«Оптика атмосферы и океана», **18,** № 1–2 (2005)

УДК 551.481.1. (571.5)

Е.С. Троицкая, М.Н. Шимараев

Условная прозрачность и температура воды в Южном Байкале

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 4.10.2004 г.

По материалам многолетних экспедиционных наблюдений анализируются соотношения между условной прозрачностью и температурой верхнего слоя воды в Южном Байкале. Рассмотрены особенности связей прозрачности и температуры в зависимости от отдельных факторов для разных гидрологических периодов. Летом и осенью отрицательная корреляция между параметрами вызвана влиянием температуры на развитие фитопланктона. Положительная корреляция весной и ранней зимой является следствием влияния температуры на интенсивность вертикального перемешивания при температурной конвекции. Полученные связи использованы для выявления многолетнего тренда условной прозрачности в период потепления 1940–2000 гг. Вывод о возрастании прозрачности в весенние и понижении в летне-осенние месяцы подтвержден ее стационарными измерениями в 1950–1987 гг.

Введение

Условная прозрачность воды $Z_б$ – глубина предельной видимости стандартного белого диска (диск Секки) – один из информативных показателей оптических и биологических свойств верхних слоев водоемов. В морях и пелагиали глубоких и больших озер она зависит в основном от концентрации органической взвеси, определяемой содержанием фитопланктона. Для оз. Байкал характерен большой сезонный размах изменений $Z_б$ с максимумом до 40 м весной и поздней осенью при активном вертикальном перемешивании вод и минимумом 5–8 м зимой и в летне-осенние месяцы [1], когда развивается фитопланктон, а стратификация затрудняет обмен верхних и чистых глубинных вод.

Температура воды T не оказывает прямого воздействия на условную прозрачность, но может непосредственно влиять на содержание взвеси в верхних слоях озера. Это связано с ролью температуры как положительного фактора развития фитопланктона, а также с влиянием ее на условия вертикального обмена и распределение взвеси с глубиной [2]. Целью работы является анализ соотношений между $Z_б$ и T в гидрологические периоды, отличающиеся по условиям стратификации и вертикального обмена [3, 4].

Материалы и методика

За основу приняты наблюдения 1970–1979 гг. на глубоководном разрезе пос. Лиственичное – пос. Танхой в Южном Байкале в 3 и 7 км от западного (станции 1 и 2) и восточного берегов (ст. 5 и 4) и в центре разреза (ст. 3). Для анализа использованы 452 одновременных измерения температуры поверхности воды и прозрачности (от 86 до 94 на каждой станции).

Осредненные за период наблюдений значения параметров менялись на разрезе незначительно. Температура весной понижалась (на 0,4 °С), а летом повышалась (на 2 °С) к восточному берегу, осенью холоднее (на 0,6–0,9 °С) был центр озера. Прозрачность во все периоды уменьшалась (на 0,9–5,5 м) к восточному берегу. Эти особенности распределения объясняются гидрологическими условиями данного района, а также сосредоточением вдоль восточного побережья населенных пунктов, основных притоков и мелководий, являющихся дополнительным источником тепла (летом и осенью) и взвеси.

Связи между $Z_б$ и T анализировались для периодов: весенней конвекции в мае – июне от разрушения льда до перехода T поверхности воды через значение ее максимальной плотности 3,96 °С, для периодов летнего прогрева (июль – середина сентября) и осеннего охлаждения до перехода T через 3,96 °С (сентябрь – ноябрь) с устойчивой стратификацией верхних слоев в озере. Предварительно, для уменьшения влияния неоднородностей в распределении T и фитопланктона [5] и случайных ошибок измерений, исходные данные усреднялись по отдельным диапазонам температуры: от 0,5° для мая – июня до 1 °С для июля – августа и сентября – ноября.

Для всех станций получены аналитические уравнения связи $Z_б$ и T в отдельные периоды в виде степенной и линейной зависимостей (табл. 1). Коэффициенты корреляции связей оказались высокими и значимыми для всех выделенных периодов. Графики изменения $Z_б$ в зависимости от T в разные гидрологические периоды показаны на примере станций 1–3 (рис. 1).

