

Пространственно-временные закономерности гидрооптических характеристик реки Обь*

О.Б. Акулова, В.И. Букатый, В.В. Кириллов

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Spatial-Temporal Regularities of Hydrooptical Characteristics of the Ob River

O.B. Akulova, V.I. Bukaty, V.V. Kirillov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Barnaul, Russia)

В результате экспедиционных исследований, проведенных весной (26 марта — 9 апреля 2022 г.) и летом (5–16 июня 2022 г.) в устьевом участке реки Обь на трех гидроморфологических створах «Казым-Мыс», «Азовы» и «Салемал» (ЯНАО) получены новые данные по гидрооптическим характеристикам воды, дана оценка трофического статуса и экологического состояния Нижней Оби. Рассчитаны значения показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ (на четырех характерных длинах волн — 430, 450, 550 и 670 нм), которые за исследуемый период находились в широком диапазоне от 9,3 до 22,1 м⁻¹ в периоды зимней межени при ледоставе и от 7,3 до 33,0 м⁻¹ в период открытой воды в половодье. В результате расчетов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, взвеси, желтого вещества и хлорофилла) в $\varepsilon(\lambda)$ получено, что максимальный вклад на разных горизонтах створов вносит взвесь и желтое вещество. Наряду с этим рассчитан показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{жв}(\lambda)$, его величины весной варьировали в пределах 5,5–9,9 м⁻¹, летом — 3,1–17,0 м⁻¹; измерена относительная прозрачность по белому диску Секки Z. Также получены значения концентраций желтого вещества и основных фотосинтетических пигментов — хлорофиллов *a*, *b*, *c* и каротиноидов. Результаты позволяют дать рекомендации по организации экологического мониторинга и прогноз динамики водных экосистем региона при изменении климата и увеличении антропогенной нагрузки вследствие использования природных ресурсов.

Ключевые слова: спектральная прозрачность воды, спектральные показатели ослабления, поглощения и рассеяния света, прозрачность, физическая модель, желтое вещество, взвесь, хлорофилл.

Field studies conducted in spring (March 26 — April 9, 2022) and summer (June 5–16, 2022) in the Ob River mouth region at the three hydromorphological stations „Kazym-Mys“, „Azovy“, and „Salemal“ (YaNAO) to obtain new data on the hydrooptical characteristics of water in the Lower Ob river. Also, the trophic status and ecological state of the Lower Ob river region were assessed. The greatly varying light attenuation coefficient $\varepsilon(\lambda)$ was calculated at the four characteristic wavelengths of 430, 450, 550, and 670 nm, respectively. It ranges from 9.3 m⁻¹ to 22.1 m⁻¹ during the winter low water (freeze-up) period and from 7.3 m⁻¹ to 33.0 m⁻¹ during the open water (high water) period. The calculated relative spectral contributions of major optically active components of water (pure water, suspension, yellow substance, chlorophyll) to $\varepsilon(\lambda)$ suggest that suspension and yellow substance make up the maximal contribution at different horizons. Additionally, the calculated coefficient of light absorption by yellow substance $\kappa_{js}(\lambda)$ varies within the ranges from 5.5 m⁻¹ to 9.9 m⁻¹ (spring) and from 3.1 m⁻¹ to 17.0 m⁻¹ (summer), respectively. The relative transparency was measured using the Secchi disc. The concentrations of yellow substance and major photosynthetic pigments — chlorophylls *a*, *b*, *c*, and carotenoids — were estimated alongside. The obtained results could be useful for environmental monitoring and predicting the dynamics of aquatic ecosystems in the region under climate change and increased anthropogenic pressure caused by the use of natural resources.

Keywords: spectral water transparency, spectral coefficients of attenuation, absorption and scattering of light, transparency, physical model, yellow substance, suspension, chlorophyll.

DOI: 10.14258/izvasu(2023)4-02

* Работа выполнена в соответствии с Договором № 2-3.4/2022 ИВЭП СО РАН с Некоммерческим Партнерством «Российский Центр освоения Арктики» от 25.03.2022 г. на проведение НИР по теме «Комплексные научные исследования Обской Губы в рамках реализации в 2022 г. проекта "Экологическая безопасность Обь-Иртышского речного бассейна"», а также в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ гос. регистрации проектов АААА-А17-117041210244-5 и АААА-А17-117041210241-4).

