

ФИЦ МГИ (Севастополь), ИВЭП СО РАН (Барнаул), ФИЦ ИВТ (Новосибирск)

КОЭФФИЦИЕНТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ УЧАСТКОВ АКВАТОРИИ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД И ЕГО СВЯЗЬ С БИООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

**Корчёмкина Е.Н., Суслин В.В., Кудинов О.Б., Суторихин И.А.,
Кириллов В.В.**





Телецкое озеро расположено в северо-восточной части Республики Алтай. Протяженность озера 77,8 км, средняя ширина 2,9 км, максимальная ширина составляет 5,2 км. Северная часть водоема вытянута в широтном направлении, южная – в меридиональном. Максимальная глубина озера составляет 323 м, средняя – 187 м..

Телецкое озеро - проточное, в него впадают 87 рек, среди которых крупнейшей является р. Чулышман, обеспечивающая до 70% от общего притока воды, а вытекает одна р. Бия в северной части у пос. Артыбаш.

По гидротермическим характеристикам Телецкое озеро относится к динамическим с двумя периодами полного конвективного перемешивания до максимальных глубин за счет термического бара (май–июль и октябрь–декабрь).

Прозрачность воды в Телецком озере в основном определяется сезонным ходом речного стока.

Результаты экспедиционных 14 летних наблюдений в августе за относительной прозрачностью по белому диску на 10 участках акватории Телецкого озера в период летнего прогрева и устойчивой температурной стратифии показано, что за отмеченный период произошло снижение средней относительной прозрачности по белому диску с 9,2 до 5,3 м.

Исследования, показали значительную пространственную изменчивость спектрального показателя ослабления света в различных зонах поверхностного слоя Телецкого озера, в основном определяемую выносом рек Чулышман, Кокши и Кыга. При этом, как было установлено, наибольший вклад в ослабление света в поверхностных водах вносит неживое органическое вещество (растворенная органика, детрит).

В августе 2023 года на участках акватории Телецкого озера впервые были проведены комплексные гидрооптические и гидробиологические исследования, включавшие в себя дистанционные гиперспектральные измерения коэффициента спектральной яркости водной толщи, отбор и анализ поверхностных проб воды для определения концентрации хлорофилла-а, нерастворимой взвеси и растворимой органики (желтое вещество).

Использовался палубный мультиспектрофотометр, разработанный в отделе оптики моря ФИЦ МГИ. Диапазон длин волн 390–750 нм с разрешением 1 нм и погрешностью в 3%, измерялся спектр восходящей яркости водоема под углом около 30°, нормированной на падающую облучённость.

