

## Упрощенная модель пространственного распределения содержания хлорофиллов и каротиноидов в Телецком озере

В.Е. Павлов<sup>1</sup>, Т.В. Кириллова<sup>1</sup>, О.В. Кованова<sup>2</sup>, В.В. Кириллов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН

656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

<sup>2</sup>Алтайский государственный университет

656015, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

Поступила в редакцию 7.02.2011 г.

Выполнен статистический анализ данных по содержанию хлорофиллов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и каротиноидов  $k$  в ряде пунктов Телецкого озера на разных глубинах в мониторинговом режиме. Отмечен нормальный логарифмический характер функций распределения их концентраций по числу проб, что предопределяет использование в моделях среднегеометрических значений концентраций. Для поверхностного слоя воды констатированы устойчивое убывание содержания пигментов в пробах в порядке  $k-a-c-b$  во всех пунктах забора проб, а также практическое отсутствие регулярного роста концентраций в направлении стока воды «юг–север». Вертикальное убывание пигментов от поверхности до глубины 50 м носит экспоненциальный характер, в более глубоких слоях их уменьшение незначительно. Выведены аппроксимационные формулы, связывающие логарифмы концентраций хлорофиллов разных типов и каротиноидов в зависимости от глубины, удобные для последующих вычислений коэффициентов поглощения света фитопланктоном.

*Ключевые слова:* Телецкое озеро, фитопланктон, пигменты, мониторинг, концентрации хлорофиллов и каротиноидов, статистическое моделирование; Lake Teletskoye, phytoplankton, pigments, monitoring, concentration of chlorophylls and carotenoids, statistical modeling.

### Введение

В последние десятилетия большое внимание уделяется одному из важных аспектов водной экологии — изучению динамики развития фитопланктона как фактора, определяющего энергетический и вещественный базис процессов биологического продуцирования и формирования качества поверхностных вод. Практические исследования фитопланктона морей и океанов направлены в первую очередь на решение проблем рыболовства, тогда как при исследованиях внутренних водоемов приоритет принадлежит выявлению закономерностей процессов естественной и антропогенной эвтрофикации, требующему регулярных мониторинговых наблюдений [1, 2].

Изучение динамики пигментных характеристик фитопланктона и выявление связей между хлорофиллом  $a$  (маркером уровня развития фитопланктона) и абиотическими факторами водной среды позволяют получить информацию о состоянии автотрофного звена экосистемы. Подобный подход широко применяют при экологическом мониторинге водных

объектов [3], а также для верификации моделей пространственного распределения водорослей фитопланктона [4, 5].

Данные о пространственной неоднородности концентрации хлорофилла находят применение при решении некоторых фундаментальных и прикладных проблем гидродинамики, включая экологические. Эти задачи связаны с изучением динамики водных масс и диффузии примесей в стратифицированных озерах и водохранилищах, в частности для разработки математических моделей систем стратифицированных течений и транспорта примесей в этих течениях [6].

Таким образом, по-прежнему большое внимание уделяется изучению взвесей как растительного, так и минерального происхождения в водах океанов и внутренних водоемов; при этом разрабатываются новые методы исследования фитопланктона [7–12]. Начиная с 1989 г. Институт водных и экологических проблем СО РАН ведет мониторинг экосистемы Телецкого озера, включающий исследования пигментных характеристик фитопланктона. Телецкое озеро — это водоем тектонического происхождения с объемом пресной воды  $\sim 40 \text{ км}^3$ . Оно частично входит в Алтайский государственный заповедник и включено ЮНЕСКО в Список природных объектов мирового наследия. Водоем уникален по своему генезису, ряду морфологических, гидрологических, физических,

\* Владимир Евгеньевич Павлов (pavlov@iwer.asu.ru); Татьяна Владимировна Кириллова (tkirillova@iwer.asu.ru); Ольга Вадимовна Кованова (k.olya@bk.ru); Владимир Викторович Кириллов (vkiirilov@iwer.asu.ru).

