

УДК 574.58

Сезонные изменения спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла *a* в разнотипных озерах

И.А. Суторихин^{1,2}, В.И. Букатый¹, О.Б. Акулова^{1*}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

²Алтайский государственный университет
656015, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

Поступила в редакцию 27.03.2014 г.

По результатам сезонных измерений спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла *a* в воде разнотипных озер Алтайского края в период 2011–2013 гг. найдена зависимость между этими показателями, представленная в виде аппроксимационной кривой, удовлетворяющей закону Бугера. Проведен анализ полученных экспериментальных данных с учетом дисперсного состава частиц (клеток) водорослей фитопланктона.

Ключевые слова: озера, спектральная прозрачность воды, показатель ослабления света, хлорофилл *a*, фитопланктон; lakes, water spectral transparency, light attenuation coefficient, chlorophyll *a*, phytoplankton.

Введение

В последнее время на фоне интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы возрастает научно-практический интерес к их состоянию, охране и рациональному использованию. Это в полной мере можно отнести к водоемам Алтайского края. К сожалению, в научной зарубежной [1–3] и отечественной [4–6] литературе существуют лишь разрозненные публикации по определению гидрооптических характеристик озер. Отличительная особенность наших исследований заключается в том, что прозрачность водоемов определялась с помощью объективного спектрофотометрического метода, в то время как подавляющее большинство результатов, приведенных в научной литературе по данному вопросу, получено с использованием субъективного метода по диску Секки. Однако последний обладает значительной погрешностью измерений (20% и более) и существенным ограничением его использования в зимних подледных условиях.

В гидрооптическом отношении озера Алтайского края изучены недостаточно. В этом направлении исследования только начинают развиваться [7]. Оценка качества воды и контроль состояния таких водоемов необходимы для проведения и выполнения комплекса водоохраных мероприятий, направленных на предотвращение отрицательных экологических последствий антропогенного воздействия, защиту водоемов от истощения, загрязнения и эвтрофикации. Поэтому водные объекты края представляют не только теоретический, но и практический интерес в исследованиях гидрофизических, гидрохимических

и гидробиологических характеристик. В связи с этим изучение сезонных изменений спектральной прозрачности воды на различных глубинах водоемов, а также нахождение эмпирической зависимости прозрачности воды от содержания хлорофилла *a* и оценка влияния дисперсных частиц органоминеральной взвеси на показатель ослабления света в озерной воде являются новыми и актуальными. Это необходимо для классификации озерных экосистем по конкретным признакам на данной территории. Следует отметить, что озера классифицируют по различным параметрам, но важно помнить, что все классификации условны и относительно [8].

Краткая характеристика водоемов

Основными объектами исследований были выбраны три озера (Лапа, Красиловское и Большое Островное), которые относятся к водоемам различного происхождения и степени трофности, т.е. являются разнотипными, что обусловлено гидрологическими особенностями экосистем, литологией пород, составом вод питающего бассейна и различной степенью антропогенной нагрузки.

Озеро Лапа по происхождению и положению в ландшафте относится к пойменным озерам, принадлежит к придаточной системе правобережной поймы р. Оби и расположено в окрестностях г. Барнаула. Озеро является непроточным и может сообщаться с рекой только в период весеннего половодья. В ходе наших исследований из-за малого паводка озеро с Обью не сообщалось. Максимальная глубина озера 11,5 м, площадь зеркала 0,76 км² [9]. По результатам наших исследований его можно отнести к эвтрофному типу.

Надпойменное оз. Красиловское расположено на правобережье р. Оби, в зоне сочленения так

* Игорь Анатольевич Суторихин (sia@iwep.ru); Владимир Иванович Букатый (v.bukaty@mail.ru); Ольга Борисовна Акулова (akulova8282@mail.ru).

называемых боровых террас с четвертой террасой Верхней Оби на абсолютной высоте 220 м. Озеро питается как поверхностными, так и грунтовыми водами и является бессточным. По биопродуктивности оно относится к мезотрофному типу. В нем хорошо развит фитопланктон. Направление эволюции озера — заиливание и зарастание. Площадь зеркала равна 1,8 км², максимальная глубина озера 11 м (batimетрические данные предоставлены с.н.с. В.П. Галаховым, ИВЭП СО РАН).

