

Определение трофического статуса пресноводных озер Алтайского края в период 2013–2016 гг. по гидрооптическим характеристикам

И.А. Суторихин^{1,2}, О.Б. Акулова¹, В.И. Букатый¹, И.М. Фроленков¹

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

²Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Evaluation of Trophic Status of Freshwater Lakes in Altai Krai in 2013–2016 with Hydro-Optical Characteristics

I.A. Sutorikhin^{1,2}, O.B. Akulova¹, V.I. Bukaty¹, I.M. Frolenkov¹

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

²Altai State University (Barnaul, Russia)

В связи с тем, что главным из показателей загрязненности различных водоемов считается определение их трофности, работа посвящена методам определения трофического статуса пресноводных озер Алтайского края. Трофический статус водоема определяется показателями физико-химической и биологической природы. Оценка трофического статуса озер, как правило, базируется на количественных зависимостях показателей биологической продуктивности вод от содержания в них элементов минерального питания (азота и фосфора), обеспеченность которыми оказывает определяющее влияние на развитие и фотосинтез фитопланктона. Анализ данных, полученных авторами за период исследований в 2013–2016 гг. трех разнотипных водоемов (озер Лапа, Красиловское и Большое Островное), позволяет заключить, что для определения трофического статуса (наряду с трофическим индексом Карлсона) можно использовать значения интегральной характеристики — спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$. Конкретно: олиготрофному типу водоемов будет соответствовать диапазон значений $\varepsilon(\lambda)$ от 0 до 2 м⁻¹, мезотрофному — от 2 до 3 м⁻¹, эвтрофному — от 3 до 23 м⁻¹, гиперэвтрофному — от 23 м⁻¹ и более. В результате расчетов получено, что трофический статус оз. Лапа можно охарактеризовать как эвтрофное, оз. Красиловское — эвтрофно-гиперэвтрофное, оз. Большое Островное — гиперэвтрофное.

Ключевые слова: озера, трофность, показатель ослабления света, хлорофилл, прозрачность воды по диску Секки, фосфор.

The paper deals with methods for trophic status evaluation of freshwater lakes in Altai Krai, because the main indicator of pollution is linked with physical-chemical and biological indicators. The evaluation is usually based on quantitative dependences of water biological productivity on mineral nutrients (nitrogen and phosphorus) content that has a decisive influence on the development and photosynthesis of phytoplankton. The analysis of the research data on three different types of lakes (Lapa, Krasilovskoye and Bolshoye Ostrovnoye) obtained in 2013–2016 suggests that one can use an integral characteristic, i.e. spectral light attenuation $\varepsilon(\lambda)$ for trophic status evaluation (along with the Carlson's trophic index). For instance, $\varepsilon(\lambda)$ values within 0–2 м⁻¹ — correspond to oligotrophic type of water bodies, from 2 to 3 м⁻¹ — to mesotrophic, from 3 to 23 м⁻¹ — to eutrophic, from 23 м⁻¹ and more — to hyper eutrophic ones. According to calculations, Lake Lapa is referred to eutrophic, Lake Krasilovskoye — to eutrophic and hyper eutrophic, and Lake Bolshoye Ostrovnoye — to hyper eutrophic ones.

Key words: lakes, trophicity, light attenuation coefficient, chlorophyll, water transparency by Secchi disk, phosphorus.

Введение. В условиях значительной остроты водно-экологических проблем большую актуальность приобрели вопросы интегральной оценки состояния и устойчивости водных экосистем, в том числе многочисленных малых озер. Это связано как с решением задач диагностики и прогноза состояния водных объектов, так и с развитием методов и средств экологического нормирования. Для оценки трофического статуса пресноводных озер традиционно используют такие показатели, как концентрация хлорофилла «а», общего фосфора и азота, биомасса фитопланктона, прозрачность по диску Секки и др. Все они требуют специальных отдельных исследований и в обычной практике экологического мониторинга водных объектов определяются довольно часто [1–10]. В связи с этим возрастает значение иных интегральных показателей трофического состояния водоемов (особенно их

пространственно-временной изменчивости), по которым имеется недостаточно наблюдений. *Целью работы* является определение трофического статуса пресноводных озер на основе использования значений интегральной гидрооптической характеристики — спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена на основе анализа результатов, полученных авторами в период 2013–2016 гг. при исследовании трех пресноводных озер — Лапа, Красиловское и Большое Островное (Алтайский край). Водоемы отличаются по происхождению и положению в ландшафте, морфологии, проточности и степени трофности, т.е. являются разнотипными. Лимнологические характеристики озер представлены в таблице 1. Более подробное описание объектов исследования приведено в работе [11].