Введение

Изучение экосистем рек, водохранилищ и разнотипных озер невозможно без регулярных систематических исследований гидрооптических характеристик (спектральных показателей ослабления $\varepsilon(\lambda)$, поглощения $\kappa(\lambda)$ и рассеяния $\sigma(\lambda)$ света водой и относительной прозрачности Z , измеренной с помощью диска Секки), характеризующих состояние водных объектов и процессы их изменчивости, на основе широкого использования измерительных приборов и методов [1–6]. Также хорошо известна системообразующая роль света в водных экосистемах текучих и стоячих вод как фактора формирования первичной продукции, наряду с биогенными элементами, температурой и движением воды. Кроме актуальной оценки экологически значимых характеристик водного объекта, гидрооптические исследования дают возможность прогнозирования и социально-экономически значимого качества воды, и трофического статуса поверхностных вод. Этому способствуют и многочисленные исследования связи гидрооптических характеристик с гидрохимическими и гидробиологическими, включая математическое моделирование процессов трансформации солнечного излучения в водной среде [7–10].

Настоящая работа посвящена исследованию пространственного распределения гидрооптических характеристик на устьевом участке р. Обь в различные сезоны 2022 г., которые были начаты в рамках проекта «Экологическая безопасность Обь-Иртышского речного бассейна» еще в 2020–2021 гг., что позволяет оценивать и прогнозировать экологическое состояние экосистем бассейна для рационального использования природных ресурсов и предотвращения экологических катастроф с учетом изменяющегося климата и увеличения антропогенной нагрузки на водные объекты.

Для характеристики экосистемы крупной р. Обь оценки современного экологического состояния водного объекта и прогноза его возможных изменений необходимо проводить многолетние круглогодичные гидрооптические исследования. Программа этих исследований должна включать также наблюдения динамики уровня воды и измерения расхода воды, определение химического состава воды и донных отложений, состава и уровня развития растительных и животных организмов.

Материалы и методы исследования

Полевые работы выполнены на следующих трех участках р. Обь в пределах ЯНАО: 1 — створ у деревни Казым-Мыс Шурышкарского района, 2 — створ у села Азовы Шурышкарского района и 3 — створ у села Салемал Ямальского района. Экспедиционные исследования, начатые в 2020–2021 гг. [11, 12], продолжены в 2022 г. в рамках вышеупомянутого проекта и были проведены в два периода года, различающихся по гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. Первый период — подо-

льдом, зимняя межень с минимальными расходами воды (26 марта — 9 апреля 2022 г.) и второй — открытая вода, в конце весеннего половодья с максимальными расходами воды (5–16 июня 2022 г.).

Выбор пунктов и горизонтов отбора водных проб для гидрооптического анализа на створах был сделан на основе результатов исследования гидрологических и физико-химических измерений специалистов Тюменского государственного университета. На трех створах нижнего течения р. Обь собрано и обработано в период исследования 66 гидрооптических проб и 69 гидробиологических проб на трех горизонтах ($H=0,2, 0,6, \text{ и } 0,8$ м соответственно от максимальной глубины на вертикали). Проведено 474 измерения спектральной прозрачности воды на портативном спектрофотометре DR1900 (на следующих длинах волн — 430, 450, 550 и 670 нм) до и после фильтрации проб через мембраны с диаметром пор 0,22 мкм. Измерения гидрооптических характеристик в пробах воды, взятых на разных горизонтах трех исследуемых створов р. Обь, проводили с помощью спектрофотометра в режиме измерений коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды, затем рассчитывался суммарный спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$. Расчеты проводились по формуле

$$\varepsilon(\lambda) = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right), \quad (1)$$

вытекающей из закона Бугера, где L — длина измерительной кюветы, $T(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda)$ — прозрачность (коэффициент пропускания) в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ — интенсивности прошедшего и падающего на кювету света соответственно, λ — длина волны света. Погрешность определения величины $\varepsilon(\lambda)$ обусловлена систематической приборной погрешностью измерения коэффициента пропускания ($\Delta T=0,5\%$) с помощью спектрофотометра и погрешностью определения длины кюветы. В эксперименте использовали кюветы длиной $L=10$ мм. Максимальная абсолютная погрешность измерений спектрального показателя ослабления света и показателя поглощения света желтым веществом для створов р. Обь составила $0,5 \text{ м}^{-1}$.