Таблица 1

Характеристики связи $Z_б$ и T для разреза пос. Лиственичное – пос. Танхой в Южном Байкале

Номер станции	Май–июнь		Июль–август		Сентябрь–ноябрь	
	Линейный (1) или степенной (2) вид уравнения					
	1	2	1	2	1	2
1	$7T + 0{,}7$ $\sigma = \pm 4{,}7$ $r = 0{,}85$	$6T^2 - 7T + 43$ $\sigma = \pm 2{,}5$ $\rho = 0{,}96$	$-0{,}9T + 17$ $\sigma = \pm 3{,}4$ $r = -0{,}78$	$0{,}2T^2 - 5T + 33$ $\sigma = \pm 1{,}9$ $\rho = 0{,}94$	$-0{,}8T + 16$ $\sigma = \pm 2{,}5$ $r = -0{,}83$	$0{,}3T^2 - 5T + 33$ $\sigma = \pm 1{,}2$ $\rho = 0{,}97$
2	$3T + 10$ $\sigma = \pm 6{,}6$ $r = 0{,}71$	$5T^2 - 23T + 40$ $\sigma = \pm 3{,}8$ $\rho = 0{,}93$	$-0{,}8T + 16$ $\sigma = \pm 3{,}3$ $r = -0{,}81$	$0{,}2T^2 - 5T + 34$ $\sigma = \pm 2{,}3$ $\rho = 0{,}93$	$-0{,}9T + 17$ $\sigma = \pm 3{,}7$ $r = -0{,}75$	$0{,}2T^2 - 4T + 30$ $\sigma = \pm 3{,}2$ $\rho = 0{,}83$
3	$5T + 3$ $\sigma = \pm 5{,}2$ $r = 0{,}77$	$5T^2 - 24T + 40$ $\sigma = \pm 3{,}5$ $\rho = 0{,}92$	$-0{,}7T + 16$ $\sigma = \pm 4{,}3$ $r = -0{,}64$	$0{,}2T^2 - 5T + 36$ $\sigma = \pm 3{,}3$ $\rho = 0{,}85$	$-1T + 17$ $\sigma = \pm 2{,}1$ $r = -0{,}91$	$0{,}2T^2 - 4T + 29$ $\sigma = \pm 0{,}9$ $\rho = 0{,}99$
4	$3T + 10$ $\sigma = \pm 5{,}2$ $r = 0{,}42$	$7T^2 - 35T + 50$ $\sigma = \pm 2{,}6$ $\rho = 0{,}93$	$-0{,}7T + 17$ $\sigma = \pm 3{,}2$ $r = -0{,}77$	$0{,}2T^2 - 4T + 31$ $\sigma = \pm 1{,}5$ $\rho = 0{,}96$	$-0{,}8T + 15$ $\sigma = \pm 2{,}8$ $r = -0{,}74$	$0{,}3T^2 - 5T + 32$ $\sigma = \pm 1{,}1$ $\rho = 0{,}97$
5	$3T + 7$ $\sigma = \pm 3{,}3$ $r = 0{,}76$	$T^2 - 4T + 14$ $\sigma = \pm 2{,}9$ $\rho = 0{,}85$	$-0{,}6T + 15$ $\sigma = \pm 2{,}7$ $r = -0{,}76$	$0{,}1T^2 - 4T + 30$ $\sigma = \pm 2{,}2$ $\rho = 0{,}86$	$-0{,}3T + 10$ $\sigma = \pm 1{,}3$ $r = -0{,}65$	$0{,}0T^2 - T + 12$ $\sigma = \pm 1{,}3$ $\rho = 0{,}65$

Примечание. σ – ошибка расчета по уравнению; r – коэффициент корреляции линейной зависимости; ρ – корреляционное отношение степенной зависимости.

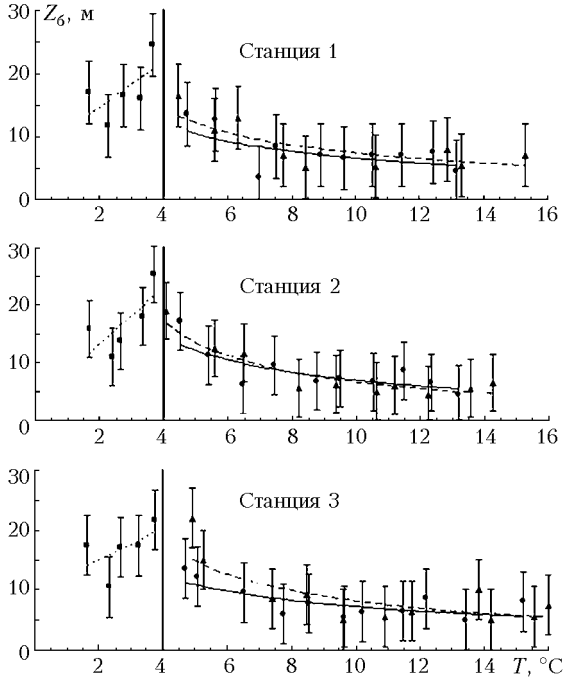

Рис. 1. Связь условной прозрачности и температуры поверхности воды на станциях 1–3 разреза пос. Лиственичный – пос. Танхой в отдельные гидрологические периоды (– весна, ▲ – лето, • – осень), линии тренда (пунктир – весна, штрих – лето, сплошная – осень) и 95%-я доверительная вероятность (вертикальные линии)

