



Серия «Науки о Земле»

2025. Т. 52. С. 84–96

Онлайн-доступ к журналу:

<http://izvestiageo.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ

Иркутского

государственного

университета

Научная статья

УДК 556.552(282.256.341)

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.84>

## Межкотловинный водообмен проточностью в озере Байкал

В. Н. Синюкович, А. А. Жданов\*

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**Аннотация.** На основе многолетних данных по элементам водного баланса оз. Байкал рассчитаны современные годовые и месячные значения водообмена проточностью между котловинами озера – северной, средней и южной. Показано, что формирование годовых величин межкотловинного перетока определяется поступлением в озеро речных вод. Внутри года водообмен распределяется в соответствии с сезонным ходом воднобалансовых составляющих озера и его уровня. С учетом последних данных по морфометрии Байкала уточнены параметры обновления вод как по котловинам, так и для всего озера. Рассчитанный период водообновления по котловинам изменяется от 100 до 345 лет, а для всего озера составляет 320 лет. Роль водообмена проточностью в общей горизонтальной динамике вод озера в безледный период соизмерима с эффектом сгонно-нагонных явлений, а также с воздействием ветровой деятельности. Отмечается, что средние скорости течения, инициированные водообменом проточностью, не превышают 0,05 см/с, что затрудняет их регистрацию измерительными приборами. Однако в зонах локализации межкотловинного перетока вод средняя за год скорость течения по некоторым данным может достигать 40 см/с.

**Ключевые слова:** проточность, котловина, водный баланс, водообмен, течения.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках госзадания ЛИН СО РАН (тема № 0279-2021-0004).

**Для цитирования:** Синюкович В. Н., Жданов А. А. Межкотловинный водообмен проточностью в озере Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 52. С. 84–96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.84>

## Interbasin Water Exchange by Flowage in Lake Baikal

V. N. Sinyukovich, A. A. Zhdanov\*

*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** Based on long-term data on the water balance elements of Lake Baikal, modern annual and monthly values of water exchange by flowage between the lake basins – northern, middle and southern – are calculated. It is shown that the formation of annual values of inter-basin flow is determined by the inflow of river waters into the lake. Within a year, water exchange is distributed in accordance with the seasonal course of the water balance components of the lake and its level. Taking into account the latest data on the morphometry of Baikal, the parameters of water renewal are specified both in the basins and for the entire lake. The calculated period of water renewal in the basins varies from 100 to 345 years, and for the entire lake is 320 years. The role of water exchange by flowage in the general horizontal dynamics of lake waters during the ice-free period is commen-

© Синюкович В. Н., Жданов А. А., 2025

\* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.  
For complete information about the authors, see the last page of the article.

surate with the effect of storm surges, as well as with the impact of wind activity. Average flow rates initiated by water exchange by flow do not exceed 0.05 cm/s, which makes it difficult to record them with measuring instruments. However, in the zones of localization of inter-basin water flow, the average annual flow rate, according to some data, can reach 40 cm/s.

**Keywords:** flowage, basin, water balance, water exchange, currents.

---

**For citation:** Sinyukovich V N., Zhdanov A.A. Interbasin Water Exchange by Flowage in Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 52, pp. 84-96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.84> (in Russian)

---

## Введение

Водообмен в озерах и водохранилищах определяет характер обменных процессов и интенсивность распространения вещества и энергии в них, формирующих качество воды, численность и видовое разнообразие биоты водоемов. Первые данные по водообмену в Байкале получены В. М. Сокольниковым более полувека назад [Сокольников, 1964; Sokolnikov, 1972], но к настоящему времени более или менее полно описаны только характер и причины водообмена. Существующие же его количественные оценки остаются достаточно приближенными из-за сложности и недостаточной изученности механизмов, формирующих динамику водных масс в озере. Горизонтальный водообмен в Байкале обусловлен проточностью и внутренними вынуждающими причинами, главным образом ветровой деятельностью. Водообмен проточностью формируется в результате внешнего поступления воды в озеро (речной приток и атмосферные осадки) и ее потерь на испарение. Он рассчитывается по элементам водного баланса и количественно равен стоку из озера. Этот показатель дает представление о потенциальных масштабах движения вод в Байкале, поступающих извне и в итоге перетекающих за пределы озера через исток р. Ангары. По источнику поступления воды водообмен проточностью также называют внешним, а по принципу ее перемещения – транзитным.