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов речной воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла a и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda)$ на разных горизонтах исследуемых створов р. Обь рассчитывался с использованием модифицированной полуэмпирической спектральной модели показателя ослабления света, учитывающей поглощение света терригенными и биогенными частицами [4], которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [8] и имеет вид

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}, \quad (2)$$

где $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — спектральные показатели поглощения хлорофиллом *a* и желтым веществом соответственно, $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ — спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ — спектральный показатель рассеяния водной взвесью, $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения чистой водой. Как видно из данного выражения, спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. В отличие от ранее выполненных работ, где параметр $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ определяется экспериментально, а $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ находится как разность между измеренным $\varepsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, нами рекомендован другой подход. Так как в эксперименте определялся параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ можно найти по формуле

$$\sigma_{\text{вз}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [\kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda)]. \quad (3)$$

Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определялся после измерения спектральной прозрачности воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. Спектральная зависимость показателя поглощения света желтым веществом описывается экспоненциальным законом, т.е.:

$$\kappa_{\text{жв}}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент спектральной изменчивости, характеризующий качественный состав окрашенного растворенного органического вещества (желтого

вещества). Следуя работе [13], измерив $\kappa_{\text{жв}}(450)$ (при $\lambda=450$ нм), определяем концентрацию желтого вещества в пробах воды по формуле

$$C_{\text{жв}} = \kappa_{\text{жв}}(450) / \kappa_{\text{уд.жв}} \quad (5)$$

Здесь $C_{\text{жв}}$ — концентрация желтого вещества, в г/м³, $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$ — удельный показатель поглощения света желтым веществом на длине волны $\lambda=450$ нм, в м²/г. С учетом предложенного в [13] подхода рассчитаны значения $C_{\text{жв}}$ с использованием величины $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$, взятой из работы [14].

Чтобы иметь возможность сравнить полученные нами данные по спектральной прозрачности воды с результатами подобных оптических исследований, выполненных ранее другими авторами для водных экосистем, проводились также измерения относительной прозрачности *Z* с помощью диска Секки.

Дополнительно определялись стандартным спектрофотометрическим методом согласно [15] концентрации хлорофиллов *Xl a*, *Xl b*, *Xl c*₁+*c*₂ и каротиноидов *Kрд*. Для определения трофического статуса наряду с индексом Карлсона *TSI (Trophic State Index)* [16] использовались значения интегральной характеристики — спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$.

Результаты исследования

Результаты расчетов спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ и показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ для различных станций на трех створах р. Обь в марте-апреле и июне 2022 г. представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Значения спектральных показателей ослабления $\varepsilon(\lambda)$ и поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ на трех створах р. Обь в марте-апреле 2022 г.

Дата	Станция	Координаты	Горизонт <i>H</i> , м	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹			$\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, м ⁻¹		
				$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм	$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм
протока Малая Обь, с. Азовы									
28.03.	1.5	64°52'33.4" N 65°11'27.3" E	0,2	21,4	13,0	10,4	8,5	6,0	5,7
28.03.	1.5	64°52'33.4" N 65°11'27.3" E	0,6	21,1	12,7	10,2	8,1	6,3	5,7
28.03.	1.5	64°52'33.4" N 65°11'27.3" E	0,8	21,6	13,0	10,8	8,7	6,2	5,6
28.03.	5	64°52'38.5" N 65°11'29.8" E	0,2	21,1	13,6	10,7	8,7	6,8	6,5
28.03.	5	64°52'38.5" N 65°11'29.8" E	0,6	22,1	13,5	12,3	8,8	6,9	6,2
28.03.	5	64°52'38.5" N 65°11'29.8" E	0,8	21,7	13,1	10,5	8,2	6,6	6,0
28.03.	7	64°52'41.9" N 65°11'32.3" E	0,2	21,0	13,5	12,1	7,5	5,8	5,5
28.03.	7	64°52'41.9" N 65°11'32.3" E	0,6	21,1	12,9	10,1	9,5	6,3	6,0
28.03.	7	64°52'41.9" N 65°11'32.3" E	0,8	20,7	12,2	10,2	9,4	6,5	6,3
протока Большая Обь, с. Казым-Мыс									
01.04.	1.5+	64°39'22.0" N 65°37'54.5" E	0,2	21,0	12,8	10,3	8,7	6,5	6,0
01.04.	1.5+	64°39'22.0" N 65°37'54.5" E	0,6	21,0	13,2	12,1	8,0	6,3	6,0
01.04.	1.5+	64°39'22.0" N 65°37'54.5" E	0,8	21,1	12,8	11,4	9,0	6,2	6,0
01.04.	7	64°39'39.2" N 65°38'00.6" E	0,2	20,2	12,9	10,2	8,7	6,0	5,8
01.04.	7	64°39'39.2" N 65°38'00.6" E	0,6	21,0	12,9	10,2	8,3	6,2	6,0
01.04.	7	64°39'39.2" N 65°38'00.6" E	0,8	21,3	13,2	10,9	9,1	6,4	6,2
01.04.	12	64°39'55.3" N 65°38'06.8" E	0,2	21,1	13,0	10,9	9,9	6,5	5,9
01.04.	12	64°39'55.3" N 65°38'06.8" E	0,6	21,3	15,1	10,7	9,3	6,4	6,0
01.04.	12	64°39'55.3" N 65°38'06.8" E	0,8	21,6	12,6	10,5	8,0	6,3	6,0