Анализ результатов

Весной, в соответствии с аномальным поведением плотности воды в зависимости от температуры, прогрев верхних слоев сопровождается повышением их плотности и развитием температурной конвекции. В отличие от многих озер, на Байкале из-за его больших глубин продолжительность периода превышает 1 мес. Конвекция, а также динамическое перемешивание ведут к последовательной трансформации профиля температуры с увеличением верхнего перемешанного слоя (H) до размеров, в несколько раз превышающих значения $Z_б$. Полученная по данным наблюдений зависимость H (м) от T имеет нелинейный характер и описывается выражением

$$H = 29{,}7T^2 - 84\,T + 107{,}3\ (r = 0{,}96).$$

Интенсивность вертикального перемешивания в этот период достигает сезонного максимума [6]. Она может быть охарактеризована коэффициентом вертикального обмена K_z и скоростью вертикальной диффузии U (табл. 2). Расчеты показывают, что их значения возрастают с повышением температуры, особенно в диапазоне T от 2,5 до 3,5–3,6 °C (температура мезотермического максимума на глубине 200–250 м).

Таблица 2

Глубина перемешанного слоя H и характеристики вертикального обмена в весенний период по наблюдениям в 1970–1978 гг.

T, °C	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
H, м	52	54	61	68	104	222	226
K_z, см^2/с	4	6	8	12	150	330	70
U, м/сут	0,7	1,0	1,1	1,5	12,5	13,0	2,7

Примечание. Расчет K_z выполнен по методике из [7], скорость диффузии определена по данным о K_z при предположении равенства масштабов перемешивания слою H.

Активное перемешивание создает условия для выноса взвеси в глубокие слои озера и снижения ее концентрации в слое $Z_б$, что подтверждается наблюдениями за распределением фитопланктона. Так, по данным рис. 1 из работы [8] в мае 1972 г. высокие и равномерные концентрации фитопланктона в Южном Байкале отмечались до глубины около 50 м. В июне слой с равномерной концентрацией

возрос до 200 м, при этом значения ее в верхних 50 м понизились по сравнению со значениями в мае в несколько раз. Таким образом, в период весенней конвекции повышение температуры сопровождается снижением концентрации органической взвеси в верхнем слое озера за счет ее перераспределения в более глубоких слоях воды. Поэтому по мере повышения температуры воды относительная прозрачность возрастает (в среднем на 4 м на 1 °С). Показательно, что по наблюдениям на разрезе максимальная прозрачность (35–39 м) достигается при $T \sim 3{,}5$–$3{,}6$ °С, при которой вертикальный обмен имеет наибольшую за период интенсивность, а размеры слоя H соответствуют максимальной глубине развития температурной конвекции [3]. После этого прозрачность сохраняется высокой до окончания периода.

Летом при $T > 3{,}96$ °С конвекция прекращается, формируется неглубокий (до 5–10 м) прогретый эпилимнион с залегающим под ним термоклином. Прозрачность в этот период связана с изменением содержания органической взвеси с преобладанием в ее составе фитопланктона, развитие которого прямо связано с температурой воды. Связь $Z_б$ и T обратная с понижением $Z_б$ на 0,6–0,9 м на 1 °С. Вместе с тем при $T > 10$–12 °С ее дальнейшее повышение не ведет к снижению прозрачности. Вероятными причинами являются усиление стратификации в термоклине и ослабление вертикального обмена и притока необходимых водорослям биогенных элементов из нижних слоев в трофогенный слой.

Осенью (сентябрь – ноябрь) температурная конвекция и ветровое перемешивание ведут к постепенному заглублению слоя скачка температуры (плотности), который сохраняется тем не менее до конца этого периода. В совокупности с понижением T это ведет к ухудшению условий развития фитопланктона, уменьшению содержания органической взвеси в слое $Z_б$ и увеличению прозрачности (~ на 0,8–1 м на 1 °С). Кривая зависимости $Z_б$ от T практически «симметрична» зависимости, полученной для летнего периода, мало различаются и ее аналитические выражения (см. табл. 1). Это указывает на ведущую роль в изменении содержания взвеси в период осени тех же факторов, что и летом.

