

*И. А. Суторихин, В. И. Букастый, О. Б. Акулова*

### **Динамика гидрооптических характеристик разнотипных озер Алтайского края\***

*I. A. Sutorikhin, V. I. Bukaty, O. B. Akulova*

### **Dynamics of Hydrooptical Characteristics of Polytypic Lakes at the Altai Territory**

Приведены результаты сезонных измерений спектральной прозрачности воды в диапазоне длин волн 400–800 нм в разнотипных озерах Алтайского края в 2011–2012 гг. Найдена обратная зависимость между спектральной прозрачностью и концентрацией хлорофилла «а», определяемой стандартным спектрофотометрическим методом. Данная зависимость представлена в виде аппроксимационной кривой, удовлетворяющей закону Бугера.

**Ключевые слова:** спектральная прозрачность, показатель ослабления света, хлорофилл.

Внутренние водоемы в настоящее время значительно подвергаются различным нагрузкам. Наряду с влиянием факторов природного свойства озерные экосистемы испытывают всё возрастающее антропогенное воздействие. В большинстве случаев это приводит к ухудшению качества воды, нарушению биологического равновесия и, в перспективе, разрушению водной экосистемы. В решении этих проблем важную роль играют комплексные системы оперативного экологического контроля (мониторинга).

Озера являются важными природными объектами ввиду их экологических особенностей, социально-экономического, научного и культурного значения. Для большинства исследуемых водных объектов существуют проблемы изменения состояния озерных экосистем, их охраны и использования. В настоящее время разработано множество детальных классификаций озерных экосистем по конкретным признакам, при этом возникает проблема в определении точного количества озер, расположенных на данной территории. В качестве примера можно привести озера Алтайского края, количество которых (по разным подсчетам) колеблется в пределах от 11 до 13 тыс. [1, 2].

Вышеизложенное послужило основанием для продолжения проведенных исследований, основная цель которых — изучение сезонных изменений спектральной прозрачности воды на различных глубинах раз-

The work gives the results obtained during seasonal measurement of water spectral transparency in wavelength range of 400–800 nanometers in polytypic lakes at the Altai Territory in 2011–2012. The researchers found inverse relationship between spectral transparency and concentration of a chlorophyll «a» defined by a standard spectrophotometric method. This dependence is presented in a form of approximated curve which is satisfying the Buger law.

**Key words:** spectral transparency, light attenuation, chlorophyll.

нотипных озер, нахождение эмпирической зависимости прозрачности воды от содержания хлорофилла «а», оценка влияния дисперсных частиц (клеток) водорослей фитопланктона на показатель ослабления света в водных пробах.

Подобные исследования представляются актуальными, так как между концентрацией хлорофилла «а», являющимся основным фотосинтетическим пигментом фитопланктона, и прозрачностью существует определенная зависимость [3–7]. Исследуемые нами озера Алтайского края (Лапа, Красиловское и Большое Островное) относятся к водоемам различного происхождения и степени трофности (*трофность* — это характеристика водоема по его биологической продуктивности), т. е. являются разнотипными, что обусловлено гидрологическими особенностями экосистем, литологией пород, составом вод питающего бассейна и различной степенью антропогенной нагрузки. Следует иметь в виду, что для объективной оценки трофического статуса озер необходимо использовать большое число показателей: прозрачность, содержание биогенных элементов, хлорофилла «а», первичную продукцию фитопланктона и макрофитов, биомассу фитопланктона, бентоса, рыбы и др. [8].

Необходимо отметить, что в зарубежной [9–14] и отечественной [15–17] научной литературе данные по гидрооптическим свойствам воды в озерных экоси-

\* 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 фундаментальных исследований в рамках проекта научно-образовательного комплекса №2 «Геоэкологический мониторинг и прогнозирование состояния климата и устойчивого социально-экономического развития региона».

стемах представлены по исследованиям прозрачности и ее взаимосвязи с концентрацией хлорофилла, в основном, по белому диску Секки. Однако данный метод субъективен, вследствие чего погрешность измерений с его помощью может достигать значительных величин (20% и более).