Окончание таблицы 1

Дата	Станция	Координаты	Горизонт H, м	$\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$			$\kappa_{\text{жв}}(\lambda), \text{м}^{-1}$		
				$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм	$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм
р. Обь, замыкающий створ, с. Салемал									
07.04.	1.1	66°46'17.6" N 68°57'59.7" E	0,2	19,5	11,5	9,5	9,9	6,5	6,0
07.04.	1.1	66°46'17.6" N 68°57'59.7" E	0,6	20,1	12,0	10,0	9,2	6,2	6,0
07.04.	1.1	66°46'17.6" N 68°57'59.7" E	0,8	19,9	11,8	9,3	8,5	5,9	5,7
07.04.	7	66°46'37.0" N 68°57'57.9" E	0,2	19,9	11,7	9,4	9,9	6,5	6,1
07.04.	7	66°46'37.0" N 68°57'57.9" E	0,6	19,9	11,5	9,5	9,9	6,1	6,0
07.04.	7	66°46'37.0" N 68°57'57.9" E	0,8	20,3	12,2	10,2	9,0	5,9	5,7
07.04.	13+	66°46'59.3" N 68°57'56.7" E	0,2	20,3	11,9	9,7	9,4	6,3	6,0
07.04.	13+	66°46'59.3" N 68°57'56.7" E	0,6	19,9	11,5	9,7	9,4	6,3	6,0
07.04.	13+	66°46'59.3" N 68°57'56.7" E	0,8	20,1	11,8	9,7	8,5	6,4	6,0

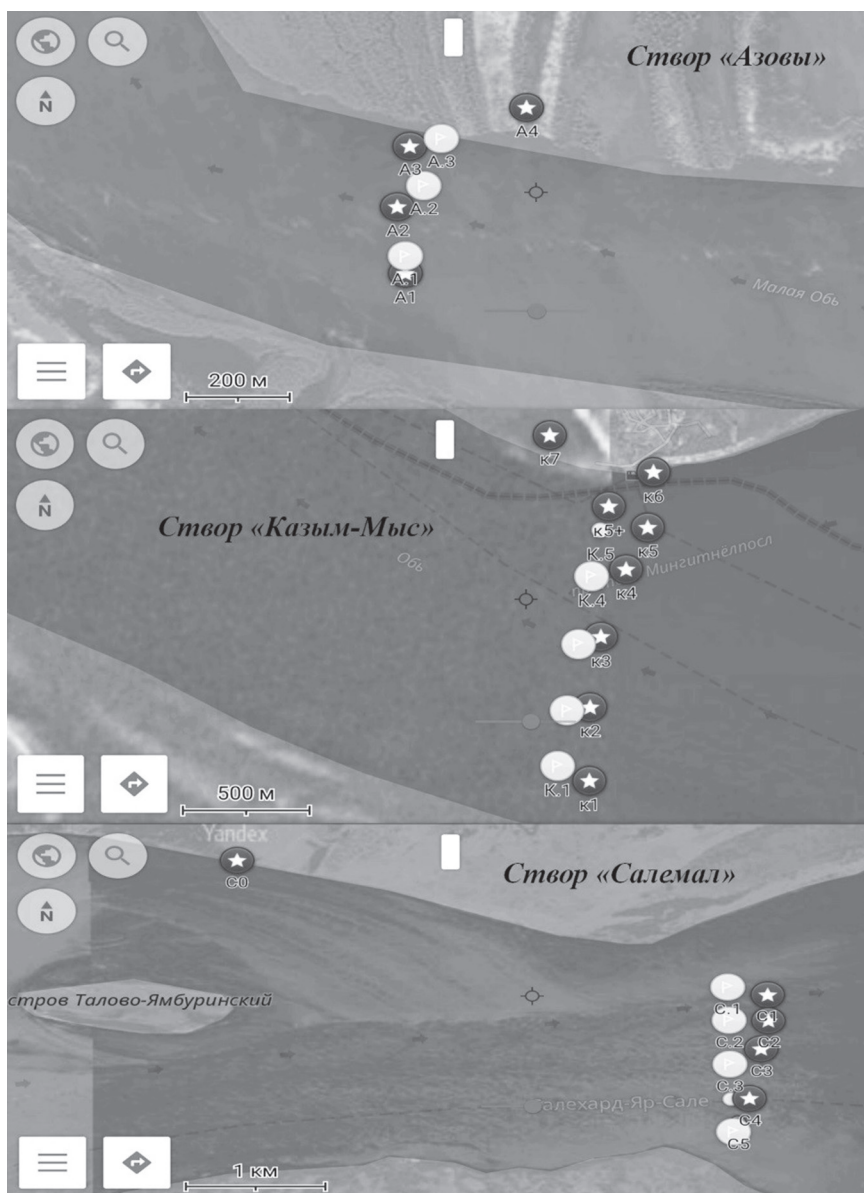
Таблица 2

Значения спектральных показателей ослабления $\varepsilon(\lambda)$ и поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ на трех створах р. Обь в июне 2022 г.