Таблица 1

Лимнологические характеристики озер

Озеро	$S, \text{ км}^2$	$H_{\text{макс}}, \text{ м}$	$H_{\text{ср}}, \text{ м}$	$SD, \text{ см}$	$\varepsilon(\lambda), \text{ м}^{-1}$	pH	$P_{\text{общ}}, \text{ мг/дм}^3$	$Chl_{\text{«а»}}, \text{ мг/м}^3$
Лапа	0,76	11,5	–	40–150	1,0–13,6	7,2–8,6	0,022–0,04	0,2–35,4
Красиловское	0,80	6,5	2,7	40–150	2,6–14,3	6,2–8,7	0,056–0,08	0,2–56,0
Большое Островное	28,60	5,6	0,9–1,8	25–45	7,8–35,8	8,5–9,1	0,064–0,15	0,2–49,8

Примечание. S — площадь зеркала, $H_{\text{макс}}$ — максимальная глубина, $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина, SD — прозрачность по диску Секки, $\varepsilon(\lambda)$ — спектральный показатель ослабления света (при $\lambda = 430^\circ \text{ нм}$), pH — водородный показатель, $P_{\text{общ}}$ — концентрация общего фосфора, $Chl_{\text{«а»}}$ — концентрация хлорофилла «а», «прочерк» — данные не определялись.

Для определения прозрачности (коэффициента пропускания) воды применяли спектрофотометрический метод, в основу которого положен принцип измерения отношения двух световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. В качестве последней использовалась дистиллированная вода высокой очистки. Спектральные измерения проводились в лаборатории с помощью спектрофотометра типа ПЭ-5400УФ. Затем рассчитывалась первичная гидрооптическая характеристика — спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ по формуле

$$\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T), \quad (1)$$

где L — длина кюветы, $T = I / I_0$ — прозрачность в относительных единицах, I, I_0 — интенсивность прошедшего и падающего света соответственно, λ — длина волны света. Абсолютная погрешность величины $\varepsilon(\lambda)$ обусловлена погрешностью измерения коэффициента пропускания с помощью спектрофотометра и погрешностью определения длины кюветы. Максимальная абсолютная погрешность

измерений показателя ослабления света составила около $0,5 \text{ м}^{-1}$.

Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно [12] и методическим рекомендациям.

Содержание общего фосфора в воде исследуемых озер определяли под руководством д-ра хим. наук Т.С. Папиной в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН фотометрическим методом после окисления персульфатом [13].

Обсуждение результатов. Трофический статус озера — это результат сложного взаимодействия процессов, происходящих под воздействием природных и антропогенных факторов не только в самом водоеме, но и на всем его водосборе [14]. Трофический статус исследуемых озер оценивался с применением трофического индекса TSI (Trophic State Index) Карлсона. В основу расчетов TSI положены тесные корреляции между параметрами водной среды: прозрачностью (SD), концентрацией хлорофилла ($Chl_{\text{«а»}}$) и содержанием общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) (табл. 2).

Таблица 2

Трофический статус водоема [2]

Тип водоема	TSI	Прозрачность, м (SD)	$P_{общ}$, мг/м ³	$Chl_{«a»}$, мг/м ³
Олиготрофный	0	64	0,75	0,04
	10	32	1,5	0,12
	20	16	3	0,34
	30	8	6	0,94
Мезотрофный	40	4	12	2,6
	50	2	24	6,4
Эвтрофный	60	1	48	20
	70	0,5	96	56
Гиперэвтрофный	80	0,25	192	154
	90	0,12	384	427
	100	0,062	768	1183

Регрессионные уравнения для расчета индекса Карлсона имеют следующий вид:
для прозрачности по диску Секки

$$TSI_{SD} = 60 - 14.14 \cdot \ln SD, \quad (2)$$

для концентрации хлорофилла

$$TSI_{Chl} = 9.81 \cdot \ln Chl_{«a»} + 30.6, \quad (3)$$

для концентрации общего фосфора

$$TSI_p = 14.42 \cdot \ln P_{общ} + 4.15. \quad (4)$$

В связи с тем, что границы между различными категориями трофности часто оказываются размытыми в зависимости от сезона года, для анализа изменений трофического статуса исследуемых водоемов была использована шкала, включающая наряду с категориями олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные и гиперэвтрофные воды также переходные категории: мезотрофно-эвтрофные и эвтрофно-гиперэвтрофные (табл. 3). Среднее значение относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период, составило для оз. Большое Островное 38 см, для озер Лапа и Красиловское — 92 и 91 см соответственно.