Эрозионное оз. Большое Островное расположено в долине древнего стока р. Касмалы, площадь зеркала 28,6 км². Озеро является проточным. Максимальная глубина 5,6 м. Берега большей частью низкие, заболоченные. Вдоль восточного берега тянется Касмалинский ленточный бор. Дно озера песчаное, по трофности — гиперэвтрофное [10].

Методика исследований

В последние годы в изучении водных экосистем в нашей стране и за рубежом успешно разрабатывается структурно-функциональный метод, связывающий гидрооптические, гидротермические, гидробиологические характеристики с дисперсной структурой водоемов (концентрацией хлорофилла, растворенного и адсорбированного вещества, среднего размера взвешенных органоминеральных частиц и др.). Необходимо отметить, что в настоящее время в научной литературе представлены экспериментальные данные по взаимосвязи между прозрачностью водоемов и содержанием хлорофилла в основном для морей и океанов [11–13]. Подобные исследования для внутренних водоемов в нашей стране (озер, водохранилищ, рек и т.д.) проводились лишь эпизодически [14–16]. В Институте водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул) в последние годы создавалась экспериментальная база и разрабатывались методы по определению спектральной прозрачности воды и связи с содержанием хлорофилла в фитопланктоне и его дисперсной структурой во внутренних водоемах Алтайского края [17].

Для определения прозрачности (коэффициента пропускания) воды мы использовали 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 стационарного СФ-46 и мобильного ПЭ-5400УФ спектрофотометров для измерений *in situ*. Первая проба помещалась в измерительную (рабочую) кювету, вторая — в кювету сравнения.

Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ 17.1.4.02-90 и методическим рекомендациям [18] с погрешностью 10%.

Количество и размеры клеток фитопланктона определялись с помощью камеры Нажотта объемом 0,05 мл с использованием светового микроскопа Nikon Eclipse 80i.

Исследования на озерах проводились в разные сезоны 2011–2013 гг. Количественные пробы воды объемом 0,5 л отбирались специально изготовленным лабораторным батометром через 0,5–1 м по глубине. Измерения спектральной прозрачности воды проводились спустя 1–3 ч после взятия проб в лабораторных условиях в области спектра 400–800 нм на вышеуказанных спектрофотометрах с погрешностью 0,5%. Водные пробы помещались в кварцевые кюветы. В различных сериях измерений использовались кюветы длиной 10 и 12 мм. Пробы с придонного горизонта брались на расстоянии 15–20 см от донного ила для предотвращения его взмучивания. Затем рассчитывалась первичная гидрооптическая характеристика — показатель ослабления света ϵ (физическая величина, являющаяся суммой показателей поглощения и рассеяния света) по формуле

$$\epsilon = (1/\ell) \ln(1/T), \quad (1)$$

где ℓ — рабочая длина кюветы; $T = I/I_0$ — прозрачность, отн. ед.; I, I_0 — интенсивности прошедшего и падающего света.

Результаты исследований

Результаты вычислений спектрального показателя ослабления света на различных глубинах озер по данным сезонных измерений спектральной прозрачности показали, что максимальные его значения имеют место в пробах воды, отобранных в придонном слое водоемов. Следует иметь в виду, что глубина оз. Лапа в месте отбора проб 10 м, оз. Красилоское 5 м, оз. Большое Островное 2 м. В разные сезоны, когда проводились исследования, глубина озер незначительно менялась. В целом для оз. Лапа показатель ослабления в диапазоне длин волн 400–800 нм зимой (в феврале), весной, до (в марте) и после (в мае) вскрытия льда, осенью (в октябре) до ледостава в придонном слое водоема существенно меньше, чем летом (в июле–августе). Это, на наш взгляд, обусловлено изменением соотношения между размерами клеток водорослей фитопланктона и их счетной концентрацией в различные периоды, что подтверждается нашими расчетами показателя ослабления света на основе табличных данных [19]. Для сравнения на рис. 1 приведены зависимости спектрального показателя ослабления света в поверхностном слое трех озер в зимний и летний периоды 2013 г.