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. Спектральные измерения проводились с помощью спектрофотометра СФ-46. Первая проба помещалась в измерительную (рабочую) кювету, вторая – в кювету сравнения [18].

Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТу 17.1.4.02–90 и методическим рекомендациям. В основе метода – спектрофотометрирование экстракта пигментов до и после его подкисления раствором соляной кислоты. Расчеты концентрации хлорофилла «а» основаны на известных удельных спектральных показателях поглощения света хлорофиллом «а» и основными компонентами, мешающими анализу. Для приготовления экстракта пробу воды фильтруют через мембранный фильтр «Владипор» МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм, пигменты экстрагируют водным ацетоном и удаляют центрифугированием из экстракта светорассеивающую взвесь [19]. Погрешность определения хлорофилла в нашем случае составила не более 10%. Количество и размеры клеток водорослей фитопланктона определялись с помощью счетной камеры Нажотта и светового микроскопа Nikon Eclipse 80 i.

Исследования на озерах проводились в разные сезоны в период 2011–2012 гг. В ходе исследований в лабораторных условиях проводились измере-

ния спектрального коэффициента пропускания воды в диапазоне 400–800 нм на спектрофотометре СФ-46 с погрешностью, равной 0,5%. Водные пробы, взятые на различных глубинах озер, помещались в кварцевые кюветы. В различных сериях измерений использовались кюветы с длиной пути 12 и 10 мм. Необходимо отметить, что измерения прозрачности проводились спустя 1–3 часа после взятия проб.

Далее рассчитывалась первичная гидрооптическая характеристика — *показатель ослабления света*  $\varepsilon$  в воде (физическая величина, являющаяся суммой показателей поглощения и рассеяния света) по формуле

$$\varepsilon = 1/\ell \cdot \ln(100/I), \quad (1)$$

где  $\ell$  – рабочая длина кюветы,  $I$  — относительная интенсивность света (%), прошедшего через воду.

Результаты наших расчетов по спектральному показателю 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 Бол. Островного в месте отбора проб – 2 м, Красиловского – 4,5 м, Лапы – 7 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 (15.02.2012) и весной, до (15.03.2012) и после (02.05.2012) вскрытия льда, осенью (12.10.2012), до ледостава, на различных глубинах существенно меньше, чем летом (30.07.2012). Это может быть 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, приведенных в работе [20]. Результаты спектральных измерений представлены на рисунках 1–2.

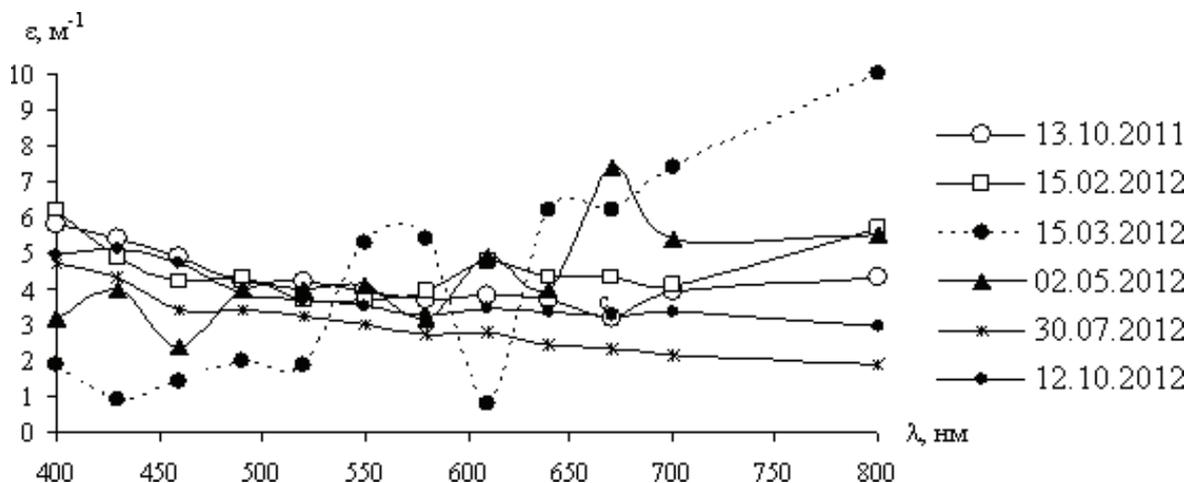


Рис. 1. Спектральная зависимость показателя ослабления света  $\varepsilon$  от длины волны  $\lambda$  в поверхностном слое оз. Лапа в различные сезоны