Дата	Станция	Координаты	Горизонт H, м	$\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$			$\kappa_{\text{жв}}(\lambda), \text{м}^{-1}$		
				$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм	$\lambda=430$ нм	$\lambda=550$ нм	$\lambda=670$ нм
протока Большая Обь, с. Казым-Мыс									
08.06	K1.1	64°39'20.0" N 65°38'03.6" E	0,2	26,1	16,0	12,9	14,3	10,4	6,5
08.06	K1.2	64°39'20.0" N 65°38'03.6" E	0,6	24,1	13,9	11,1	14,3	7,7	6,1
08.06	K1.3	64°39'20.0" N 65°38'03.6" E	0,8	22,7	13,1	10,5	14,5	6,1	3,1
08.06	K2.1	64°39'30.4" N 65°38'03.9" E	0,2	25,9	14,6	11,7	15,1	7,7	6,2
08.06	K2.2	64°39'30.4" N 65°38'03.9" E	0,6	25,4	14,7	12,3	14,4	7,5	5,7
08.06	K2.3	64°39'30.4" N 65°38'03.9" E	0,8	25,9	14,0	10,9	15,0	7,7	5,5
08.06	K3.1	64°39'40.3" N 65°38'06.9" E	0,2	24,9	14,5	13,7	15,6	7,6	5,6
08.06	K3.2	64°39'40.3" N 65°38'06.9" E	0,6	25,0	14,0	10,5	16,0	8,9	7,2
08.06	K3.3	64°39'40.3" N 65°38'06.9" E	0,8	24,1	14,4	9,9	16,3	8,3	6,1
08.06	K4.1	64°39'49.8" N 65°38'14.2" E	0,2	22,9	13,1	10,4	14,9	8,1	5,9
08.06	K4.2	64°39'49.8" N 65°38'14.2" E	0,6	23,3	13,0	10,4	15,4	7,7	5,5
08.06	K4.3	64°39'49.8" N 65°38'14.2" E	0,8	23,1	13,0	10,7	15,0	7,7	5,7
08.06	K5.1	64°39'55.8" N 65°38'20.4" E	0,2	22,6	12,4	10,2	15,4	7,8	5,3
08.06	K5.2	64°39'55.8" N 65°38'20.4" E	0,6	21,8	12,4	9,4	15,1	7,9	5,2
08.06	K5.3	64°39'55.8" N 65°38'20.4" E	0,8	20,6	11,1	9,3	15,0	8,1	5,6
протока Малая Обь, с. Азовы									
09.06	A1.1	64°52'32.1" N 65°11'27.3" E	0,2	28,1	17,4	14,2	16,1	10,4	6,7
09.06	A1.2	64°52'32.1" N 65°11'27.3" E	0,6	28,0	17,1	12,2	15,4	7,7	6,5
09.06	A1.3	64°52'32.1" N 65°11'27.3" E	0,8	33,0	18,8	15,2	16,3	7,9	6,4
09.06	A2.1	64°52'36,9" N 65°11'26,2" E	0,2	30,7	17,8	14,6	15,7	8,2	6,3
09.06	A2.2	64°52'36,9" N 65°11'26,2" E	0,6	26,1	14,9	12,0	13,2	8,6	6,9
09.06	A2.3	64°52'36,9" N 65°11'26,2" E	0,8	25,1	14,6	11,5	16,5	8,8	6,9
09.06	A3.1	64°52'41,3" N 65°11'27,9" E	0,2	27,7	16,8	13,6	16,7	8,6	6,7
09.06	A3.2	64°52'41,3" N 65°11'27,9" E	0,6	26,1	15,3	12,2	16,5	8,1	6,7
09.06	A3.3	64°52'41,3" N 65°11'27,9" E	0,8	26,3	14,9	12,0	15,9	8,6	6,8
р. Обь, замыкающий створ, с. Салемал									
12.06	C1.1	66°46'57.1" N 68°58'19.1" E	0,2	28,6	18,3	15,6	14,6	7,9	6,0
12.06	C1.2	66°46'57.1" N 68°58'19.1" E	0,6	22,7	13,8	11,5	15,6	8,2	6,2
12.06	C1.3	66°46'57.1" N 68°58'19.1" E	0,8	22,8	13,7	11,7	15,2	8,1	5,7
12.06	C2.1	66°46'49.6" N 68°58'19.8" E	0,2	21,3	12,4	10,3	15,1	7,7	5,9
12.06	C2.2	66°46'49.6" N 68°58'19.8" E	0,6	20,8	12,1	10,0	15,1	8,2	6,4
12.06	C2.3	66°46'49.6" N 68°58'19.8" E	0,8	22,6	13,4	11,2	14,7	8,2	5,3
12.06	C3.1	66°46'41.4" N 68°58'15.7" E	0,2	26,8	14,6	11,9	14,9	7,7	5,5
12.06	C3.2	66°46'41.4" N 68°58'15.7" E	0,6	23,5	13,0	11,2	15,2	7,9	5,8
12.06	C3.3	66°46'41.4" N 68°58'15.7" E	0,8	22,6	12,8	10,3	14,9	7,9	5,6
12.06	C4.1	66°46'27.1" N 68°58'09.0" E	0,2	20,8	11,5	7,3	15,7	8,3	5,9
12.06	C4.2	66°46'27.1" N 68°58'09.0" E	0,6	20,6	11,2	9,4	15,6	8,0	5,9
12.06	C4.3	66°46'27.1" N 68°58'09.0" E	0,8	21,0	11,5	9,5	15,3	8,2	5,8
12.06	C5.1	66°46'20.3" N 68°58'02.4" E	0,2	21,6	12,0	9,7	15,4	7,7	5,7
12.06	C5.2	66°46'20.3" N 68°58'02.4" E	0,6	21,3	11,8	9,9	17,0	8,9	6,4
12.06	C5.3	66°46'20.3" N 68°58'02.4" E	0,8	21,1	11,9	9,9	16,8	8,3	5,6

