

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЕОГРАФИЯ И ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

3

ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1980 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ИЮЛЬ

2003

СЕНТЯБРЬ

М. Н. ШИМАРАЕВ, Е. С. ТРОИЦКАЯ, В. М. ДОМЫШЕВА

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА В ОТДЕЛЬНЫХ КОТЛОВИНАХ БАЙКАЛА

Вертикальный водообмен в озерах — один из основных физических факторов, определяющих стратификацию вод, их температурный и газовый режим и влияющих на интенсивность круговорота веществ и биологические процессы. Вертикальный обмен вызывается динамическим перемешиванием, температурной конвекцией, различиями в плотности озерных и речных вод. Изучение интенсивности вертикального водообмена представляет большой интерес, поскольку значительная часть водной массы Байкала расположена на глубинах, превышающих 250 м, т. е. предел развития свободной температурной конвекции [1]. Однако и в этой области глубин вертикальный обмен имеет место, о чем свидетельствуют сезонные изменения температуры воды [2] и высокий уровень содержания растворенного кислорода [3] по всей водной толще. Процессы обмена обеспечивают ежегодное поступление биогенных элементов из нижних слоев в верхний слой, трофогенный, где протекают процессы создания первичной продукции водоема.

Интенсивность вертикального водообмена чаще всего определяется косвенными методами, основанными на решении уравнения теплопроводности или уравнений переноса тепла и вещества, и позволяющими вычислить величину коэффициента вертикального обмена K_z . Для его определения нами использованы данные о температуре воды, концентрации растворенного кремния, а также скорости вертикального водообмена, установленной по распределению химических индикаторов возраста воды отдельных горизонтов. Цель работы — на основании имеющейся информации исследовать особенности вертикального обмена в отдельных котловинах Байкала.

Определение K_z по данным о температуре воды в слое 0–300 м на основе решения уравнения теплопроводности в форме конечных разностей [4] выявило значительную его изменчивость внутри года — от единиц летом и зимой (подо льдом) до 200–400 см²/с весной и поздней осенью [5]. Более строгим является метод «потока тепла», основанный на данных о сезонных изменениях температуры и запасов тепла во всей водной толще [6]. Первый опыт применения этого метода с использованием многолетних наблюдений за температурой воды в Южном Байкале [1] дал возможность установить характерные значения K_z на разных глубинах, подтвержденные позднее их определением методом Осборна–Кокса по прямым микроструктурным измерениям в глубинной зоне Южного Байкала [7].

В данной работе при расчетах K_z методом «потока тепла» использованы наблюдения за температурой воды в Байкале в 1972–1992 гг. при синхронных съемках озера, выполнявшиеся по известной схеме [1, 2]. Для уменьшения роли случайных пульсаций проведено пространственно-временное усреднение всех наблюдений за температурой в каждой из котловин. Стандартные ошибки осредненных значений температуры с учетом точности единичных измерений (0,02 °C) и их количества (свыше 100 на каждом горизонте в каждой котловине) близки к 0,001–0,002 °C. Расчет K_z проводился для июля–августа, августа–сентября, а также декабря–марта, когда основная роль в передаче тепла принадлежит турбулентной диффузии. Оценка погрешностей расчета показывает, что их значения повышенны в срединной части водной толщи (ниже 300–400 м) и убывают в 100–200 м от дна (рис. 1).

Общая для всех котловин особенность вертикального распределения K_z в месяцы с прямой стратификацией температуры (рис. 2) — уменьшение их значений в слое термоклина на глубине 5–25 м до 3 см²/с, возрастание в области со слабой стратификацией на глубине 100–300 м до 20 см²/с и последующее уменьшение до единиц размерности в придонных слоях. Высокие значения K_z в июле–августе в Северном Байкале на горизонте 100 м являются следствием сохраняющейся здесь в июле температурной конвекции. Значительные вариации коэффициента с глубиной в Среднем Байкале могут быть вызваны более высокими, чем принято, погрешностями при определении средних температур.