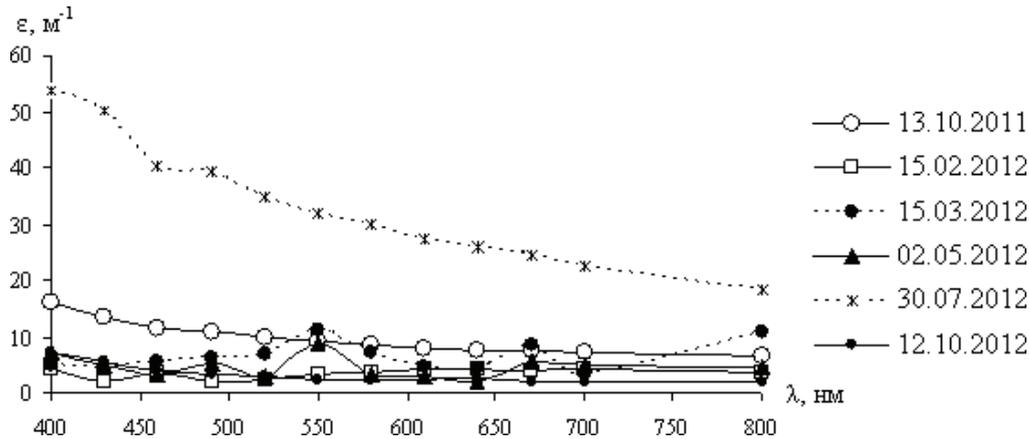


Рис. 2. Спектральная зависимость показателя ослабления света  $\epsilon$  от длины волны  $\lambda$  на глубине 7 м на оз. Лапа в различные сезоны

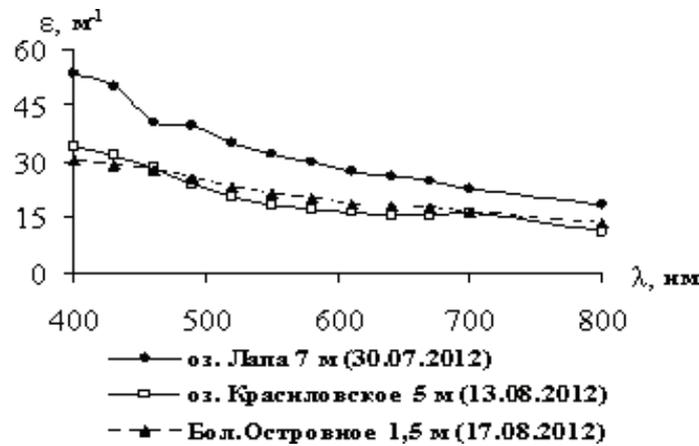


Рис. 3. Спектральная зависимость показателя ослабления  $\epsilon$  от длины волны  $\lambda$  в придонном слое разнотипных озер летом 2012 г.