Обсуждение

Таким образом, связь условной прозрачности с температурой воды в Байкале надежно прослеживается в гидрологические периоды весенней конвекции, летнего прогрева и осеннего охлаждения. Причиной связи являются два процесса: 1) прямое влияние температуры на содержание в верхних слоях озера взвеси органического происхождения летом и осенью; 2) ее влияние на вертикальное перемешивание, ведущее к перераспределению взвеси в слое воды, превышающем значения относительной прозрачности. В зависимости от соотношения этих факторов знак связи не одинаков в разные гидрологические периоды.

Весной ведущую роль в изменении прозрачности играет перемешивание, вызываемое аномальным увеличением плотности воды при росте T от 0 до 3,96 °С. Резкое усиление активности вертикального перемешивания по мере прогрева приводит к снижению концентрации взвеси в верхнем слое за счет выноса ее в более глубокие слои (не менее чем до 200–250 м в конце периода). Это определяет положительную связь T и $Z_б$.

Летом и осенью при устойчивой стратификации верхних слоев определяющим фактором является влияние роста температуры на увеличение содержания фитопланктона, поэтому связь между прозрачностью и температурой оказывается обратной. Однако при $T > 10$–12 °С связь практически исчезает, по-видимому, из-за лимитирования развития водорослей ослаблением притока биогенных элементов из нижних слоев через усиливающийся термоклин.

Рассмотрим возможность использования связей при анализе долговременных изменений в озерной экосистеме.

В отличие от температуры, измеряемой постоянно на метеостанциях в Южном Байкале не менее 40–60 лет, длительные (1950–1987 гг.) наблюдения за прозрачностью проведены только у пос. Большие Коты [9]. Очевидна возможность восстановления значений $Z_б$ по данным о T за длительный период. При восстановлении прозрачности за 1940–2000 гг. использованы наблюдения за T в пос. Лиственичное. Они приведены к условиям открытого озера по методике из [6] и осреднены затем 8-летним скользящим фильтром. Осреднение учитывает, что связь характеристик фитопланктона с температурой проявляется на интервалах времени не менее 5 лет [4]. Восстановленные по этим данным значения $Z_б$ дают представление о тенденции ее многолетних изменений, а не конкретных значениях в отдельные годы.

Результаты восстановления неожиданно выявили разные знаки тренда изменения условной прозрачности в 1940–2000 гг., оказавшегося положительным весной и отрицательным летом и осенью (рис. 2). Этот результат может быть объяснен усилившимся в этот период потеплением в районе Байкала, сопровождавшимся и повышением температуры верхних слоев воды в месяцы безледного периода [10]. Уменьшение $Z_б$ летом и осенью отражает увеличение содержания биологической взвеси в верхних слоях воды по мере роста их температуры. Увеличение же $Z_б$ весной при $T < 4$ °С связано с тем, что повышение T воды соответствовало фазам более активного вертикального перемешивания и уменьшения за счет этого количества взвеси в верхнем слое озера в месяцы этого периода. Сопоставление этих результатов с данными наблюдений в 1950–1987 гг. у пос. Большие Коты [9, рис. 1.54] показало, что расчетный метод воспроизводит реальные тенденции многолетних изменений условной прозрачности весной и летом, что можно рассматривать как подтверждение правильности принятой интерпретации связей температуры и прозрачности.