Значения спектрального показателя ослабления $\epsilon(\lambda)$ в марте-апреле для створа «Азовы» варьировали в пределах $10,1\text{--}22,1\text{ м}^{-1}$, створа «Казым-Мыс» — $10,2\text{--}21,6\text{ м}^{-1}$ и створа «Салемал» — $9,3\text{--}20,3\text{ м}^{-1}$. Величины $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ для весенних подледных проб оказались ниже, чем летом, в период открытой воды. Амплитуда коле-

баний также мало отличалась для различных створов. В июне значения $\epsilon(\lambda)$ для створа «Азовы» варьировали в пределах $12,0\text{--}33,0\text{ м}^{-1}$, створа «Казым-Мыс» — $9,3\text{--}26,1\text{ м}^{-1}$ и створа «Салемал» — $7,3\text{--}28,6\text{ м}^{-1}$. На рисунке представлены участки отбора проб на трех створах р. Обь в 2022 г.



Картосхема с указанием точек отбора проб на створах «Азовы», «Казым-Мыс» и «Салемал» (флажками отмечены участки отбора проб в апреле, звездами — в июне 2022 г.)

Для сравнения в работе [17] по результатам проведенных двух полевых выездов в бассейне р. Тахос (the Tarajós River Basin) в период наибольших уровней воды получены данные измерений по суммарному показателю ослабления света $\epsilon(\lambda)$ в диапазоне $390\text{--}750\text{ нм}$. Величины $\epsilon(\lambda)$ рассчитывались как сумма показателей поглощения $\kappa(\lambda)$ и рассеяния $\sigma(\lambda)$ света водной сре-

дой. В свою очередь, суммарный показатель поглощения $\kappa(\lambda)$ определялся как сумма показателей поглощения чистой водой $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$, водной взвесью $\kappa_{\text{вз}}(\lambda)$ и окрашенным растворенным органическим веществом (желтым веществом) $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$. Аналогично суммарный показатель рассеяния определялся как сумма $\sigma_{\text{моп}}(\lambda)$ и $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ при предположении, что общее рассея-