химических и биологических характеристик [13–15]. Его экосистема находится в ненарушенном (фоновом) состоянии из-за малой численности населения, сосредоточенного в основном на северном берегу. Но в последние годы антропогенная нагрузка на озеро растет: массовое и недостаточно контролируемое развитие водного туризма влечет за собой загрязнение озера и его берегов.

В настоящей статье представлена основанная на натуральных данных упрощенная эмпирико-статистическая модель пространственного распределения содержания в воде хлорофиллов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и каротиноидов  $k$  в Телецком озере. Цель работы – обобщение материалов натуральных исследований (в форме, удобной для расчетов параметров радиационного режима в водных слоях), а в дальнейшем – поступления солнечного излучения на разные глубины.

### Материалы и методы исследований

Отбор взвешенного в воде вещества для определения содержания хлорофиллов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и каротиноидов  $k$  в фитопланктоне осуществлялся на мембранные фильтры с диаметром пор 0,85–1,05 мкм по всей акватории озера (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема Телецкого озера с пунктами отбора проб (штриховая линия условно делит озеро на северную и южную части)

Экстракция пигментов из водорослей производилась ацетоном в темноте при температуре 4 °С на протяжении 18 ч. После центрифугирования экстрактов для их очистки от взвесей осуществлялся анализ раствора на спектрофотометре СФ-46 [16, 17]. Для определения концентраций (мкг/л)  $X_a^j$ ,  $X_b^j$ ,  $X_c^j$  и  $X_k^j$  (в дальнейшем верхний индекс маркирует место отбора пробы) использовались формулы S.W. Jeffrey, G.F. Humphrey [18] и J.D.H. Strickland, T.R. Parsons [19]. В итоге осуществлено свыше 540 определений каждой из величин  $X_a^j$ ,  $X_c^j$  и  $X_k^j$  и 340

определений  $X_b^j$  в поверхностном (0–0,5 м) слое воды. Для более глубоких слоев (10, 50, 100 м и более) было обработано соответственно 150, 83 и 300 проб.

### Горизонтальное распределение фотосинтетических пигментов в поверхностном слое воды

Предварительный анализ результатов измерений  $X_a^j$ ,  $X_b^j$ ,  $X_c^j$  и  $X_k^j$  показал, что эти величины в существенной степени варьируют от пробы к пробе. В районе впадения в озеро р. Чулышман значения  $X_a^{Chul}$  концентраций хлорофилла  $a$  в пробах воды в летне-осенние месяцы изменяются более чем в 50 раз. Такая значительная амплитуда вариаций  $X_a^j$ , характерная для всех пунктов отбора проб, определяет необходимость использования в последующих статистических модельных построениях не абсолютных значений концентраций, а их логарифмов, что дополнительно подтверждается анализом гистограмм распределений  $X_a^{Chul}$  по числу проб. Так, из гистограммы на рис. 2,  $a$  следует, что распределение не относится к классу нормальных.