При обратной стратификации температуры с декабря до середины марта перемешивание определяется рядом факторов, включая диссиацию энергии предшествующих течений [8], конвекцию за счет осолонения при намерзании льда [9], а в конце периода — и температурную конвекцию. Установлено, что распределение величин K_z в верхнем деятельном слое отражает характер вертикального

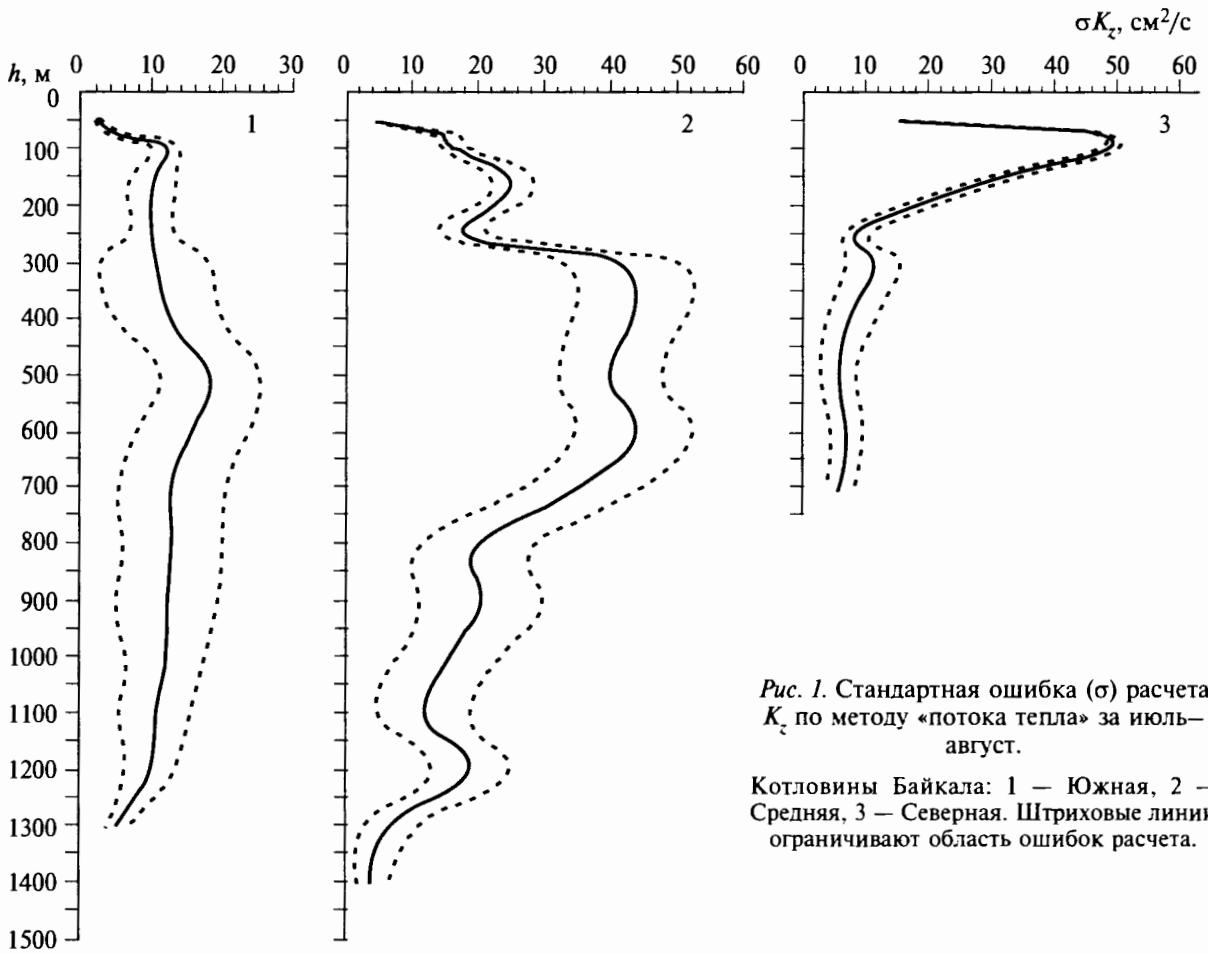


Рис. 1. Стандартная ошибка (σ) расчета K_z по методу «потока тепла» за июль–август.