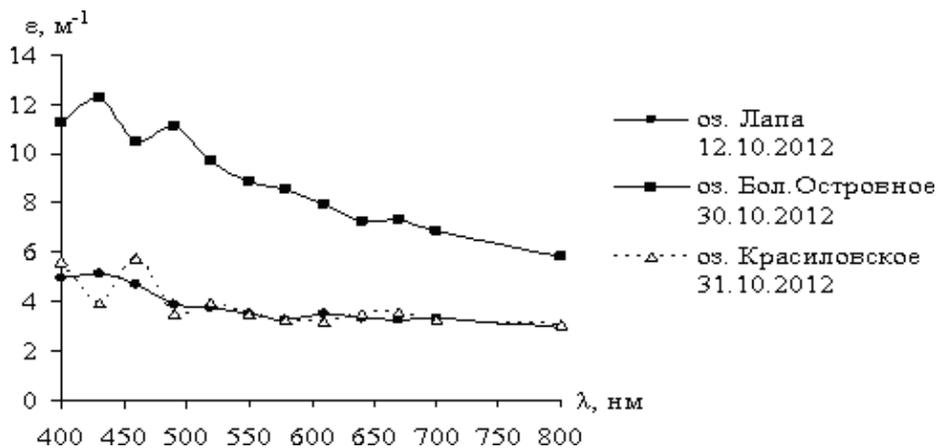


Рис. 4. Спектральная зависимость показателя ослабления  $\epsilon$  в диапазоне длин волн 400–800 нм в поверхностном слое разнотипных озер осенью 2012 г.

Для сравнения на рисунках 3–4 приведены спектральные зависимости показателя ослабления в поверхностном и придонном слоях исследуемых озер в летне-осенний период 2012 г.

Результаты определения концентрации хлорофилла «а» в озерах выявили различия вертикального распределения содержания пигмента в разные сезоны. Исследуемые озера характеризуются более высокими

показателями концентрации хлорофилла «а», в основном, в придонном горизонте водоемов 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 вегета-

ционного периода и снижения его содержания в условиях подледного режима, когда подо льдом и покрывающим его слоем снега фотосинтез фитопланктона практически прекращается и величины первичной продукции становятся близкими к нулю.

Аппроксимационные кривые зависимости прозрачности воды от содержания хлорофилла «а» для оз. Лапа в различные сезоны представлены на рисунке 5.

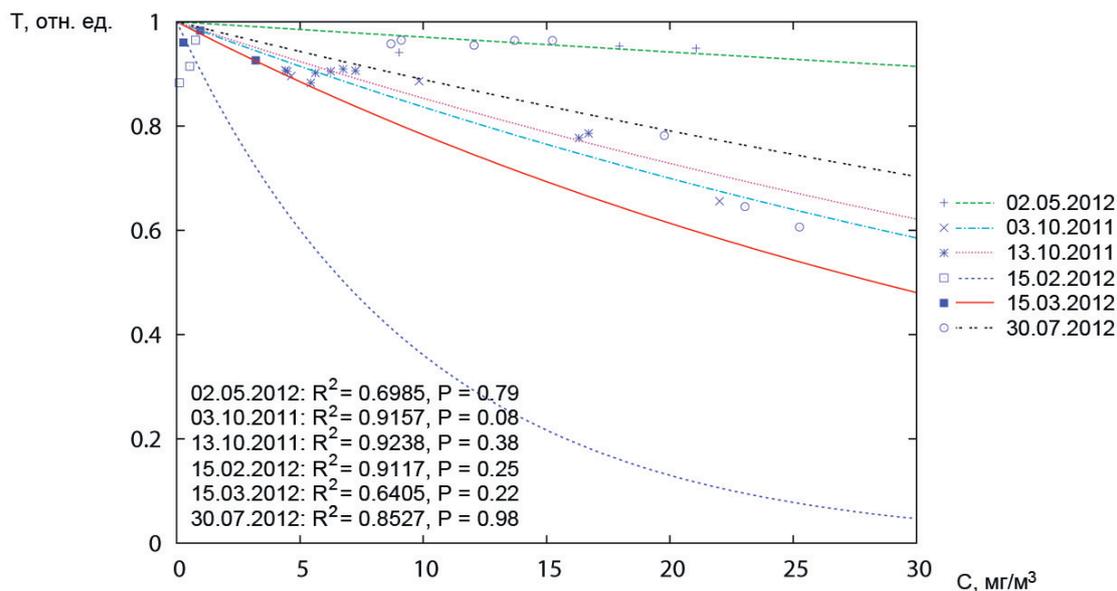


Рис. 5. Сезонная зависимость прозрачности воды T на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла «а» на оз. Лапа в 2011–2012 гг.