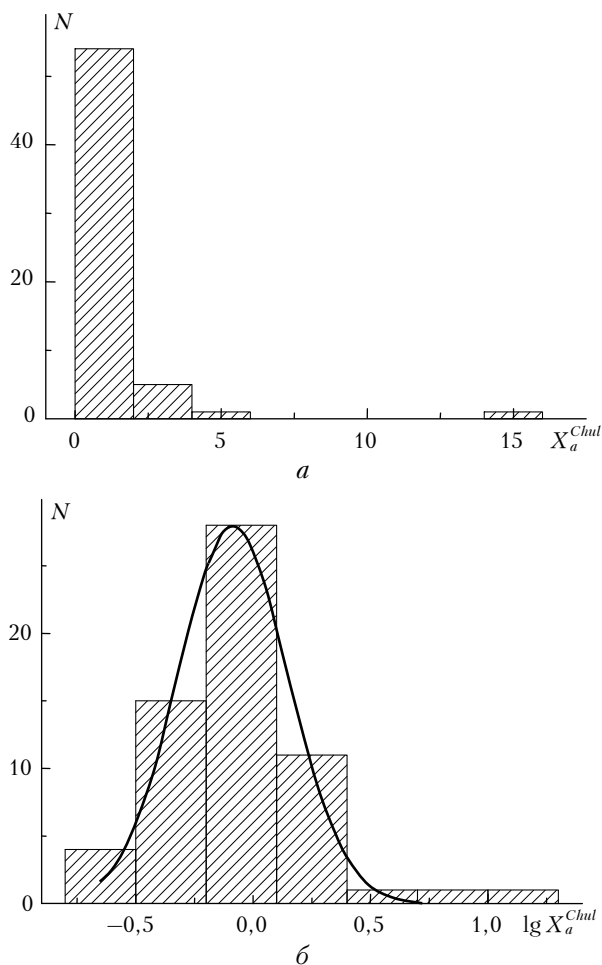


Рис. 2. Гистограммы распределения концентраций ( $a$ ) хлорофилла  $a$  и их логарифмов ( $b$ ) в поверхностном слое воды в районе устья р. Чулышман

Его принадлежность к классу логарифмически нормальных подтверждается видом гистограммы распределения логарифмов концентраций  $\lg(X_i^j)$  по числу проб в районе устья р. Чулышман (рис. 2, б), которая, так же, как и в других пунктах исследования озера, близка к симметричной (аппроксимация гауссовым распределением изображена сплошной кривой). Поэтому в дальнейшем при расчетах средних характеристик содержания пигментов в воде использовались средние значения логарифмов концентраций  $\lg(X_i^j)$ . То же самое относится и к расчетам стандартных отклонений [20].

Использование  $\lg(X_i^j)$  обусловлено еще и тем, что согласно результатам наблюдений концентрации хлорофилла  $b$  (минимальные значения) и каротиноидов  $k$  (максимальные) в пробах обычно отличаются на порядок и более. Поэтому в сравнительном анализе одновременно всех пигментов и при выводе обобщающей характеристики содержания фитопланктона на разных глубинах (или на одной глубине, но в разных пунктах отбора проб) применение логарифмической шкалы выравнивает существенную разницу во вкладе отдельных компонент в расчеты такой характеристики.

Для анализа горизонтального распределения фотосинтетических пигментов в поверхностном слое воды озера были вычислены средние значения логарифмов концентраций  $\lg(X_i^j)$  в отдельных пунктах в течение всех летне-осенних сезонов, а затем проведено сравнение их с аналогичными данными для

пункта отбора проб вблизи пос. Артыбаш  $\overline{\lg(X_i^A)}$ , где из озера вытекает р. Бия. Итоги такого сопоставления для пунктов Кыга, Кокши, Корбу и Чулышман со среднеквадратическими отклонениями представлены на рис. 3 (1–4). Для других исследованных участков озера получены похожие результаты.

Из рис. 3 следует, что связь между средними значениями логарифмов концентраций хлорофиллов и каротиноидов в разных пунктах носит линейный характер. Представим эту связь в виде соотношения

$$\overline{\lg(X_i^j)} = C + D \cdot \overline{\lg(X_i^A)} \quad (1)$$

и вычислим соответствующие значения коэффициентов  $C$  и  $D$ . Для 8 вариантов они приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты  $C$  и  $D$  со среднеквадратическими отклонениями  $\Delta C$  и  $\Delta D$  в поверхностном слое воды

Пункты	$C$	$\Delta C$	$D$	$\Delta D$
Артыбаш—Чулышман	-0,04	0,02	0,79	0,06
Артыбаш—Кыга	-0,16	0,01	0,88	0,03
Артыбаш—Челюш	-0,15	0,05	1,13	0,13
Артыбаш—Кокши	-0,07	0,03	0,85	0,07
Артыбаш—Корбу	-0,13	0,03	1,12	0,08
Артыбаш—Камга	0,01	0,02	0,95	0,05
Артыбаш—Яйлю	-0,11	0,04	1,14	0,11
Артыбаш—Самыш	0,06	0,03	0,94	0,09
Средние	-0,08	0,03	0,98	0,08