Котловины Байкала: 1 — Южная, 2 — Средняя, 3 — Северная. Штриховые линии ограничивают область ошибок расчета.

распределения температуры воды и устойчивости вод в это время года [1, 2]. Обмен усилен в верхних и нижних слоях с ослабленной устойчивостью вод, в промежуточном слое с повышенными градиентами температуры и более устойчивой стратификацией значения K_z понижены.

Результаты расчетов позволяют проследить сезонное изменение K_z с июля по декабрь в нижних слоях водной толщи, где диффузионный поток тепла постоянно направлен сверху вниз. Интенсивность обмена слабо снижается от июля к сентябрю, а затем в 2–4 раза увеличивается к ноябрю–декабрю (рис. 3), что согласуется с наступлением максимума ветровой активности на Байкале в это время года [5]. Таким образом, сезонное возрастание передаваемой озеру кинетической энергии ветра оказывает воздействие на активность водообмена и в самых глубоких слоях Байкала.

Сравнение результатов расчета K_z в отдельных котловинах выявляет пониженную на всех глубинах (кроме горизонта 100 м в июле–августе) интенсивность вертикального обмена в Северной. На границе раздела верхней и глубинной зон (горизонт 250 м) средние за июль–октябрь значения K_z в Южной и Средней котловинах ($17\text{--}18 \text{ см}^2/\text{s}$) оказываются вдвое выше, чем в Северной ($8 \text{ см}^2/\text{s}$). Выявленные различия могут быть связаны с неодинаковой активностью ветра как основного источника поступления в воду кинетической энергии, пропорциональной скорости ветра в третьей степени. По многолетним данным средняя в июле–октябре скорость ветра над Южной, Средней и Северной котловинами составляет соответственно $3,9$, 4 и 3 м/с. Отношение нормированных (к Северной котловине) значений энергии представляется как $2,1 : 2,4 : 1$, что практически совпадает с подобным соотношением значений K_z на границе верхней и глубинной зон ($2,1 : 2,2 : 1$). Такое совпадение позволяет утверждать, что в рассматриваемый период года динамические процессы являются фактически основным фактором, вызывающим вертикальный обмен в водах открытого Байкала.

Для определения K_z нами использованы косвенные методы, основанные на данных вертикального распределения отдельных химических индикаторов. Так, по распределению гелия и трития определен возраст вод на разной глубине [10], характеризующий условное время их полного обновления при обмене с водами верхнего слоя озера. По данным о возрасте вод T_z на отдельных горизонтах с учетом морфометрических характеристик [11] можно установить возраст залегающей под ними водной массы T_v .