Из рисунка видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на аппроксимационные кривые, удовлетворяющие закону Бугера. При этом коэффициент корреляции лежит в диапазоне от 0.64 до 0.92, что говорит об удовлетворительной аппроксимации (модель в целом адекватна описываемому явлению).

Концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое озера Лапа 15 февраля 2012 г. равна 0,53 мг/м<sup>3</sup>, 15 марта 2012 г. — 0,95 мг/м<sup>3</sup>, но для оз. Бол. Островное 22 марта 2012 г. концентрация составила 15,06 мг/м<sup>3</sup>. В этом случае можно предположить, что при малой глубине оз. Бол. Островное его фотический слой (глубина проникновения света) простирается до дна. В этих условиях при слабом перемешивании водных масс органическое вещество, синтезируемое водорослями, накапливается в донных отложениях и в придонных слоях. Содержание хлорофилла в придонном слое озер Лапа (30 июля 2012 г.), Красиловское (13 августа 2012 г.), Бол. Островное (17 августа 2012 г.) составило соответственно 25,26; 212,67; 63,09 мг/м<sup>3</sup> и представлено на рисунке 6.

В ходе исследований необходимо было определить микрофизические параметры гидрозолей, в связи с тем, что ослабление света в сравнительно чистых

озерных экосистемах обусловлено, в основном, поглощением и рассеянием на взвешенных частицах биологического происхождения.

Распределение клеток водорослей фитопланктона по радиусу для оз. Лапа в различные сезоны представлено на рисунке 7. Аппроксимация экспериментальных точек проводилась в соответствии с формулой Юнге.

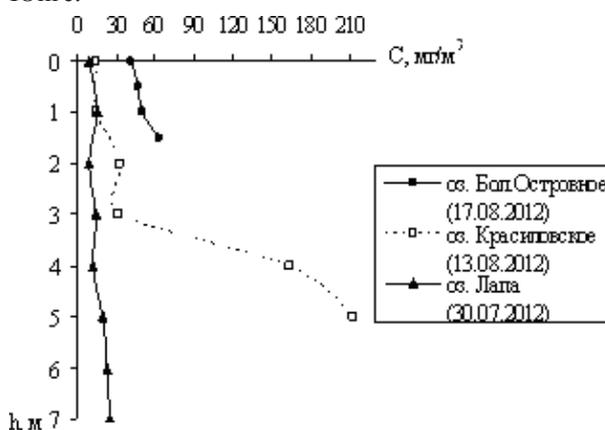


Рис. 6. Вертикальное распределение содержания хлорофилла «а» в разнотипных озерах в летний период 2012 г.

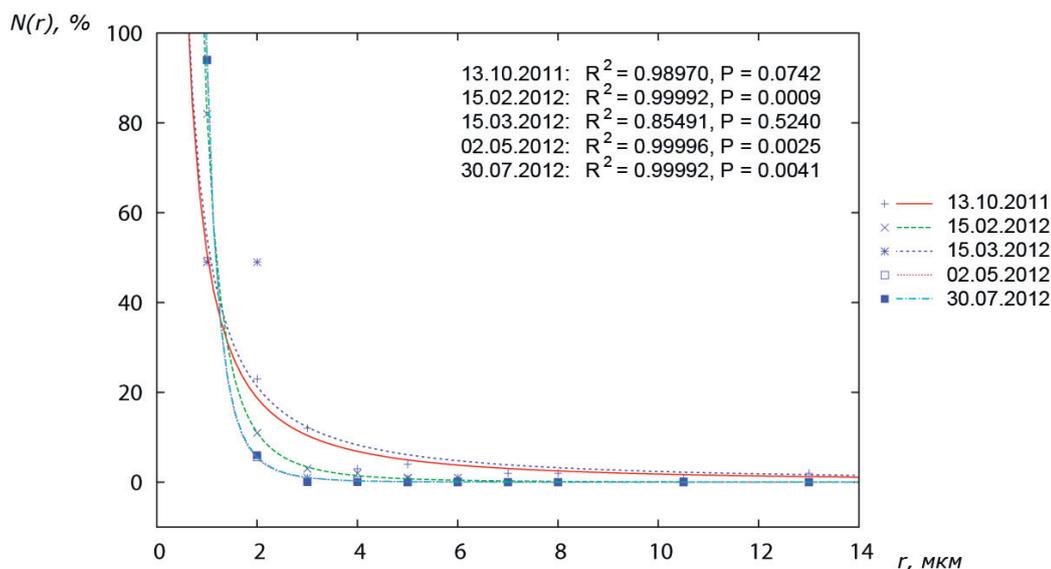


Рис. 7. Распределение клеток водорослей фитопланктона по радиусу для оз. Лапа в разные сезоны в 2011–2012 гг.