Для оценки влияния рассеивающих и поглощающих свойств частиц (клеток) фитопланктона на прозрачность нами проводились измерения коэффициента пропускания воды до и после фильтрации пробы. Полученная разность спектральной зависимости $\Delta\epsilon$ представляет собой фактически показатель ослабления света пробой воды, содержащей крупные частицы (диаметром более 0,8 мкм).

Результаты определения концентрации хлорофилла a в озерах выявили различия вертикального распределения содержания пигмента в разные сезоны. Исследуемые водоемы характеризуются более высокими показателями концентрации хлорофилла a

в основном в придонном горизонте озер по сравнению с поверхностным, что обусловлено, на наш взгляд, процессами разложения и минерализации растительных остатков и активными процессами химического обмена, происходящими на границе водораздела «вода—дно» (слой иловых масс). В сезонной динамике распределения содержания хлорофилла в озерах отмечена тенденция накопления его в течение вегетационного периода и снижения его содержания в условиях подледного режима, когда подо льдом и покрывающим его слоем снега фотосинтез фитопланктона практически прекращается и количество первичной продукции становится близким к нулю.

Аппроксимационные кривые зависимости прозрачности воды от содержания хлорофилла a для озер Лапа, Красилловское и Большое Островное в различные сезоны представлены на рис. 2–4. Здесь

R^2 — квадрат коэффициента корреляции, P — достоверность. Аппроксимация экспериментальных точек проводилась в соответствии с законом Бутера. Выбор рабочей длины волны $\lambda = 430$ нм обусловлен прежде всего тем фактом, что наибольший главный максимум поглощения хлорофиллом a , содержащимся в клетках водорослей фитопланктона, находится в области 430–440 нм [13].

Результаты определения концентрации хлорофилла a в озерах выявили различия вертикального распределения его содержания в разные сезоны. Так, например, в феврале 2013 г. концентрация хлорофилла a в поверхностном слое была наименьшей в оз. Лапа и составила $0,25 \text{ мг/м}^3$. В оз. Красилловское и оз. Большое Островное она была на порядок выше ($3,71$ и $3,91 \text{ мг/м}^3$ соответственно) и практически совпадала в этих двух озерах. В августе 2013 г. содержание хлорофилла в поверхностном горизонте

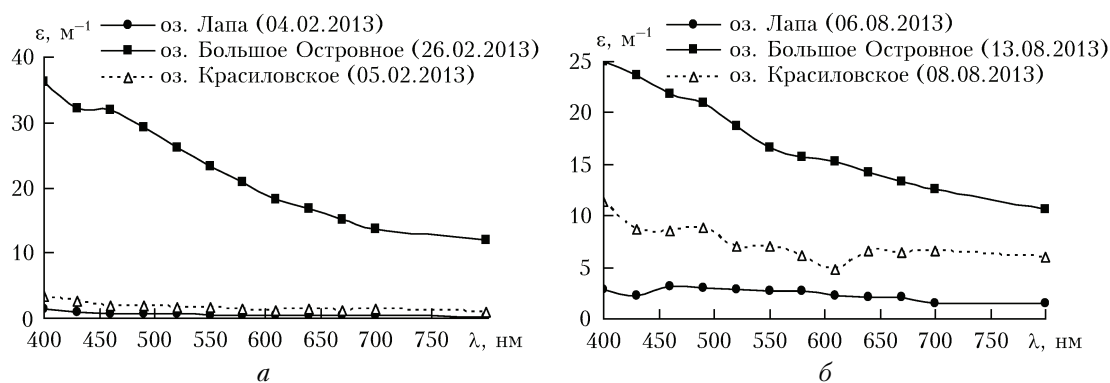


Рис. 1. Зависимость спектрального показателя ослабления ε от длины волны λ в поверхностном слое разнотипных озер в феврале (а) и августе (б) 2013 г.