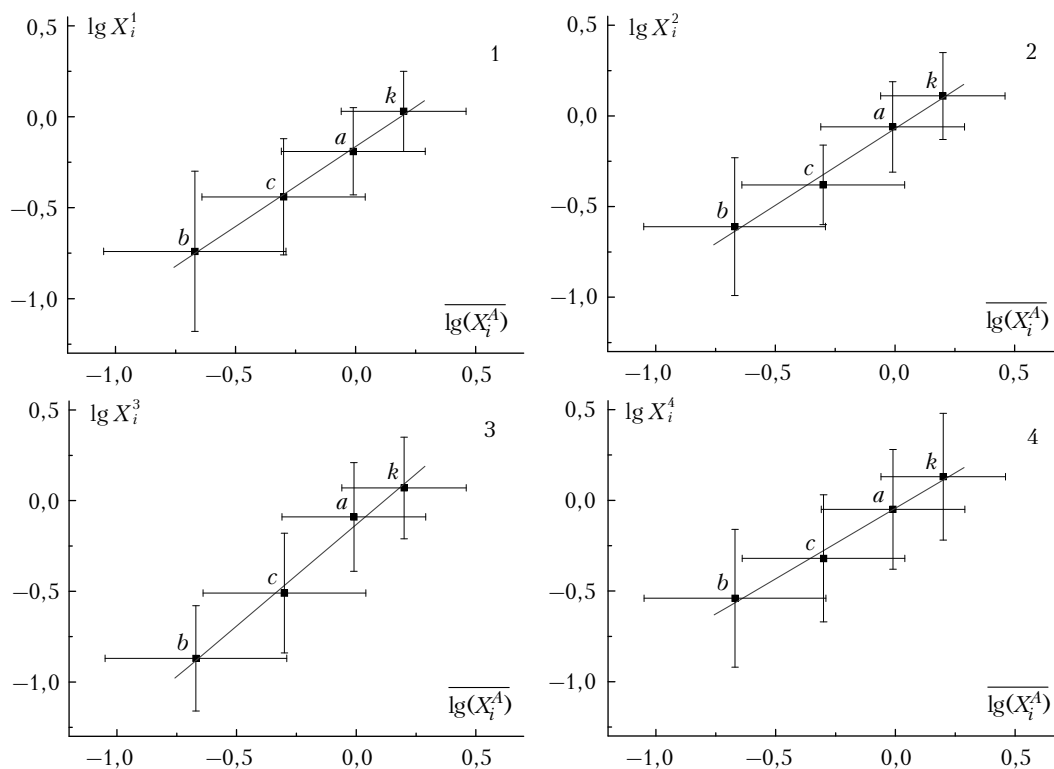


Рис. 3. Сопоставление средних значений логарифмов концентраций хлорофиллов ( $a, b, c$ ) и каротиноидов ( $k$ ) в пробах поверхностного слоя воды в районах устьев рек Кыга  $\lg(X_i^1)$ , Кокши  $\lg(X_i^2)$ , Корбу  $\lg(X_i^3)$  и Чулышман  $\lg(X_i^4)$  с данными в Артыбаше  $\overline{\lg(X_i^A)}$

Из нее следует, что коэффициент  $C$  мало отличается от нуля, т.е. прямые, описываемые формулой (1), пересекают ось ординат вблизи начала координат. Коэффициент  $D$  меняется от 0,79 до 1,14 и в среднем равен 0,98, т.е. близок к единице. Отсюда следует, что углы наклона прямых к оси абсцисс варьируют в пределах от 38,3 до 48,7°, составляя в среднем  $(44 \pm 4)^\circ$ . Близость углов к 45° свидетельствует о том, что связь между среднегеометрическими концентрациями хлорофиллов и каротиноидов в разных пунктах, как и между их логарифмами, близка к линейной.