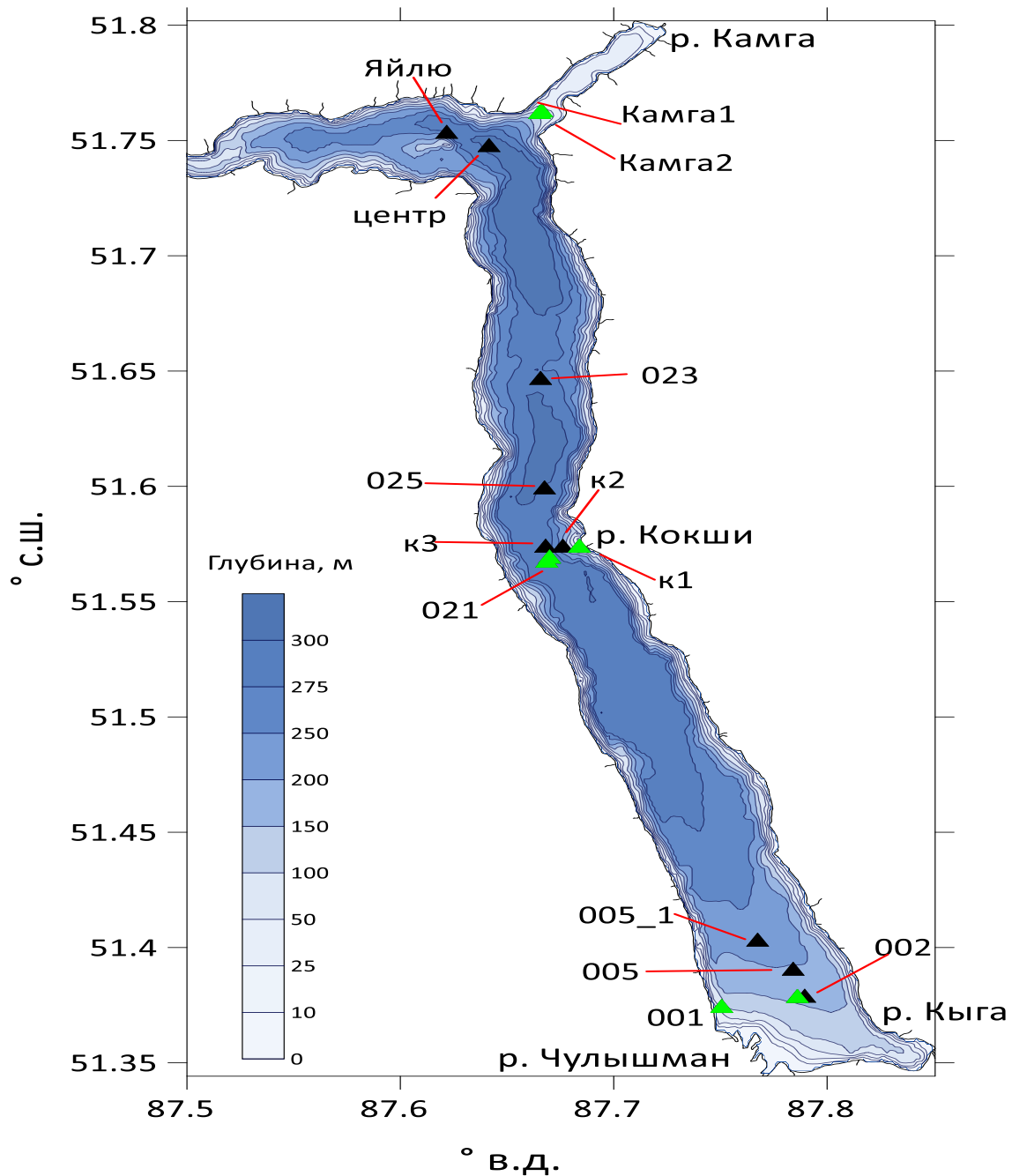


Теплоход- лаборатория ИВЭП СО РАН



Измерения коэффициента яркости

Для измерений использовался палубный спектрофотометр, разработанный в отделе оптики моря ФИЦ МГИ . С помощью его помощью измерялся спектр восходящей яркости водоема под углом около 30° , нормированной на падающую облучённость. Для учета отражения от водной поверхности применялась оригинальная методика. Коэффициент яркости 5-сантиметрового слоя воды измерялся в кювете из черного поглощающего стекла и затем вычитался из спектра водной толщи. Методика измерений согласуется с протоколами NASA для подспутниковых измерений. Измерения проводились с борта судна на станциях при различных условиях волнения и облачности, вне тени от берегов, и так, чтобы отражение берегов (гор) не находилось в точке измерения. Время измерения одного спектра составляло 10-15 минут, в течение которых предполагается, что изменения освещенности обусловлены только облачностью, но не суточным ходом. В результате было получено 16 спектров коэффициента яркости в диапазоне длин волн 390–750 нм с разрешением 1 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3%.



Полуаналитический алгоритм обработки данных измерений

Спектральный коэффициент яркости моделируется выражением:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550) \left(\frac{550}{\lambda}\right)^v}{a_w(\lambda) + Chl \cdot a_{ph}^*(\lambda) + a_{CDM}(440) \exp(-S(\lambda - 440))}$$

где : $k = 0,15$

$b_{bw}(\lambda)$ показатель рассеяния назад чистой водой

$a_w(\lambda)$ – показатель поглощения чистой водой ;