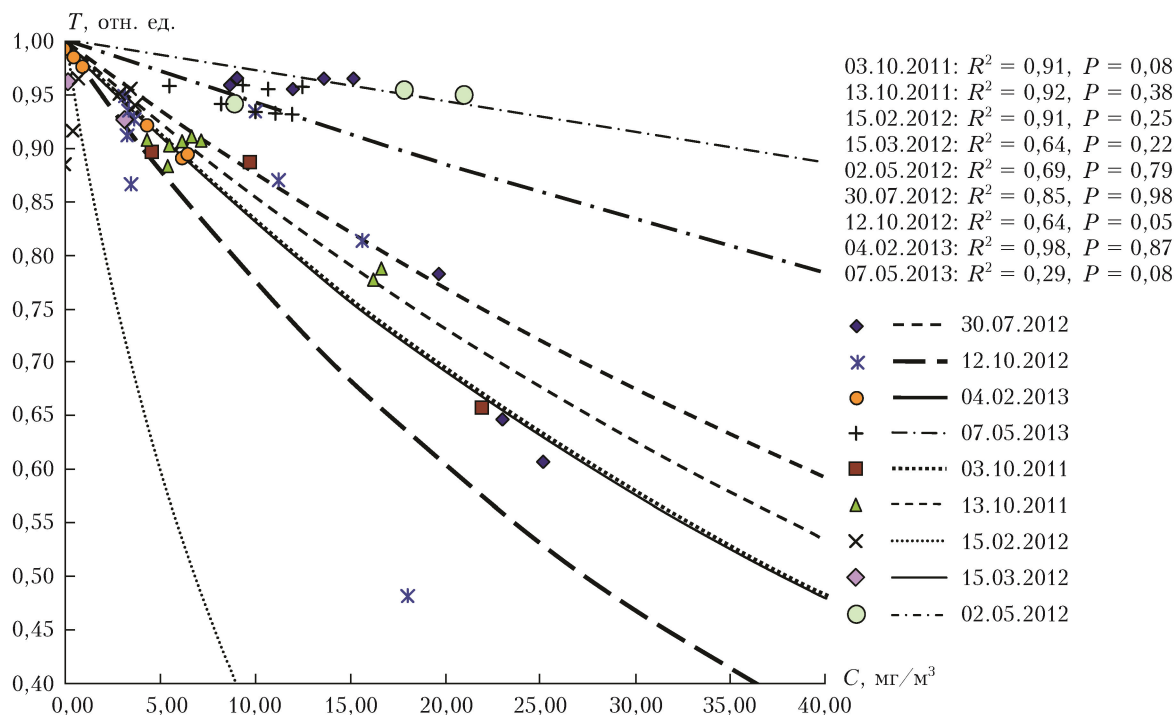


Рис. 2. Зависимость прозрачности воды T на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла a на оз. Лапа в разные сезоны 2011–2013 гг.