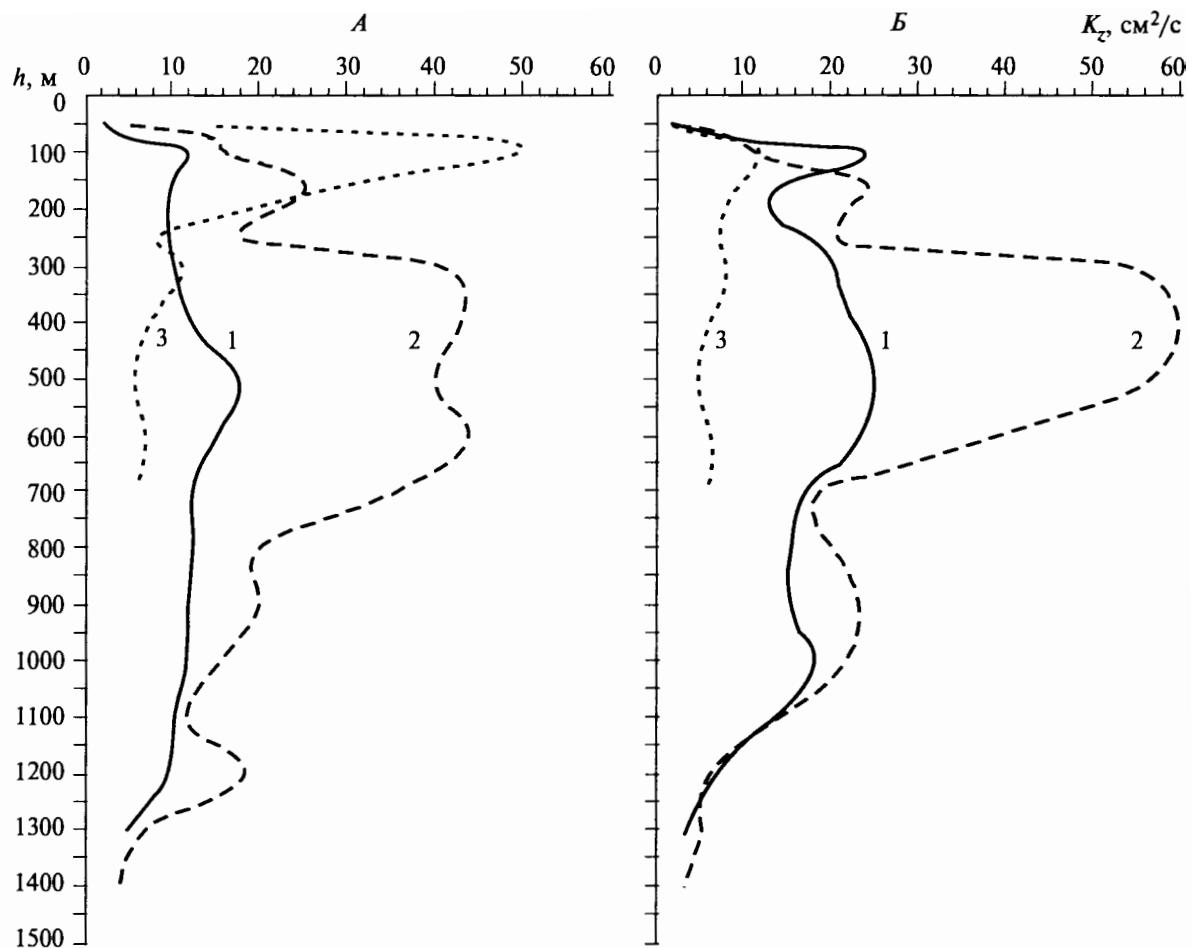


Рис. 2. Распределение K_z в июле–августе (А) и августе–сентябре (Б).
Котловины Байкала: 1 — Южная, 2 — Средняя, 3 — Северная.

