

Оценка трофического статуса Телецкого озера по данным гидрооптических измерений в видимом диапазоне

И.А. Суторихин^{1,2}, И.М. Фроленков¹

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

²Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Assessment of the Trophic Status of Teletskoye Lake According Hydrooptical Measurements in the Visible Range

I.A. Sutorikhin^{1,2}, I.M. Frolenkov¹

¹Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (Barnaul, Russia)

²Altai State University (Barnaul, Russia)

Гидрооптические характеристики воды являются надежными показателями оценки экологического состояния водоемов. Показатель ослабления света водой и индикатрисы рассеяния служат интегральными параметрами, на которых строятся методы экспресс-оценки состояния водных экосистем. Оценка экологического состояния водоемов принято характеризовать трофическим статусом, который определяется величиной первичной продукции и подразделяется на олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный и гиперэвтрофный. По результатам гидрооптических измерений в конце июля 2016 г. в фазу полного летнего прогрева воды проведена оценка трофического статуса Телецкого озера в разных местах акватории и на разных глубинах. Для исследований был использован вычисляемый спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, который учитывает содержание в воде как взвешенных, так и растворенных веществ (хлорофилл, растворенные органические и неорганические соединения, минеральная и органическая взвесь). Ранее для определения трофического статуса данная методика была апробирована на пресноводных разнотипных озерах Алтайского края (оз. Лапа, оз. Красиловское и оз. Большое Островное) и показала хорошее соответствие с трофическим индексом Карлсона. С использованием метода интерполяции была построена картосхема областей трофического статуса по акватории озера. Установлено, что трофический статус рассмотренного озера варьируется от олиготрофно-мезотрофного до эвтрофного на различных участках и глубинах.

Ключевые слова: гидрооптические измерения, прозрачность воды в видимом диапазоне, спектральный показатель ослабления света, спектрофотометр, интерполяция данных, трофический статус водоема.

Assessment of the ecological status of water bodies characterized by the trophic status, which is determined by the value of the primary product and is divided into oligotrophic, mesotrophic, eutrophic, hupereutrophic. Based on the results of hydro-optical measurements at the end of July 2016, the trophic status of the Teletskoye Lake was assessed in different parts of the water area and at various depths during the full summer warm-up period. For the studies, the calculated spectral attenuation coefficient $\varepsilon(\lambda)$ was used, which takes into account the water content of both suspended and dissolved substances (chlorophyll, dissolved organic and inorganic compounds, mineral and organic suspension). Previously, to determine the trophic status, this technique was tested on freshwater heterogeneous lakes in the Altai Territory (lake Lapa, lake Krasilovskoe, lake Bolshoe Ostrovnoe,) and showed good agreement with the trophic index of Carlson. Using the method of interpolation, a map of areas of trophic status along the lake's water area was constructed. It is established that the trophic status of the examined lake varies from oligotrophic-mesotrophic to eutrophic at various sites and depths.

Keywords: trophic status of the reservoir, hydro-optical measurements, spectral attenuation of light, spectrophotometer, interpolation, Teletskoye Lake.

Введение. Одним из важнейших показателей при оценке экологического состояния водоема является его трофический статус, определяемый в первую очередь величиной первичной продукции и содержанием во взвешенном в воде вещества (сестоне) хлорофилла. При оценки трофического статуса традиционно используются классические подходы, такие как определение концентрации хлорофилла «а», общего фосфора и азота, биомассы фитопланктона, прозрачности по диску Секки и др., которые требуют специального лабораторного оборудования, а исследования занимают длительное время [1–10].

По данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона в [11] показано, что трофический статус водоема может меняться в разные сезоны года и в разных местах акватории. Для оперативного экологического мониторинга водных объектов как по площади акватории, так и по глубине показана возможность определения трофического статуса разнотипных пресноводных водоемов по спектральному показателю ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ [12]. Цель работы заключалась в определении значений интегральной гидрооптической характеристики — спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ на длине волны 430 нм по акватории и на различных глубинах Телецкого озера в фазу полного летнего прогрева, а также экспресс-определения его трофического статуса.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились в период завершения летнего прогрева озера 26–29 июля 2016 г., когда оно устойчиво стратифицировано и достигает температур поверхностного слоя воды выше 10 °С. Отбор проб воды проводился с борта теплохода-лаборатории ИВЭП СО РАН с использованием малообъемного батометра Рутнера, для глубоководных участков применялся батометр Нискина. Измерения спектральной прозрачности воды проводились с шагом 30 нм на спектрофотометре ПЭ-5400УФ. Водные пробы помещались в кварцевые (измерительные) кюветы размером 10x5 мм. Так же измерялась прозрачность поверхностного слоя воды по диску Секки, температура с использованием цифрового дискретного измерителя температуры ЦДИТ — 10/0,5 и концентрация хлорофилла «а». Схема мест отбора и координаты их центров приведены на рисунке.

Обсуждение результатов. По значениям прозрачности воды, измеренных экспериментальным путем, рассчитывался показатель ослабления света согласно закону Бугера — Ламберта — Бера. Рассчитанные данные на длине волны 430 нм представлены в таблице. Выбор рабочей длины волны $\lambda = 430$ нм обусловлен тем фактом, что наибольший главный максимум

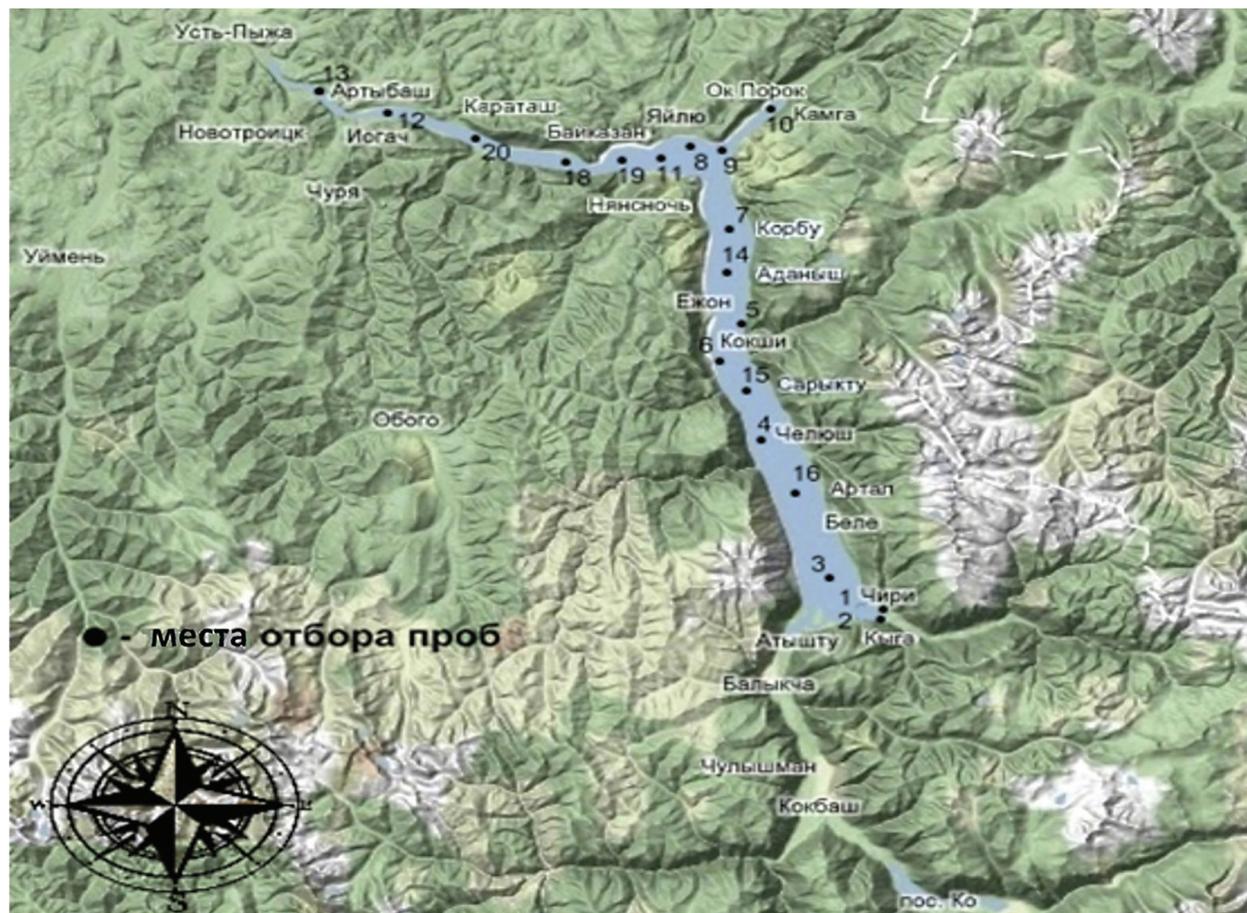
поглощения хлорофиллом «а», содержащимся в клетках водорослей фитопланктона, находится в области 430–440 нм [13].