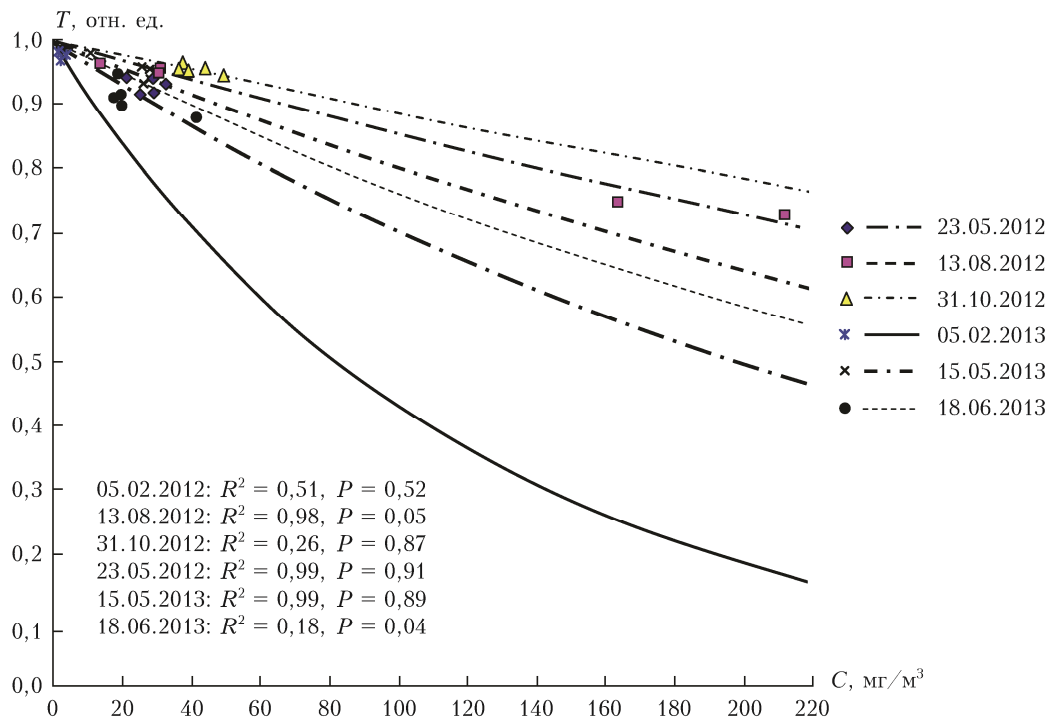


Рис. 3. Зависимость прозрачности воды T на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла a на оз. Красиловское в разные сезоны 2012–2013 гг.

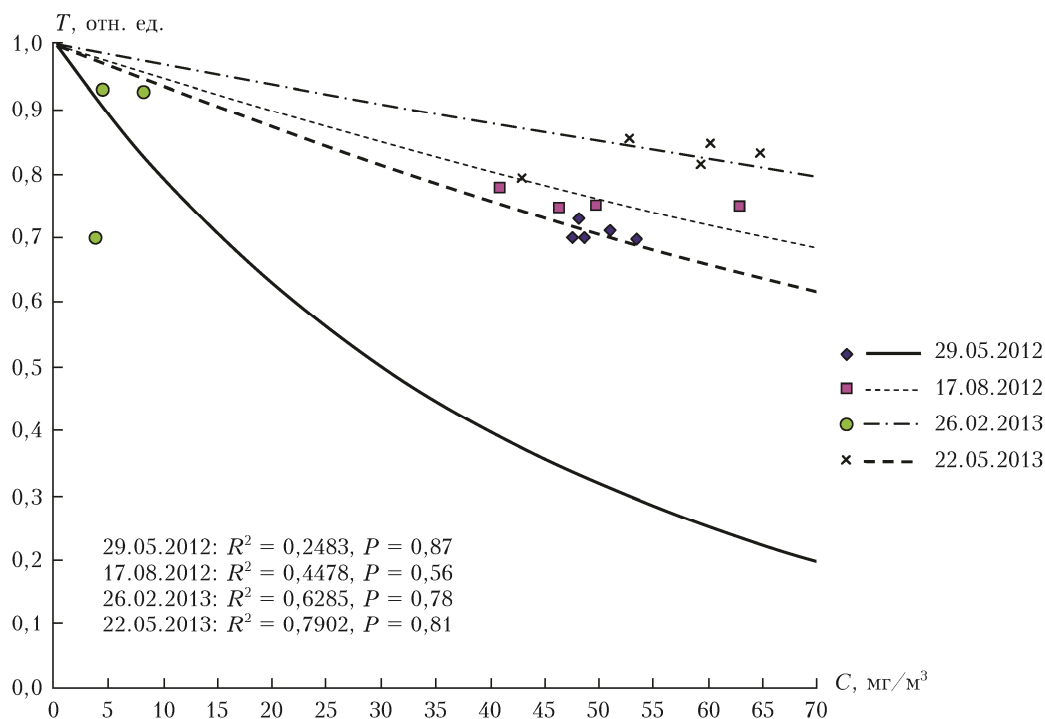


Рис. 4. Зависимость прозрачности воды T на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла a на оз. Большое Островное в разные сезоны 2012–2013 гг.