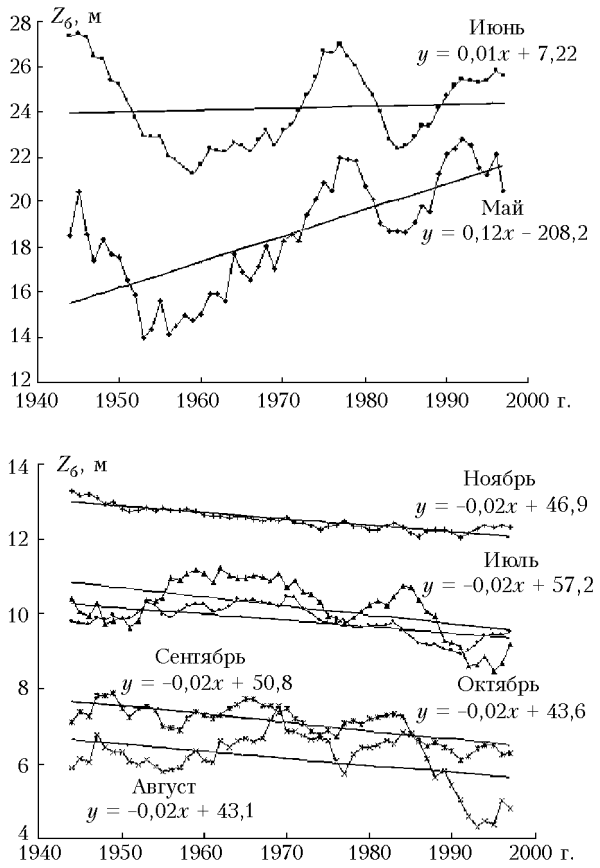

Рис. 2. Восстановленные значения условной прозрачности

Заключение

Результаты применения полученных зависимостей свидетельствуют о принципиальной возможности их использования для качественного анализа тенденций многолетних изменений в экосистеме Байкала под воздействием климата. Это относится и к биологическим характеристикам верхних слоев воды, достоверная связь которых с условной прозрачностью установлена как для морей [11, 12], так и для внутренних водоемов, в том числе и для оз. Байкал [13, 14].

Авторы признательны за замечания и дискуссию при обсуждении работы В.И. Маньковскому, акад. М.А. Грачеву, Н.А. Бондаренко, П.П. Шерстянкину, В.Н. Синюковичу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-05-65337 и 04-05-64839).

1. *Шерстянкин П.П.* Физические свойства вод // Байкал: Атлас. М.: СО РАН, Федер. Служба геодез. и картогр., 1993. С. 81.
2. *Степанова В.В., Шерстянкин П.П., Шимараев М.Н.* Связь полей температуры и показателя ослабления в водной толще Байкала // Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск: Наука, 1984. С. 78–84.
3. *Шимараев М.Н., Гранин Н.Г.* К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 2. С. 381–385.
4. *Шимараев М.Н.* Тепло- и массообмен в Байкале: Дис. в виде науч. докл. ... докт. геогр. наук. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 1996. 48 с.
5. *Гительзон И.И., Гранин Н.Г., Левин Л.А., Заворуев В.В.* Механизмы формирования и поддержания неоднородностей пространственного распределения фитопланктона озера Байкал // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 2. С. 505–508.
6. *Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н.* Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.; Л.: Наука, 1965. 373 с.
7. *Blanton Y.O.* Rates of vertical Entraiment in Stratified Lakes // A paper submitted for Presentation at the International Symposium on the Hydrology of Lakes. Helsinki, Finland. 1973. 6 p.
8. *Поповская Г.И.* Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения (1958–1990 гг.): Дис. в виде науч. докл. ... докт. биол. наук. Новосибирск, 1991. 52 с.
9. *Lake Baikal* Evolution and Biodiversity / Ed. by O.M. Kozhova and L.R. Izmest'eva. Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 447 p.
10. *Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В.* Климат и гидрологические процессы в Байкале в XX столетии // Метеорол. и гидрол. 2002. № 3. С. 71–78.
11. *Маньковский В.В.* Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. 100 с.
12. *Маньковский В.И.* Связь глубины видимости белого диска с биооптическими характеристиками вод Черного моря // Морской гидрофиз. ж. 1999. № 5. С. 78–80.
13. *Бульон В.В.* Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
14. *Шерстянкин П.П., Бондаренко Н.А., Степанова В.В., Тарасова Е.Н., Щур Л.А.* Взаимосвязь показателя ослабления света с гидрофизическими и биологическими показателями байкальских вод // Оптика океана и атмосферы: Тез. докл. Всесоюз. пленума «Оптика океана и атмосферы» (октябрь 1988 г., Ростов-на-Дону). Л., 1988. С. 223–224.

Ye.S. Troitskaya, M.N. Shimaraev. **Transparency by Secchi disk and water temperature in Southern Baikal.**

Based on long-term observations carried out from onboard scientific research vessels, relationships have been established between transparency by Secchi disk and temperature of upper water layer in Southern Baikal. Peculiarities of the relationships in different hydrological seasons and factors caused these peculiarities have been discussed. In summer and autumn, negative correlation between parameters is due to the influence of temperature on phytoplankton growth. The reason of positive correlation in spring and early winter is the effect of water temperature on the intensity of vertical mixing. The relationships established allow revealing long-term trend in transparency by Secchi disk during the warming period in 1940–2000. Data on transparency measurements of 1950–1987 confirm the conclusion that transparency increases in spring months and decreases in summer and autumn.