ние из-за показателя рассеяния света желтым веществом $\sigma_{\text{жв}}(\lambda)$ ничтожно мало. В результате получено, что значения $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ для представленных пяти классов воды находились в узком диапазоне 2,0–3,5 м⁻¹ при $\lambda=440$ нм. Другими авторами [18] представлены сезонные изменения показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ в диапазоне 300–800 нм в различных точках р. Одер в Щецинской области (the Oder River in the Szczecin region). Например, для первой точки измерения на длине волны около $\lambda=300$ нм значение $\varepsilon(\lambda)$ было равным до: 45,8 м⁻¹ (осенью), 30,32 м⁻¹ (зимой) и 54,16 м⁻¹ (весной). На длине волны $\lambda=750$ нм величина $\varepsilon(\lambda)$ составила: 6,78 м⁻¹ (осенью), 1,99 м⁻¹ (зимой) и 7,38 м⁻¹ (весной). Группой авторов в работе [7] также приведены результаты суммарного показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, полученные для следующих различных участков рек: Deep River at Glendon (DR), Big Spring Creek at Big Spring (BSC), Baraboo River at La Valle (BR), Wisconsin River at Muscoda (WR), которые составили 5,78 м⁻¹, 2,73 м⁻¹, 29,26 м⁻¹, 15,71 м⁻¹ соответственно. Также получены величины показателя поглощения света желтым веществом на длине волны $\lambda=440$ нм, которые имели следующие значения: для реки DR — 4,44 м⁻¹, BSC — 0,41 м⁻¹, BR — 1,60 м⁻¹, WR—2,36 м⁻¹.

Рассчитанные значения показателей поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}$ и концентраций желтого вещества $C_{\text{жв}}$ летом на трех исследуемых створах р. Обь показали, что в июне средние значения $\kappa_{\text{жв}}$ для створа «Азовы» составили 13,7 м⁻¹, створа «Казым-Мыс» — 12,7 м⁻¹ и замыкающего створа «Салемал» — 12,8 м⁻¹, мало отличаясь друг от друга и по концентрациям желтого вещества — 64,5, 59,7 и 60,6 г/м³ соответственно.

Измеренные величины относительной прозрачности по диску Секки Z летом 2022 г. находились в диапазоне 0,45–0,50 м (створ «Азовы»), 0,45–0,55 м (створ «Казым-Мыс») и 0,35–0,60 м (створ «Салемал»).

Результаты исследования количества фотосинтетических пигментов водорослей фитопланктона в период исследования показали, что в подледных пробах для различных станций на р. Обь на трех створах в марте-апреле 2022 г. средние значения пигментных характеристик составляли для $X_{\text{л}}$ $a=0,7$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $b=0,4$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $c_1+c_2=1,1$ мг/м³ и $K_{\text{рд}}=1,9$ мкг/дм³, что по классификации И.С. Трифионовой [19] соответствует уровню олиготрофных водоемов, в отличие от периода открытой воды. Концентрации фотосинтетических пигментов в половодье достигали уровня мезотрофных водоемов при максимальных значениях для створа «Азовы» — $X_{\text{л}}$ $a=8,9$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $b=2,2$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $c_1+c_2=17,2$ мг/м³ и $K_{\text{рд}}=3,6$ мкг/дм³ и для створа «Казым-Мыс» — $X_{\text{л}}$ $a=7,4$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $b=2,1$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $c_1+c_2=14,6$ мг/м³ и $K_{\text{рд}}=3,6$ мкг/дм³, на створе «Салемал» — эвтрофных, здесь максимальные величины составили для $X_{\text{л}}$ $a=19,2$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $b=3,6$ мг/м³, $X_{\text{л}}$ $c_1+c_2=37,6$ мг/м³ и $K_{\text{рд}}=3,4$ мкг/дм³.

В результате расчетов на основе модифицированной полуэмпирической модели ослабления света, учитывающей поглощение терригенными и биогенными частицами, для исследуемых створов р. Обь получено, что максимальное влияние на суммарное ослабление света в речной воде оказывают желтое вещество и взвесь. В подледный период в коротковолновой области спектра на трех створах реки на горизонтах $H=0,2, 0,6, \text{ и } 0,8$ м вклад взвеси в $\varepsilon(\lambda)$ находился в диапазоне от 49,2 до 63,8 %, в период половодья — от 19,0 до 49,1 % ($\lambda=430$ нм). Желтое вещество (ЖВ) дает максимальный вклад в показатель ослабления света в водных пробах, измеренных на длине волны 430 нм в период открытой воды, где вклад ЖВ на всех станциях составил более 49,4 % с максимальным значением до 79,8 %. На длине волны 670 нм вклад желтого вещества увеличивается и достигает 80,8 % (станция 4.1 на замыкающем створе «Салемал»). В подледных пробах вклад ЖВ на длине волны 430 нм варьировал в пределах 35,5–50,6 %, на длине волны 550 нм — 42,4–56,6 %, на длине волны 670 нм — 45,9–65,9 %, что свидетельствует о наличии значительного количества окрашенных растворенных органических веществ в 2022 г. подо льдом в период окончания зимней межени. Чистая вода вносит несущественный вклад в суммарное ослабление света в речной воде при $\lambda=430$ нм и составляет 0,1 %, незначительно увеличиваясь в длинноволновой области спектра до 4,7 % в различные гидрологические сезоны года. Вклад хлорофилла в $\varepsilon(\lambda)$ практически равен на двух длинах волн 430 и 670 нм, в целом на всех станциях он невелик и составляет от 0,1 до 0,6 % (весной) и от 0,1 до 6,8 % (летом).