озер Лапа (6 августа), Красиловское (8 августа) и Большое Островное (13 августа) составило соответственно 9,24; 12,05 и 46,10 мг/м³. Таким образом, в озерах Лапа и Красиловское летние концентрации пигмента по сравнению с зимними увеличи-

лись примерно в 40 раз и в 4 раза соответственно. Для оз. Большое Островное это увеличение составило около 10 раз. В летний период вертикальное распределение было более неравномерным (более подробно рассмотрено в [20]).

Пробы воды, отобранные из придонных горизонтов озер Красиловское (5–5,5 м) и Большое Островное (1,5–2 м), имели сероводородный запах, который характерен для разлагающейся массы скопленных водорослей в условиях гипертрофии экосистемы водоема.

В ходе исследований необходимо было определить микрофизические параметры гидрозолей (органической взвеси) в связи с тем, что ослабление света в большинстве озер обусловлено, в основном, поглощением и рассеянием на взвешенных частицах биологического происхождения. Аппроксимация этих данных проводилась в соответствии с формулой Юнге. Для данного случая было обработано 50 микрофотографий по 10 пробам с общим количеством частиц 7410, что обеспечивает хорошую статистику и свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов. По результатам сезонных измерений методом оптической микроскопии размеры клеток в пробах озер находились преимущественно в пределах 0,6–7,5 мкм по радиусу.

В ходе гидрооптических исследований нужны были измерения во всем диапазоне возможных размеров гетерогенной дисперсной системы, встречающейся в естественных водных объектах. Фитопланктон в озерах разнообразен, и размер его клеток и колоний различается на несколько порядков. Мелкие по размеру водоросли обладают более высокой физиологической активностью. Замечено, что в процессе эвтрофирования или при стрессовых воздействиях происходит сдвиг в сторону увеличения численности мелкоклеточных видов [21].

Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований спектральной прозрачности воды в диапазоне 400–800 нм в различные сезоны 2011–2013 гг. для трех разнотипных озер Алтайского края можно сделать следующие выводы. Полученные данные можно считать репрезентативными применительно к средним и малым водоемам. Рассчитанные нами спектральные показатели ослабления на основе экспериментальных данных о прозрачности изучаемых озер испытывают заметные изменения по спектру и не коррелируют с показателями поглощения для чистой (дистиллированной) воды. Это следует из анализа спектральной зависимости показателя поглощения чистой воды [13] в исследуемом нами диапазоне длин волн. На наш взгляд, это обусловлено преимущественно рассеянием и поглощением света на органических и минеральных частицах взвеси.

По данным сезонных измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла *a* на разных глубинах озер обнаружена обратная зависимость величины прозрачности на исследуемых длинах волн от концентрации основного фотосинтетического пигмента. Прозрачность водоемов несколько уменьшается в придонном слое вследствие оседания отмерших клеток водорослей фитопланктона и взмучивания донных отложений.

Исследования сезонной динамики гидрооптических характеристик выявили, что наибольшие значения показателя ослабления практически во всем изучаемом спектральном диапазоне наблюдаются в конце летнего периода, наименьшие — зимой, до вскрытия льда. Это обусловлено массовым развитием водорослей, более высокой концентрацией и большими размерами частиц (клеток) водорослей фитопланктона.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией водной экологии В.В. Кириллову за помощь в работе, н.с. А.В. Котовщикову за данные измерений концентрации хлорофилла, м.н.с. О.С. Сутченковой за предоставленные фотографии водорослей фитопланктона для расчета концентрации и размерного состава клеток, а также аспирантке У.И. Залаевой за помощь при обработке данных.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131. «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения» и программы Президиума РАН 4.2 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири».

