – 5.7–12.8 m⁻¹, which corresponds to the eutrophic type of watercourses. According to the average values of chlorophyll *a* concentration, it was obtained that the studied river section (ten sections) can be attributed to the following levels of trophism: eutrophic (four sections), mesotrophic (five sections) and oligotrophic (one section). According to the integrated environmental classification of land surface water quality by chlorophyll concentrations, river water at ten sites of the Upper Ob is classified as «extremely clean» which corresponds to category 1 to «fairly clean» – category 3a. Additionally, the spectral contribution of the main optically active components of water (yellow substance, suspended substance, chlorophyll *a* and pure water) to the light attenuation coefficient for the surface layer of water on of the studied sections was assessed. It was found that the maximum contribution to the total attenuation of light is made by yellow substance and suspension.*

Keywords: Ob River; coefficient of light attenuation; coefficient of light absorption by yellow substance; optically active water components; chlorophyll; trophic status.

Received: December 12, 2025. Accepted: February 13, 2026

Сведения об авторах

Акулова Ольга Борисовна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-3677-090X. E-mail: akulova8282@mail.ru.

Букатый Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0009-0005-1635-0704. E-mail: v.bukaty@mail.ru.

Кириллов Владимир Викторович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией водной экологии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. E-mail: heller53@mail.ru.

Шипунов Петр Алексеевич – инженер лаборатории гидробиологии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. E-mail: pshipunov95@gmail.com.

Парадосский Владимир Леонидович – инженер лаборатории гидробиологии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. E-mail: paradossky@mail.ru.

Information about the authors

Akulova Olga Borisovna – PhD in Technical Sciences, research at Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-3677-090X. E-mail: akulova8282@mail.ru.

Bukaty Vladimir Ivanovich – Dr Sc. in Physics and Mathematics, Professor, chief researcher at Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0009-0005-1635-0704. E-mail: v.bukaty@mail.ru.

Kirillov Vladimir Viktorovich – PhD in Biology, Head of the Aquatic Ecology Laboratory of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: heller53@mail.ru.

Shipunov Petr Alekseevich – Engineer at the Hydrobiology Laboratory of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: pshipunov95@gmail.com.

Paradossky Vladimir Leonidovich – Engineer at the Hydrobiology Laboratory of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: paradossky@mail.ru.