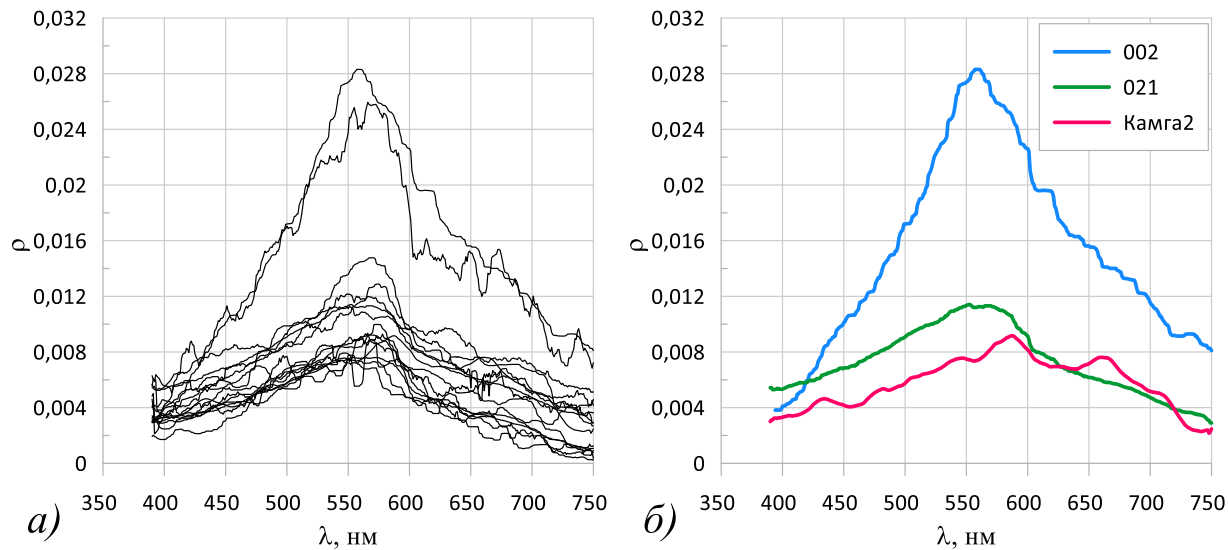
$a_{ph}^*(\lambda)$ – спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла-а); $v = 1$ – спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц, в данном случае предполагается, что взвесь оптически крупная; S – спектральный наклон показателя поглощения света неживой органикой, составлял 0,001 – 0,017 в зависимости от соотношения детрита и растворенного органического вещества;

$b_{bp}(550)$ – показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм;
 Chl – концентрация пигментов фитопланктона и

$a_{CDM}(440)$ – показатель поглощения неживого органического вещества (растворенного и детрита) на длине волны 440 нм.

Спектр удельного поглощения хлорофилла-а и его зависимость от концентрации хлорофилла-а может меняться от водоема к водоему, поэтому для применения алгоритма к новому водному объекту требуется эту зависимость параметризовать на основе натуральных измерений концентраций хлорофилла-а и других компонент.

Спектры коэффициента яркости были обработаны при помощи полуаналитического алгоритма с целью получения биооптических характеристик. В результате рассчитаны концентрация хлорофилла-а (*Chl*), поглощение неживой органикой на длине волны 440 нм ($a_{CDM}(440)$), рассеяние назад на взвеси $b_p(550)$ и показатель вертикального ослабления света на длине волны 490 нм $K_d(490)$,



Спектры коэффициента яркости, полученные для всех станций (а); спектры, характерные для отдельных районов (б)

Таблица 1. Результаты проведенных измерений и расчетов.

Дата	Время	Станция	ρ_{max}	, нм	Chl , мг/м ³	a_{CDM} м ⁻¹	b_{BP} м ⁻¹	K_d , м ⁻¹
12.08.2023 Чулышман	9:09	002	0,025	569	1,45	1,03	0,062	0,93
	10:22	002	0,028	559	3,12	1,06	0,058	0,73
13.08.2023 Кыгинский залив	10:03	001	0,011	574	1,24	0,85	0,026	0,95
	12:14	005	0,009	569	2,26	0,64	0,013	0,41
	14:23	005_1	0,015	569	0,11	1,01	0,028	0,56
14.08.2023 Кокши	9:13	021	0,008	576	1,31	1,28	0,031	0,86
	11:27	k1	0,009	569	1,00	0,65	0,021	0,97
	11:50	k2	0,010	573	2,31	1,07	0,019	0,62
	15:59	k3	0,008	552	1,33	0,76	0,017	0,60
15.08.2023 Корбу	9:29	021	0,009	552	2,39	0,68	0,025	0,98
	14:47	023	0,009	566	2,36	0,53	0,012	0,32
	15:58	025	0,009	569	0,12	0,32	0,008	0,27
16.08.2023 Камгинский залив и центр	8:55	центр	0,007	586	0,78	0,45	0,011	0,35
	12:05	Яйлю	0,008	553	3,99	0,61	0,013	0,46
	16:37	Камга1	0,009	562	2,98	1,21	0,038	0,92
	18:52	Камга 2	0,009	590	1,56	1,82	0,041	0,96