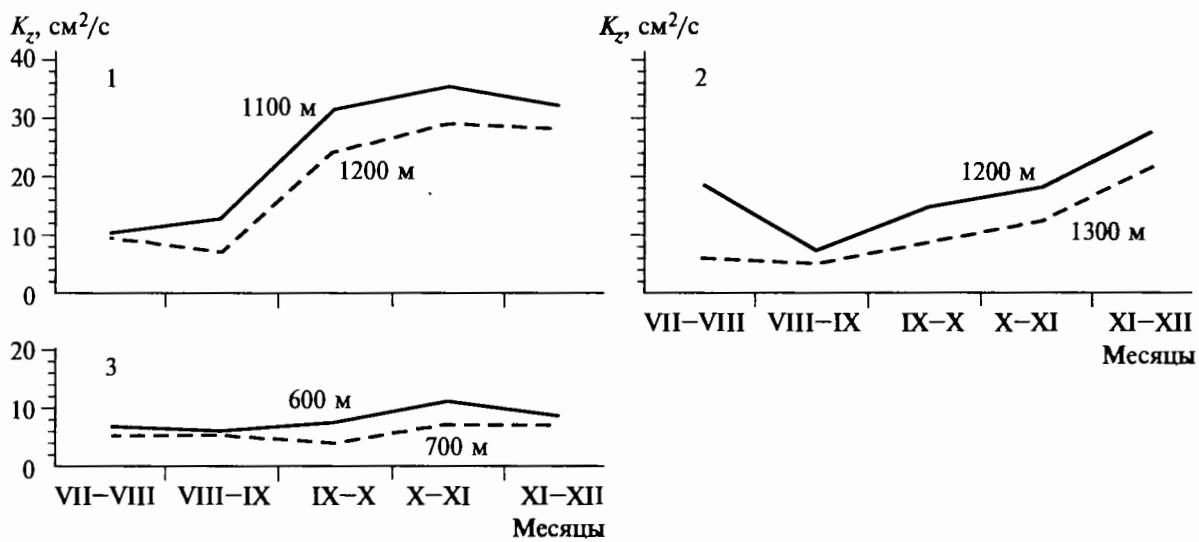


Рис. 3. Сезонный ход K_z в придонных слоях Южного (1), Среднего (2) и Северного (3) Байкала.

Показатели вертикального водообмена в разных частях озера

Горизонт, м	Южный Байкал			Средний Байкал			Северный Байкал		
	T_z	T_v	W	T_z	T_v	W	T_z	T_v	W
0	1,5	8,3	101,8	1,6	8,6	98,9	1,6	5,6	102,3
100	2,9	9,0	96,1	2,4	9,4	94,8	2,9	6,3	87,5
200	4,0	9,8	83,0	4,2	10,2	81,6	3,5	6,9	68,4
300	5,0	10,5	72,0	4,8	10,9	71,2	4,5	7,7	51,8
400	6,4	11,2	62,0	6,8	12,6	62,5	5,9	8,5	38,4
500	7,7	11,9	52,4	6,8	12,6	54,2	7,8	9,2	27,6
600	9,0	12,5	44,5	7,9	13,6	45,6	9,0	9,6	19,4
700	10,0	13,2	37,2	9,7	14,3	39,4	9,5	10,0	11,4
800	11,2	13,8	30,5	11,5	15,0	33,2	10,6	9,9	3,8
900	12,4	14,4	24,4	13,3	15,7	27,9	9,2	—	—
1000	13,8	14,9	19,2	14,8	16,2	22,6	—	—	—
1100	14,7	15,2	13,8	15,3	16,4	18,9	—	—	—
1200	15,4	15,3	8,9	16,0	16,7	14,9	—	—	—
1300	15,2	15,2	4,1	16,6	16,9	11,4	—	—	—
1400	15,1	15,1	0,4	17,3	16,5	8,2	—	—	—
1500	—	—	—	17,0	15,7	4,7	—	—	—
1600	—	—	—	15,8	15,8	0,4	—	—	—
1620	—	—	—	15,8	—	—	—	—	—

Примечание. T_z – возраст воды на горизонте (годы); T_v – возраст залегающей ниже горизонта водной массы (годы); W – скорость водообмена через горизонт ($\text{м} \cdot \text{год}^{-1}$).

Скорость вертикального водообмена W через каждый горизонт определяется из выражения $W = V/T_v$, где V – объем вод, залегающих ниже этого горизонта. За основу расчета W приняты усредненные за четыре года сведения о T_z в отдельных котловинах Байкала [10]. Вполне реально допущение о том, что найденные значения W (см. таблицу) характеризуют усредненную за многолетний период скорость вертикальной турбулентной диффузии. Если принять за ее линейный масштаб L среднюю глубину отдельных котловин, то значения K_z находятся из соотношения размерности как $K_z = W \times L$.