Для оценки пространственного распределения трофического статуса по акватории и на различных глубинах Телецкого озера в 2016 г. был выбран метод интерполяции [14] и применен модуль расширения из программы ArcView — SpatialAnalyst [15], где недостающие значения определялись методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

Заключение. Первичная гидрооптическая характеристика — спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ является наиболее объективной величиной для определения трофического статуса озер, так как является суммой показателей поглощения и рассеяния света чистой водой и содержащимися в ней взвешенными и растворенными веществами — хлорофиллом, растворенными органическими (желтое вещество) и неорганическими соединениями, а также минеральной и органической взвесью [16, 17]. Выполненные исследования показали, что трофический статус на озере не однороден, он изменяется по глубинам и на различных участках акватории [12]. Также сезонное изменение трофического статуса было подтверждено в работе [18], на основе численных экспериментов с ИВК на Телецком озере. Используя методику интерполяции, были выделены зоны трофического статуса на Телецком озере. В поверхностном слое озера наибольшие показатели были обнаружены вблизи с. Артыбаш $\varepsilon(\lambda) \approx 4,49 \text{ м}^{-1}$ и впадения р. Чулышман $\varepsilon(\lambda) \approx 5,23 \text{ м}^{-1}$ относятся к эвтрофному типу.

Артыбаш — крупный поселок, основу экономики которого составляет туризм. Здесь находится большое количество туристических кемпингов, баз и домов отдыха, обилие маломерного транспорта для прогулок по озеру — все это вносит свой вклад в антропогенную нагрузку озера и показатель ослабления света. Чулышман — крупнейшая река, питающая Телецкое озеро, приносит 70 % воды, вносит большое количество минеральных частиц, из-за которых наблюдаются мощные мутные слои. Наиболее чистый слой отмечен в поверхностном слое воды в области Кыгинского залива $\varepsilon(\lambda) \approx 1,51 \text{ м}^{-1}$. В Камгинский залив на глубине порядка 10 м наблюдается довольно высокая прозрачность $\varepsilon(\lambda) \approx 1,61 \text{ м}^{-1}$.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН К.В. Марусину за помощь в обработке данных и построении картосхем, аспирантам М.Е. Литвиху и А.А. Синельникову за содействие в проведении экспедиционных работ.



№ места на карте	Координаты места отбора проб		Название места отбора проб
	Широта	Долгота	
1	51,35752°	87,82310°	Чири
2	51,35190°	87,84324°	Кыга
3	51,37797°	87,78595°	Чулышман
4	51,48432°	87,72960°	Челюш
5	51,57246°	87,68117°	Кокши
6	51,56671°	87,66769°	Кокши
7	51,70365°	87,66107°	Корбу
8	51,76655°	87,63532°	Окпорок
9	51,75791°	87,66034°	Камга
10	51,79655°	87,71394°	Камга
11	51,75398°	87,60415°	Яйлю
12	51,80928°	87,30256°	Окпорок-Артыбаш
13	51,78798°	87,30163°	Артыбаш
14	51,67214°	87,68828°	Аданьш
15	51,53638°	87,69930°	Саратки
16	51,45815°	87,74204°	Артал
18	51,75597°	87,40980°	Байказан
19	51,75078°	87,55366°	Нянсночь
20	51,75965°	87,37575°	Караташ