К такому же результату приводит сопоставление средних логарифмов концентраций при условном делении озера на две части: северную и южную. Коэффициенты  $C$  и  $D$  для соотношения (1), рассчитанные по числу проб в северной части озера – 253, и в южной – 169, приведены в табл. 2, из которой следует, что их значения в поверхностном слое толщиной 30 см (глубина  $H = 0,15$  м) мало отличаются от соответствующих значений на глубине 10 м.

Таблица 2

**Коэффициенты  $C$  и  $D$  в формуле (1) при сопоставлении данных для северной и южной частей озера на двух глубинах  $H$**

$H$ , м	$C$	$\Delta C$	$D$	$\Delta D$
0,15	0,06	0,02	1,15	0,05
10	-0,04	0,04	1,13	0,07

Все приведенные выше материалы свидетельствуют, что в абсолютном большинстве случаев различия между средними логарифмами концентраций в двух любых пространственно разнесенных пунктах в поверхностном слое воды не превышают среднеквадратических отклонений, последние обусловлены в основном природными вариациями концентраций фитопланктона и лишь в незначительной мере погрешностями измерений. Аналогичный эффект наблюдается и на глубине 10 м.

По-видимому, проточность воды, многочисленные холодные притоки и донные ключи препятствуют увеличению обилия фитопланктона в направлении «юг–север» в течение времени перемещения водных масс от устья Чулышмана до истока р. Бия у Артыбаша. Поэтому в последующих расчетах спектральных потоков солнечного излучения в верхних слоях воды будут использоваться среднегеометрические значения  $\overline{X_i^j}$  для всего озера. Итоговые сведения о них, средние значения логарифмов концентраций,

Таблица 3

**Средние логарифмы концентраций, среднеквадратические отклонения и среднегеометрические концентрации в поверхностном слое воды**

Пигмент	Параметр		
	$\lg(\overline{X_i^{03}})$	$\Delta \lg(\overline{X_i^{03}})$	$\overline{X_i^{03}}$
Хлорофилл $a$	-0,006	0,31	0,986
Хлорофилл $b$	-0,678	0,45	0,210
Хлорофилл $c$	-0,371	0,36	0,426
Каротиноиды $k$	0,151	0,30	1,416

среднеквадратические отклонения и непосредственно концентрации  $\overline{X_i^{03}}$ , относящиеся к поверхностному слою всего озера в летние сезоны 1993–2009 гг., представлены в табл. 3.

## Вертикальное распределение концентраций пигментов

Перейдем к вопросу о зависимости концентраций фотосинтетических пигментов в озере от глубины. Сначала был рассмотрен вид функции распределения концентраций по числу проб на глубинах 10, 50 и 100–300 м для всего озера в целом. Результаты оказались мало отличающимися от данных для поверхностного слоя: вид функции распределения логарифмов концентраций по числу проб  $\lg(\overline{X_i^{03}})$  близок к гауссовой. Отсюда возникло представление о возможности построения обобщенных по широтам и долготам зависимостей среднегеометрических концентраций каждого из пигментов от глубины. Соответствующий результат для интервала  $15 \text{ см} \leq H \leq 50 \text{ м}$  представлен на рис. 4.

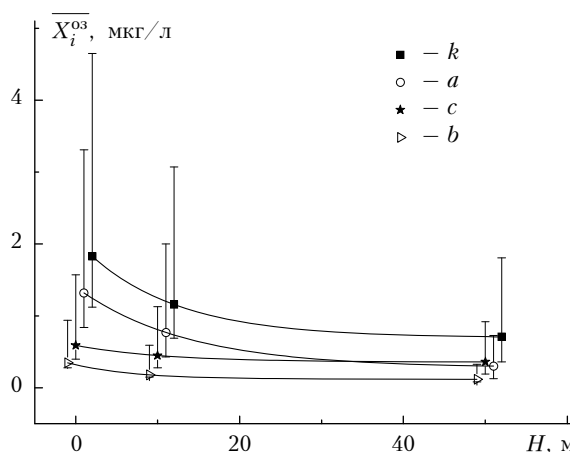


Рис. 4. Зависимость среднегеометрических концентраций пигментов  $\overline{X_i^{03}}$  от глубины  $H$ . Концентрации всех пигментов в левой части рисунка соответствуют глубине 15 см, в средней – 10 м и в правой – 50 м

Для наглядного представления о величинах среднеквадратических отклонений символы соответствующих концентраций смещены вправо и влево от истинных глубин 15 см, 10 и 50 м.