Определенные по этой зависимости и данным таблицы значения K_z (рис. 4, А) имеют те же особенности вертикального и горизонтального распределения, как и значения K_z , определенные по методу «потока тепла». Достаточно близкими оказываются они и на границе верхней и глубинной зон озера (глубины 200–300 м), составляя около $20 \text{ см}^2/\text{с}$ в Южном и Среднем Байкале и $11 \text{ см}^2/\text{с}$ – в Северном. Это в известной степени подтверждает правильность принятой гипотезы о том, что скорость вертикального водообмена по данным о возрасте можно рассматривать как скорость крупномасштабной диффузии.

Полученные значения K_z характеризуют среднюю годовую интенсивность вертикального обмена, т. е. учитывают и условия подледного периода с пониженной активностью обмена. Вероятно, поэтому их уменьшение с ростом глубины более выражено, чем для K_z , определенного по методу «потока тепла» только для периода открытой воды.

Еще одна возможность определения коэффициентов вертикального обмена заключается в использовании экспериментальных данных об изменении концентрации растворенного кремния (Si) в Байкале. В конце XX в. аномальное потепление [12] сопровождалось бурным развитием фитопланктона [13] и исключительно большим снижением в водах озера концентрации кремния [14], потребляемого диатомовыми водорослями. Если в среднем за многолетний период [3] поступление в Байкал этого элемента с водами рек ($8,8 \text{ г Si/m}^2$ за год в расчете на единицу поверхности озера) равнялось его потерям при выносе из озера со стоком Ангары ($1,4 \text{ г Si/m}^2$) и при захоронении в донных осадках с остатками диатомовых водорослей ($7,4 \text{ г Si/m}^2$), то в 1995–2001 гг. это равенство было нарушено. За этот период по данным ежегодных съемок запасы кремния во всем озере сократились на $200 \pm 18 \text{ г Si/m}^2$, или на 28 % его содержания в 1995 г. ($\sim 730 \text{ г Si/m}^2$). В этих условиях основным источником исключительно высокого потребления кремния водорослями в верхнем трофогенном слое мог быть только его перенос из глубинных слоев.

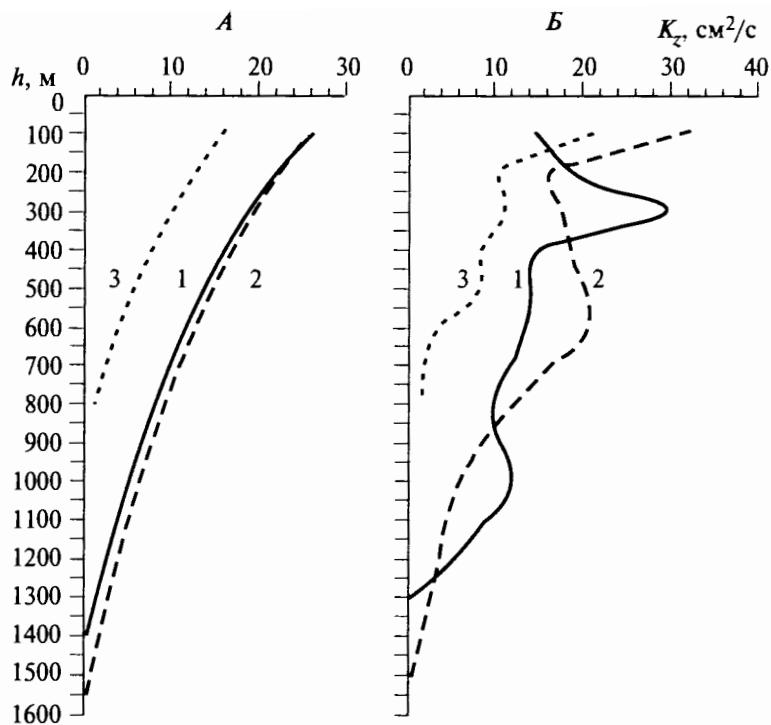


Рис. 4. Коэффициенты вертикального обмена, определенные по скорости вертикального водообмена (A) и изменению запасов кремния (B).