Таблица 3

Трофический статус пресноводных озер Алтайского края (по индексу Карлсона и спектральному показателю ослабления света)

Озеро	$Chl_{«a»}$, мг/м ³	SD, м	TP, мг/м ³	ϵ , м ⁻¹ ($\lambda=430$ нм)	TSI	Тип водоема
<i>Август 2013</i>						
Красиловское	12,05	1,20	50	8,7	58	Мезотрофно-эвтрофный
Лапа	9,24	1,50	40	5,2	54	Эвтрофный
Большое Островное	46,10	0,25	110	23,7	73	Эвтрофно-гиперэвтрофный
<i>Май 2014</i>						
Красиловское	31,26	0,40	80	14,3	68	Эвтрофный
Лапа	5,94	1,25	25	3,70	52	Эвтрофный
Большое Островное	35,19	0,25	150	31,0	74	Гиперэвтрофный
<i>Июль 2014</i>						
Красиловское	31,47	0,85	50	7,2	62	Эвтрофный
Лапа	17,92	0,70	40	8,9	60	Эвтрофный
Большое Островное	49,85	0,40	110	26,2	71	Эвтрофно-гиперэвтрофный
<i>Октябрь 2014</i>						
Красиловское	36,25	1,05	56	5,7	62	Эвтрофный
Большое Островное	40,75	0,35	90	23,2	70	Эвтрофно-гиперэвтрофный
Лапа	13,53	0,85	38	7,1	58	Мезотрофно-эвтрофный
<i>Май 2015</i>						
Большое Островное	27,6	0,4	75	18,5	58	Мезотрофно-эвтрофный
Лапа	14,3	0,4	40	13,6	53	Мезотрофно-эвтрофный

Озеро	Chl_{a+b}^{a+b} мг/м ³	SD, м	TP, мг/м ³	$\epsilon, м^{-1}$ ($\lambda=430 нм$)	TSI	Тип водоема
<i>Август 2015</i>						
Красиловское	14,8	1	50	11,2	59	Эвтрофный
Большое Островное	40,3	0,4	90	22,7	69	Эвтрофно-гиперэвтрофный
Лапа	17,1	0,7	40	6,1	59	Эвтрофный
<i>Октябрь 2015</i>						
Красиловское	25,3	0,7	52	6,5	62	Эвтрофный
Большое Островное	54,5	0,4	130	30,2	72	Эвтрофно-гиперэвтрофный
<i>Август 2016</i>						
Лапа	6,31	1,11	39	6,7	54,71	Эвтрофный
Большое Островное	11,15	0,40	84	21,3	65,02	Эвтрофный

Анализ данных, представленных в таблице 3, позволяет заключить, что для определения трофического статуса исследуемых разнотипных озер (наряду с TSI Карлсона) можно использовать значения интегральной характеристики — спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$, а именно: олиготрофному типу водоемов будет соответствовать диапазон значений $\epsilon(\lambda)$ от 0 до 2 м⁻¹, мезотрофному — от 2 до 3 м⁻¹, эвтрофному — от 3 до 23 м⁻¹, гиперэвтрофному — от 23 м⁻¹ и более.

Заключение. Существующие многочисленные классификации по определению трофического статуса водных объектов ориентированы на различные фиксированные показатели, которые не позволяют давать точные оценки трофического статуса, так как значения

концентрации хлорофилла «а», общего фосфора и относительной прозрачности по диску Секки варьируют в весьма широких пределах. Разработанный авторами метод оценки трофического статуса водных объектов позволяет повысить точность проводимых расчетов.

Первичная гидрооптическая характеристика — спектральный показатель ослабления света $\epsilon(\lambda)$ является наиболее объективной величиной для определения трофического статуса пресноводных озер в различные сезоны года при проведении экологического мониторинга водных экосистем.

Выполненные исследования показали, что трофический статус оз. Лапа можно охарактеризовать как эвтрофное, оз. Красиловское — эвтрофно-гиперэвтрофное, оз. Большое Островное — гиперэвтрофное.

Библиографический список

1. 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.
2. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. — 1977. — Vol. 22, No. 2.
3. Frumin G.T., Khuan Zhan-Zhan. Trophic Status of Fresh-Water Lakes in China // Russian Journal of General Chemistry. — 2011. — Vol. 81, No.13.
4. Kalenak D.S. Inherent optical properties of suspended particulates in four temperate lakes: application of in situ spectroscopy // Hydrobiologiy. — 2013.
5. Бульон В.В. Эвтрофирование и деэвтрофирование озер как реакция на изменение фосфорной нагрузки с водосборной площади // Теория и практика восстановления внутренних водоемов / под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. — СПб., 2007.
6. Гальцова В.В., Дмитриев В.В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных систем. — СПб., 2007.
7. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск, 2007.
8. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. — М., 2001.
9. Фрумин Г.Т., Хуан Жань-Жань. Трофическое состояние пресноводных озер Китая // Экологическая химия. — 2011. — Т. 20, вып. 1.
10. Хендерсое-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. — Л., 1990.
11. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, Н.Ф. Харламова, О.Б. Акулова ; отв. ред. В.Н. Седалищев. — Новосибирск, 2016.
12. ГОСТ 17.1.4.02-90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. — М., 2003.
13. ПНД Ф 14.1:2.106-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфора общего в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом после окисления персульфатом. — М., 1997 (изд-е 2004 г.).
14. Берникова Т.А., Нагорнова Н.Н., Цупикова Н.А. Возможность оценки трофического статуса водоема по величине перманганатной окисляемости (на примере озера Виштынецкого Калининградской области // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2013. — № 3.