1. *Alm G.* Limnologisch-fischereiliche Untersuchungen in dem Kälarne-Seen // Inst. Freshwater Res. Rep., Lund. 1960. N 41. S. 5–148.
2. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22, N 2. P. 361–369.
3. *Joel W.H., Ralph E.H.S.* The spectral sensitivity of phytoplankton communities to ultraviolet radiation-induced photoinhibition differs among clear and humic temperate lakes // Limnol. Oceanogr. 2011. N 56(6). P. 2115–2126.
4. *Бульон В.В.* Связь между концентрацией планктона и прозрачностью воды в озерах и водохранилищах // Морфология, систематика и эволюция животных: Сб. науч. работ. Л.: Зоол. ин-т, 1978. С. 49–50.
5. *Ильмаст Н.В., Китаев С.П., Кучко Я.А., Павловский С.А.* Гидроэкология разнотипных озер Южной Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 92 с.
6. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
7. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Котовщиков А.В., Акулова О.Б.* Сезонная динамика спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в пойменном озере с учетом дисперсности частиц фитопланктона // Изв. АлтГУ. 2012. № 1/2. С. 173–177.
8. *Захаров С.Г.* К вопросу о классификации озер и озеровидных водоемов // Изв. Русского геогр. общества. 2002. Т. 134, вып. 3. С. 25–27.
9. *Ресурсы поверхностных вод СССР.* Гидрологическая изученность. М.: Гидрометеиздат, 1967. Т. 15, вып. 2. Средняя Обь. 356 с.
10. *Кириллов В.В., Зарубина Е.Ю., Безматерных Д.М., Ермолаева Н.И., Кириллова Т.В., Яныгина Л.В., Долматова Л.А., Котовщиков А.В., Жукова О.Н., Соколова М.И.* Сравнительный анализ экосистем разнотипных озер Касмалинской и Кулундинских долин древнего стока // Наука – Алтайскому краю. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2009. 354 с.
11. *Анонасенко А.Д.* Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их

- дисперсной структурой: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Красноярск: Ин-т вычисл. моделирования СО РАН, 2001. 316 с.
12. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 350 с.
 13. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
 14. *Апонасенко А.Д., Филимонов В.С., Сиренко Л.А., Перфильев В.А., Шевченко С.Н.* Концентрация хлорофилла *a*, флуоресценция растворенных органических веществ и первичные гидрооптические характеристики вод Дуная // Гидробиол. ж. 1991. Т. 27, № 5. С. 22–27.
 15. *Лопатин В.Н., Апонасенко А.Д., Щур Л.А.* Биофизические основы оценки водных экосистем. Новосибирск: Наука, 2000. 360 с.
 16. *Сидько Ф.Я., Апонасенко А.Д., Васильев В.А.* Экспрессный спектрофотометрический метод определения концентрации хлорофилла фитопланктона // Гидробиол. ж. 1989. Т. 25, № 5. С. 66–71.
 17. *Суторихин И.А., Бортников В.Ю., Черепанова Е.И., Дьяченко А.В.* Автоматизированные системы для оценки прозрачности поверхностного слоя воды // XII Междунар. научно-техн. конф. «ИКИ». Барнаул, март, 2011. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. С. 195–199.
 18. *Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*.* ГОСТ 17.1.4.02-90. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.
 19. *Шифрин К.С., Салганик И.Н.* Таблицы по светорассеянию. Т. 5. Рассеяние света моделями морской воды. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 219 с.
 20. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б., Залаева У.И.* Сезонная динамика гидрофизических характеристик в озерах Алтайского края за период 2011–2013 гг. // Ползуновский альманах. 2013. № 1. С. 98–101.
 21. *Поздняков Ш.Р.* Наносы в реках, озерах и водохранилищах в расширенном диапазоне размера частиц: Дис. ... докт. г. н. СПб.: Ин-т озероведения РАН, 2011. 399 с.

I.A. Sutorikhin, V.I. Bukaty, O.B. Akulova. Seasonal changes of water spectral transparency and concentration of chlorophyll *a* in different-type lakes.

By results of seasonal measurements of spectral transparency and concentration of chlorophyll *a* dependence is found in water of different-type lakes of Altai Krai during 2011–2013 between these indicators, presented in the form of approximating curve, satisfying the Bouguer law. The analysis of the obtained experimental data taking into account disperse structure of particles (cages) of seaweed phytoplankton is carried out.