Котловины Байкала: 1 — Южная, 2 — Средняя, 3 — Северная.

Сведения о понижении запасов Si под отдельными горизонтами в 1995–2001 гг. позволяют рассчитать его потоки из нижних слоев в верхние. При расчете K_z использованы значения его средних за 1995–2001 г. потоков, а также вертикальных градиентов, определенных по усредненным за этот период профилям вертикального распределения Si в отдельных котловинах озера.

Кремний — не консервативная примесь. Часть его, содержащаяся в остатках отмерших водорослей, подвергается реминерализации и вновь возвращается в трофогенный слой в процессе обмена. Однако в рассматриваемый период роль этой составляющей в балансе кремния была, видимо, крайне мала и не могла заметно компенсировать его потерю, связанных с потреблением водорослями и отложением в донных осадках. Вместе с тем возможно, что пренебрежение этой составляющей баланса кремния могло привести к некоторому занижению рассчитанных значений его вертикальных потоков и коэффициентов вертикального обмена.

Результаты расчета K_z по данным о кремнии (см. рис. 4, B), в основном идентичны полученным другими методами. При сравнении выявляется близость коэффициентов, полученных по усредненным за многолетний цикл исходным показателям (кремний, скорость вертикального водообмена). В большинстве случаев (кроме Среднего Байкала) все методы дают для глубинных зон отдельных котловин практически сходные результаты.

Таким образом, данные, полученные с использованием разных методов, свидетельствуют о пониженной активности вертикального обмена в водной толще Северной котловины озера. Близость найденных разными методами значений K_z в пределах каждой котловины дает основание для их использования при оценке вертикального переноса тепла и вещества на границе их верхней и глубинной зон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (00-05-65058, 02-05-65337) и Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 131).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шимараев М. Н., Гранин Н. Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. РАН. — 1991. — Т. 321, № 2.
2. Шимараев М. Н. Элементы теплового режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1977.

3. **Вотинцев К. К.** Гидрохимия озера Байкал. — М.: Изд-во АН СССР, 1961.
4. **Штокман В. Б.** Вертикальное распространение тепловых волн в море и косвенные методы определения коэффициента теплопроводности // Труды Ин-та океанологии АН СССР. — М.; Л., 1946. — Т 1.
5. **Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. — М.; Л.: Наука, 1965.
6. **Хомскис В.** Динамика и термика малых озер. — Вильнюс: Минтис, 1969.
7. **Ravens Th. M., Kocsis O., Wuest A., Granin N.** Small-scale turbulence and vertical mixing in Lake Baikal // Limnol. Oceanogr. — 2000. — № 45 (1).
8. **Жданов А. А., Гранин Н. Г., Шимараев М. Н.** О механизмах генерации подледных течений // Докл. РАН. — 2001. — Т. 377. № 3.
9. **Гранин Н. Г.** Устойчивость стратификации и некоторые механизмы генерации конвекции в Байкале: Авто-реф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 1999.
10. **Hohmann R. M., Kipfer R., Peeters F. et al.** Distribution of helium and tritium in Lake Baikal // J. Geophys. Res. — 1998. — Vol. 103 (C6).
11. **Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N., Sherstavankin P. P.** Physical limnology of Lake Baikal: A review. — Okayama; Irkutsk, 1994.
12. **Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В.** Климат и гидрологические процессы в бассейне озера Байкал в XX столетии // Метеорол. и гидрол. — 2002. — № 3.
13. **Измельцева Л. Р., Павлов Б. К., Шимараева С. В.** Современное состояние экосистемы озера Байкал и тенденции его изменения // Тезисы докладов VIII съезда Гидробиол. об-ва РАН. — Калининград, 2001. — Т. 1.
14. **Домышева В. М.** Закономерности пространственного распределения и динамика кислорода и биогенных элементов в глубоководной области Байкала: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 2001.