Спектры вертикального ослабления $K_d(\lambda)$ рассчитывались по найденным первичным гидрооптическим характеристикам:

$$K_d(\lambda) = \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\cos\theta_s}$$

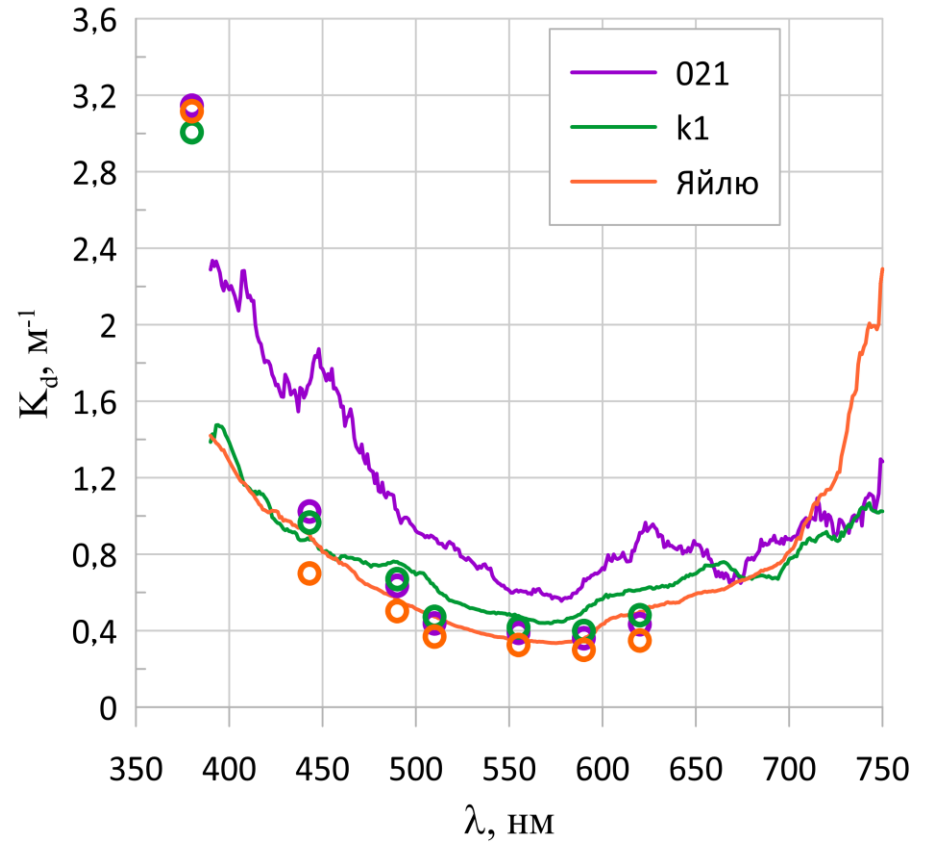
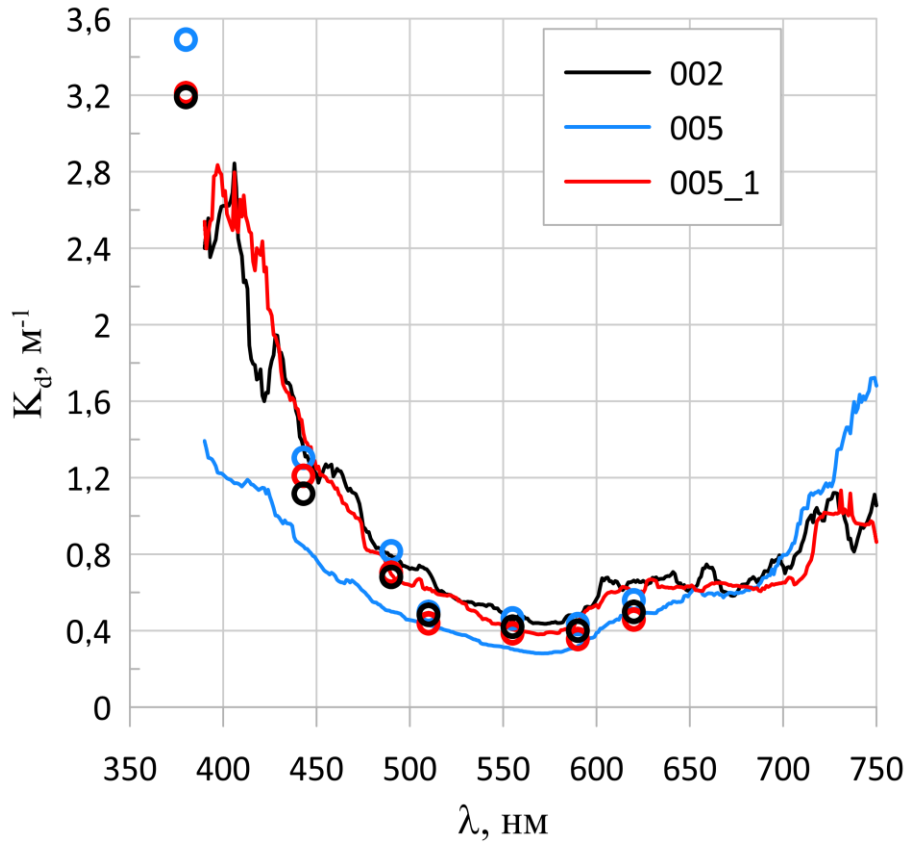
где ,