Расположение мест отбора проб на оз. Телецкое

Трофический статус Телецкого озера
(по спектральному показателю ослабления света)

Трофический статус	Глубина, м	ϵ , м ⁻¹ (430 нм)	Трофический статус
Кыгинский залив	0	1,51	олиготрофный
р. Челюш	0	2,12	мезотрофный
	10	5,23	эвтрофный
	50	8,99	эвтрофный
	100	4,81	эвтрофный
	200	10,31	эвтрофный
р. Кокши	0	2,12	мезотрофный
	10	2,63	мезотрофный
	50	5,98	эвтрофный
	100	4,40	эвтрофный
	200	5,13	эвтрофный
р. Б. Корбу	0	4,18	эвтрофный
	10	2,84	эвтрофный
	50	4,40	эвтрофный
	100	4,19	эвтрофный
	200	2,33	мезотрофный
	300	3,98	эвтрофный
Камгинский залив	0	4,71	эвтрофный
	10	1,61	олиготрофный
	50	4,29	эвтрофный
	100	3,35	эвтрофный
п. Яйлю	0	2,32	мезотрофный
	10	4,50	эвтрофный
	50	4,18	эвтрофный
	100	5,23	эвтрофный
	200	4,30	эвтрофный
с. Артыбаш	0	4,49	эвтрофный
	10	4,08	эвтрофный
Чулышман	0	5,23	эвтрофный

Библиографический список

1. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. — 2007.
2. Хендерсое-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л., 1990.
3. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоёмов. — М., 2001.
4. Фрумин Г.Т., Хуан Жань-Жань. Трофическое состояние пресноводных озёр Китая // Экологическая химия. — 2011. — Т. 20. — Вып. 1.
5. Arst H., Erm A., Herlevi A., Kutser T., Leppäranta M., Reinart A., Virta J. Optical properties of boreal lake waters in Finland and Estonia // Boreal Environment Research. — 2008.
6. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. — Vol. 22. — N2.
7. Frumin G.T., Khuan Zhan-Zhan. Trophic Status of Fresh-Water Lakes in China // Russian Journal of General Chemistry. — 2011. — Vol. 81. — No.13.
8. Kalenak D.S. Inherent optical properties of suspended particulates in four temperate lakes: application of in situ spectroscopy // Hydrobiologia. — 2013.

9. Бульон В.В. Эвтрофирование и деэвтрофирование озёр как реакция на изменение фосфорной нагрузки с водосборной площади // Теория и практика восстановления внутренних водоёмов / под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондрачева. — СПб., 2007.
10. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных систем : учебное пособие. — СПб., 2007.
11. Сухоруков Б.Л., Ковалева Т.Е., Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона // Водные ресурсы. — Т. 44, №1.
12. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б., Фроленков И.М. Определение трофического статуса пресноводных озёр Алтайского края в период 2013–2016 гг. по гидрооптическим характеристикам // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2017. — №1. DOI: 10.14258/izvasu(2017)1-10.
13. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. — Л., 1983.
14. Кошель С.М. Цифровое моделирование и анализ геополей с помощью пакета «МАГ» // Взаимодействие картографии и геоинформатики / под ред. А.М. Берлянта, О.Р. Мусина. — М., 2000.
15. Gorte V.G.H., Koolhoven W. Interpolation between isolines based on the Borgefors distance transform // ITC Journal. — 1990. — №3.
16. Ерлов Н.Г. Оптика моря. — Л., 1980.
17. Апонасенко А.Д. Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Красноярск, 2001.
18. Пушистов П.Ю., Викторов Е.В. Прикладной системный анализ циркуляций и термического режима Телецкого озера. — Барнаул, 2016.