На основании проведенных экспериментальных исследований спектральной прозрачности воды в диапазоне 400–800 нм в различные сезоны 2011–2012 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 воды. На наш взгляд, это обусловлено преимущественно рассеянием и поглощением света на органических и минеральных частицах микровзвеси.

По данным сезонных измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла «а» на разных глубинах озер обнаружена обратная зависимость величины прозрачности на исследуемых длинах волн от концентрации основного фотосинте-

тического пигмента. Прозрачность водоемов несколько уменьшается в придонном слое вследствие оседания отмерших клеток водорослей фитопланктона и взмучивания донных отложений.

Исследования сезонной динамики гидрооптических характеристик показали, 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 фитопланктона, более высокой концентрацией и большими размерами частиц (клеток) водорослей.

*Авторы благодарят н.с., к.б.н. А. В. Котовицкову за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла; с.н.с., к.б.н. Е. Ю. Митрофанову и аспиранта О. С. Сутченкову за предоставленные фотографии водорослей фитопланктона, а также аспиранта Е. Н. Чикалина за помощь при обработке данных.*

### Библиографический список

1. Атлас Алтайского края. — М.; Новосибирск, 1991.
2. Захаров С. Г. К вопросу о классификации озер и озеровидных водоемов // Известия Русского географического общества. — 2002. — Т. 134, вып. 3.
3. Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. — Л., 1983.
4. Апонасенко А. Д., Щур Л. А., Лопатин В. Н. Связь содержания хлорофилла с биомассой и дисперсной структурой фитопланктона // ДАН. — 2007. — Т. 412, № 5.
5. Мусатов А. П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. — М., 2001.
6. Бульон В. В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. — СПб., 1994.
7. Бульон В. В. Связь между концентрацией планктона и прозрачностью воды в озерах и водохранилищах // Морфология, систематика и эволюция животных: сб. науч. работ. — Л., 1978.
8. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. — 1977. — Vol. 22, № 2.
9. Alm G. Limnologisch-fischereiliche Untersuchungen in dem Kälarne-Seen // Inst. Freshwater Res. Rep., Lund. — 1960. — № 41.

10. Apstein C. Das Süßwasserplankton Methode und Resultate den quantitativen Untersuchungen. — Kiel und Leipzig, 1896.
11. Vollenweider R. A., Kerekes J. The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication // *Progr. Water Technol.* — 1980. — Vol. 12, №2.
12. Joel Harrison. Effects of nutrients, photoinhibition and photoacclimation on photosystem II function of freshwater phytoplankton communities. — Waterloo; Ontario; Canada, 2011.
13. Joel W. Harrison., Ralph E. H. Smith The spectral sensitivity of phytoplankton communities to ultraviolet radiation-induced photoinhibition differs among clear and humic temperate lakes // *Limnology and Oceanography.* — 2011. — №56 (6).
14. Lee Z. P., Carder K. L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance // *Remote Sensing of Environment.* — 2004. — №89.
15. Бульон В. В. Первичная продукция планктона и классификация озер // *Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем.* — Л., 1987.
16. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск, 2007.
17. Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко Я. А., Павловский С. А. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. — Петрозаводск, 2008.
18. Техническое описание и инструкция по эксплуатации Ю-34.11.629 ТО. — 1988.
19. ГОСТ 17.1.4.02–90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». — М., 2003.
20. Шифрин К. С., Салганик И. Н. Таблицы по светорассеянию. Рассеяние света моделями морской воды. — Л., 1973. — Т. 5.