$a(\lambda)$ – суммарное
ослабление,

$b_b(\lambda)$ – суммарное рассеяние назад,

θ_s –высота солнца, средний косинус тела диффузной облученности $\cos\theta_s$

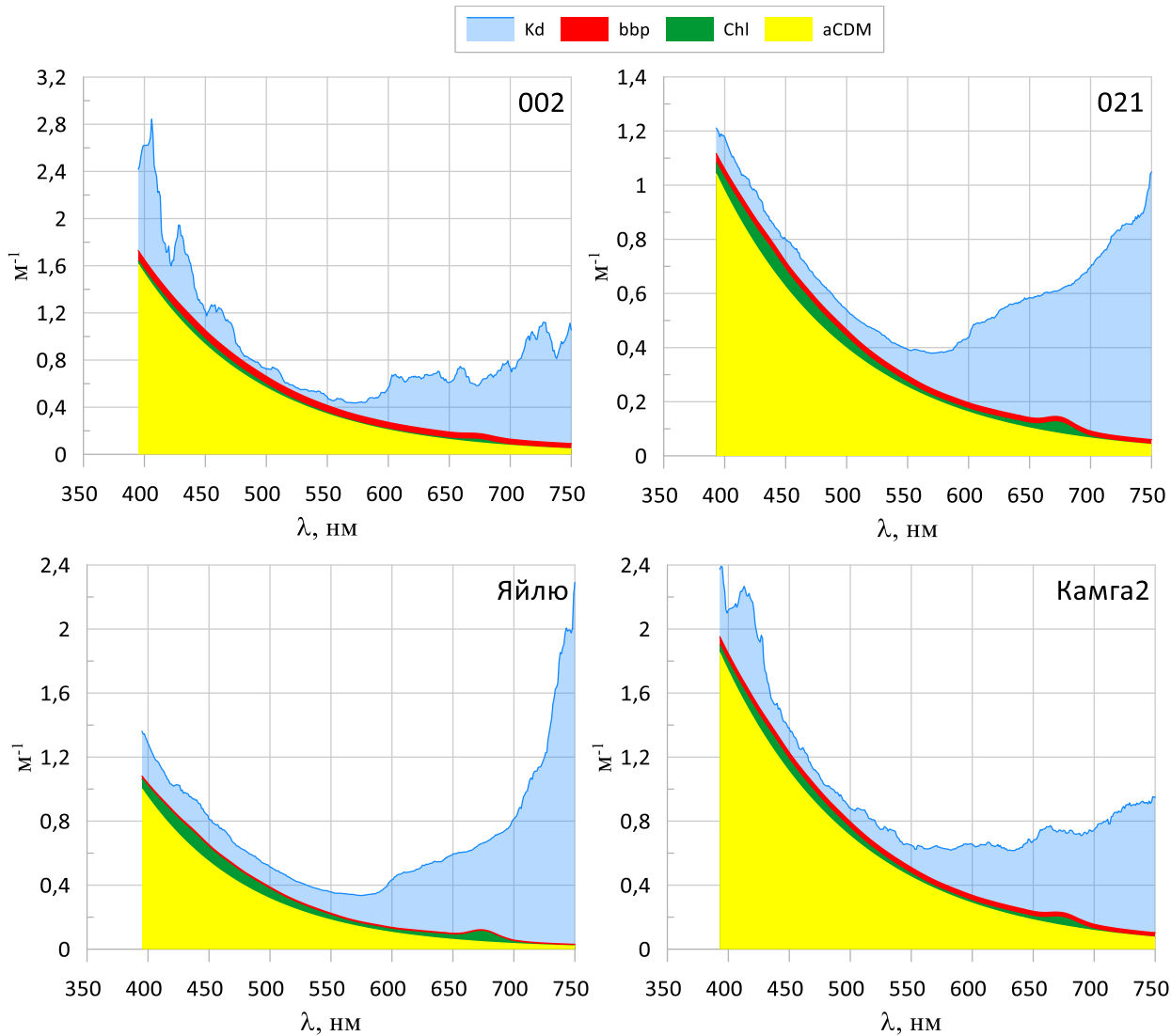
Считается, что изменения K_d , обусловленные изменением соотношения прямого и диффузного света, не превышают 10-15 %.



Спектры K_d , рассчитанные по измерениям коэффициента яркости (сплошная линия) и по измерениям профилей спектральной облученности (кружки)

Таблица. Вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления (среднее значение \pm среднеквадратичное отклонение)

Длина волны, нм	$K_d, \text{ м}^{-1}$	Вклады, %		
		Хлорофилл-а	Взвесь	Неживая органика
400	1,89 \pm 0,88	2,3 \pm 1,6	1,9 \pm 0,6	73 \pm 12
440	1,18 \pm 0,48	5,0 \pm 3,0	2,8 \pm 1,1	76 \pm 10
490	0,71 \pm 0,28	5,4 \pm 3,5	4,1 \pm 1,8	73 \pm 8
550	0,44 \pm 0,16	3,0 \pm 2,3	5,9 \pm 3,0	63 \pm 14
680	0,66 \pm 0,10	4,2 \pm 2,9	3,3 \pm 2,1	13 \pm 9



Спектральные вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления для нескольких станций



Заключение

В 2023 году впервые проведены натурные измерения спектрального коэффициента яркости водной толщи на Телецком озере. Полученные значения позволяют наблюдать пространственную изменчивость оптических свойств воды: в областях, где присутствует заметный вклад взвешенного вещества в рассеяние, наблюдались значения коэффициента яркости до 2,8%, тогда как на основной части акватории максимальные значения составляли 0,7 – 1%. Применение полуаналитического алгоритма, адаптированного для внутренних вод, показало удовлетворительную оценку содержания хлорофилла-а в воде. Для более точной настройки алгоритма требуются дальнейшие натурные исследования. Кроме того, были оценены поглощение неживой органикой и показатель вертикального ослабления света, которые также отражают изменчивость оптических свойств исследуемого водоема.

Особенно следует отметить, что при проведении спутникового мониторинга состояния поверхности внутриконтинентальных водных объектов и обработке результатов крайне необходимы данные о величине коэффициента спектральной яркости водной поверхности.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**