Заключение

В результате проведенных в различные периоды года экспедиционных исследований в марте-апреле и июне 2022 г. для Нижней Оби были получены натурные данные по оптическим характеристикам речной воды и по сезонной изменчивости спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, спектрального показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, относительной прозрачности по диску Секки Z , концентрации желтого вещества $C_{\text{жв}}$ и фотосинтетических пигментов водорослей фитопланктона — хлорофиллов a, b, c , каротиноидов. Эти данные необходимы для современной оценки и прогноза качества воды, биологической продуктивности экосистемы Оби, включая устьевую область.

На основе модифицированной полуэмпирической модели ослабления света, учитывающей поглощение света терригенными и биогенными частицами, рассчитаны относительные спектральные вклады основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, хлорофилла, желтого вещества и взвеси) в $\varepsilon(\lambda)$ на исследуемых створах р. Обь в пределах ЯНАО. В результате расчетов получено, что во все периоды

гидрологического года максимальное влияние на суммарное ослабление света в речной воде на всех трех створах оказывают желтое вещество и взвесь.

Установлено, что гидрооптические характеристики, в первую очередь показатель поглощения света желтым веществом, свидетельствуют о наличии значительного количества окрашенных растворенных органических веществ в 2022 г. подо льдом в период окончания зимней межени и в половодье в количестве, близком к концентрациям в период летней межени в 2021 г.

Полученные результаты для устья р. Обь согласуются с данными по другим рекам мира, исследованным с использованием методического подхода,

основанного на физической модели ослабления света в водных средах. Это позволяет дать рекомендации по включению гидрооптических характеристик в программу мониторинга динамики водных экосистем региона в условиях изменения климата и увеличения антропогенной нагрузки вследствие интенсивного использования природных ресурсов.

Благодарность

Благодарим научного сотрудника лаборатории водной экологии ИВЭП СО РАН, кандидата биологических наук М.И. Ковешникова за отбор водных проб и измерение коэффициента пропускания.

Библиографический список

1. Карбышев С.Ф., Павлов В.Е. Спектральная прозрачность поверхностных вод средней Оби // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 2.
2. Павлов В.Е., Хвостов И.В., Курепина Н.Ю., Ковалевская Н.М., Хворова Л.А. Функции распределения концентраций хлорофилла и взвешенного вещества в водах Обской губы и центральной части Карского моря // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 12. Doi:10.15372/AOO20191204
3. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л., 1980.
4. Акулова О.Б. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоемов (на примере озер Алтайского края) : дис. ... канд. тех. наук. Барнаул: ИВЭП СО РАН. Барнаул, 2015.
5. Akulova O.B., Balykin D.N., Bukaty V.I., Kirillov V.V., Kovalevskaya N.M. Spectral light absorption by yellow substance and its dynamics in the surface layers of thermokarst lakes of the Central Yamal // Limnol. and Freshwat. Biol. 2020. № 3. Doi:10.31951/2658-3518-2020-A-3-429)
6. Akulova O.B., Bukaty V.I. Evaluation of water suspension effect on spectral light attenuation in Novosibirsk reservoir // Limnol. and Freshwat. Biol. 2019. № 5. Doi:10.31951/2658-3518-2019-A-5-312)
7. Julian J.P., Doyle M.W., Powers S.M., Stanley E.H., Riggsbee J.A. Optical water quality in rivers // Water Resour. Res. 2008. Vol. 44. W10411. Doi:10.1029/2007WR006457
8. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. М., 1983.
9. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундам. и приклад. гидрофиз. 2014. Т. 7. № 3.
10. Маньковский В.И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // Морск. гидрофиз. журнал. 2011. № 5.
11. Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. Optical characteristics of water at the mouth of the Ob River // Limnol. and Freshwat. Biol. 2021. № 3. Doi:10.31951/2658-3518-2021-A-3-1147
12. Акулова О.Б., Букатый В.И., Кириллов В.В. Гидрооптические характеристики воды и содержание хлорофилла в нижней Оби // Ползуновский альманах. 2021. № 4.
13. Маньковский В.И. Желтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морск. гидрофиз. журнал. 2015. № 3.
14. Nyquist G. Investigation of some optical properties of seawater with special reference to lignin sulfonates and humic substances // PhD Thesis, Dept. Analytical and Marine Chemistry. Göteborg University, Göteborg, Sweden, 1979.
15. ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М., 2003.
16. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. Vol. 22. № 2.
17. 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
18. 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. 12:2.
19. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л., 1990.