Простейшая аппроксимация изображенных на рис. 4 кривых представлена уравнением

$$\overline{X_i^{03}}(H) = R + S e^{-H/T}, \quad (2)$$

где  $H$  – глубина, а  $T$  – нормирующий множитель. При  $H = 0$  сумма величин  $(R + S)$  представляет собой концентрацию пигментов (мкг/л), экстраполированную к поверхности воды. Численные значения всех параметров приведены в табл. 4.

Из рис. 4 следует, что с увеличением глубины  $H$  вид функций распределения концентраций по типам пигментов будет несколько изменяться. При  $H \geq 30$  м концентрации хлорофиллов  $a$  и  $c$  выравниваются.

Таблица 4

Параметры  $R$ ,  $S$  и  $T$  в формуле (2)

Пигмент	Параметр		
	$R$ , мкг/л	$S$ , мкг/л	$T$ , м
Хлорофилл $a$	0,277	1,06	13,1
Хлорофилл $b$	0,120	0,237	7,31
Хлорофилл $c$	0,358	0,236	10,6
Каротиноиды $k$	0,698	1,15	10,9

Для расчетов световых потоков эти сведения не имеют принципиального значения, поскольку солнечная радиация практически не проникает на такие глубины.

Несомненный интерес вызывает наглядное представление о суммарном количестве хлорофиллов и каротиноидов во всем озере в целом. Для такой оценки воспользуемся сведениями о площади озера и его средней глубине [8], а также данными табл. 3 и 4. Интегрирование концентраций по всему объему озера ( $40 \text{ км}^3$ ) приводит к суммарному содержанию пигментов не более 60 т, что составляет всего  $1,5 \cdot 10^{-7} \%$  от общего объема воды.

### Дальнейшие перспективы

Представленные выше результаты моделирования распространенности поглощающей и рассеивающей свет растительной взвеси в воде Телецкого озера следует рассматривать как первоначальный этап исследований, направленных на подробное изучение светового и теплового режимов на разных глубинах. Последующая работа будет связана с расчетами интенсивности проникающего в воду и отраженного от водной поверхности солнечного света, которые будут выполнены на основе решения уравнения переноса излучения. Для этого необходимо сформировать банк данных по оптическим толщам, альбедо и индикаторам рассеяния света частицами озерной взвеси как органического, так и терригенного происхождения. Данные по яркости рассеянного света внутри водоема позволят осуществить строгую количественную интерпретацию наблюдений видимости диска Секи в различных точках озера в разные сезоны. Они также будут использованы в анализе результатов измерений интенсивности уходящего коротковолнового излучения, выполняемых с помощью ИСЗ с целью контроля распределения фитопланктона в поверхностных слоях воды.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного проекта СО РАН № 95 «Комплексные исследования механизмов стратификации биологических, химических и физических компонент водных экосистем как основа для прогноза и управления качеством воды».

1. *Кириллова Т.В.* Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: Красноярск. федеральный ун-т, 2006. 24 с.
2. *Kondratyev K.* Water quality remote sensing in the visible spectrum // *Int. J. of Remote Sens.* 1998. V. 19, N 5. P. 957–979.

3. *Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Ловцкая О.В., Кириллова Т.В.* Компьютерное моделирование полей концентрации хлорофилла для лимнологических объектов на основе спутниковых MERIS-данных (на примере Новосибирского водохранилища) // Проблемы мониторинга окружающей среды (EM-2009): Матер. Всерос. конф. В сб. «Кузбасс-2». Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). М.: Горная книга, 2009. № ОВ17. С. 175–179.
4. *Kovalevskaya N., Kirillov V., Kirillova T., Lovtskaya O.* Meris/Envisat-Images for modeling of Chlorophyll Concentration Fields for Novosibirsk Reservoir (South West Siberia) // *Proc. of the ESA Living Planet Symposium.* 2010. Bergen, Norway. ESA Special Publication SP686; URL: [http://www.congrex.nl/10a04/sessions/CXNL\\_10a04\\_865200.htm](http://www.congrex.nl/10a04/sessions/CXNL_10a04_865200.htm)
5. *Samolyubov B.I., Kirillova T.V.* The System of Currents above a Complex Bottom Relief and Its Influence on the Transfer of Admixtures // *Moscow University Phys. Bull.* 2010. V. 65, N 2. P. 63–67.
6. *Коханенко Г.П., Иванов В.Г., Шерстянkin П.П.* Взаимосвязь обратного рассеяния и ослабления света в верхних слоях воды озера Байкал // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 7. С. 793–802.
7. *Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А.* Изменчивость распределения прозрачности в верхнем слое пелагиали Черного моря // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 4. С. 339–344.
8. *Демин В.В., Ольшук В.А., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г.* Цифровая голография планктона // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1089–1095.
9. *Шерстянkin П.П., Коханенко Г.П., Иванов В.Г., Куимова Л.Н.* Оптико-термические фронты подо льдом оз. Байкал и их связь с обновлением придонных вод // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 3. С. 215–221.
10. *Таращанский Б.А., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р., Рябов Е.В., Ягунов А.С.* Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15 // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 793–802.
11. *Копрова Л.И., Коновалов Б.В., Пелевин В.В., Хлебников Д.В.* Изменчивость комплекса оптических и гидрологических параметров поверхностных вод Атлантического океана // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2010. Т. 46, № 2. С. 212–227.
12. *Кириллова Т.В.* Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера в межгодовом аспекте // *Изучение и охрана природы Алтае-Саянской горной страны: Материалы научн. конф. Горно-Алтайск, 2002.* С. 60–61.
13. *Селегей В.В., Селегей Т.С.* Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 144 с.
14. *Кириллов В.В., Митрофанова Е.Ю., Ким Г.В., Кириллова Т.В.* Палеоэкологические сигналы альгоценозов экосистем озер и их водосборных бассейнов // *Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири.* Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 1998. С. 222–233.
15. *ГОСТ 17.04. 02-90.* 2003.
16. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений /* Под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеониздат, 1992. С. 164–173.

17. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*1 and *c*2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanzen. 1975. V. 167, N 2. P. 191–194.
18. Strickland J.D.H., Parsons T.R. A practical Handbook of Seawater Analysis. 2<sup>nd</sup> ed. // Fisheries Research Board of Canada. Ottawa, 1972. 310 p.
19. ГОСТ 11.009-79. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров логарифмически нормального распределения. М.: Изд-во стандартов, 1980. 28 с.
20. Павлов В.Е., Суторихин И.А., Хвостов И.В., Зинченко Г.С. Снежный покров как индикатор загрязнения урбанизированной территории Алтайского края // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 96–100.

*V.E. Pavlov, T.V. Kirillova, O.V. Kovanova, V.V. Kirillov. The simplified model of spatial distribution of chlorophylls and carotenoids in Lake Teletskoye.*

The statistical analysis of data on chlorophylls *a*, *b*, *c* and carotenoids *k* content in different water layers was carried out in monitoring conditions in a number of points of Lake Teletskoye. The distribution of concentrations within the number of samples has the lognormal character that makes it possible to use the geometrical mean concentrations in models. The surface layer showed the stable decrease of pigments content in *k–a–c–b* order in all sampling points and the lack of concentration increase in the «south–north» direction. Vertical decrease of pigments from surface to 50 m layer is exponential, and their decrease in deeper layers is insignificant. The approximation formulas of the depth dependence of chlorophylls and carotenoids concentration were derived. These formulas are easy-to-use for further calculation of coefficients of light absorption by phytoplankton.