Расчеты водообмена проточностью и вызванного действием ветра, градиентами атмосферного давления, разницей уровней, плотностными различиями воды и др. существенно различаются. Если в первом случае исходными данными служат элементы водного баланса озера, то во втором переток воды в чаше водоема может быть оценен по данным о скоростях течения воды, полученных в результате натурных измерений, расчетным путем или с помощью физической модели водоема. Измеряемые течения в большинстве случаев формируются под воздействием нескольких факторов, включая и проточность, т. е. являются суммарными. Разделить их по генезису, не говоря уже о количественной оценке роли отдельных составляющих, бывает крайне сложно.

Характер водообмена в Байкале определяется морфометрическими особенностями озера и в первую очередь наличием трех обособленных котловин – северной, средней и южной, отделенных друг от друга Селенгинским поднятием (мелководьем) и Академическим хребтом. Это позволяет рассматривать водообмен в озере на границах между смежными котловинами, где за счет уменьшения площади поперечного сечения скорости течения по-

вышаются. В этом случае проточность оценивается по локальным водным балансам каждой из котловин. При этом, если рассчитываются среднегодовые или многолетние показатели водообмена, то аккумуляция, как правило, не учитывается. Оценки проточности за более короткие интервалы времени требуют учета произошедших изменений уровня, так как от них зависит не только интенсивность, но и направление перетока воды между соседними котловинами. В свою очередь ход уровней на границе котловин зависит как от объемов поступления воды в каждую из них, так и от стока воды из озера через р. Ангару, регулируемого Иркутской ГЭС.

Основополагающие результаты по водообмену проточностью в оз. Байкал получены в 1970–1980-х гг. [Верболов, Шимараев, 1972; Викулина, Кашинова, 1973; Комплексные исследования ... , 1975; Афанасьев, 1977; Течения в Байкале, 1977; Формирование и динамика ... , 1986; Айнбунд, 1988] и в части межкотловинного перетока вод остаются достаточно противоречивыми.

В последующий период распространение получили методы исследований водообмена в озерах с привлечением различных природных трассеров [Horizontal mixing ... , 1996]. На Байкале результатом использования химических и физических индикаторов (концентрации гелия, трития, кислорода, температура воды и др.) стали новые данные преимущественно по водообновлению глубинных слоев озера и вертикальному перемешиванию вод [Weiss, Carmack, Koropalov, 1991; Verbolov, 1996; Processes of deep-water ... , 1997; Distribution of helium ... , 1998; Kipfer, Peeters, 2000; Cold intrusions ... , 2005]. В части изучения горизонтального водообмена, в том числе и проточностью, можно выделить только обобщение [Water exchange ... , 2003] с оценкой водообмена между северной и средней котловинами водоема.

Накопленные к настоящему времени данные о гидрометеорологическом режиме озера позволяют оценить современные показатели внешнего водообмена в Байкале, отражающие произошедшие изменения климатических условий в регионе.

В соответствии с изложенным, целью настоящего исследования является современная характеристика межкотловинного обмена вод в оз. Байкал, формирующегося за счет проточности.

### **Материалы и методы**

Исследования выполнены на основе материалов Росгидромета по годовому стоку рек, впадающих в Байкал, а также данных Иркутского УГМС по элементам водного баланса озера. Расчетный период охватывает 1961–2022 гг. Данные по осадкам и испарению за 1961–1972 гг. принимались с учетом корректировок [Викулина, Кашинова, 1973; Гронская, Литова, 1991] на изменение методики их измерения.

Для расчета притока в разные котловины использованы данные наблюдений 25 рек, освещающих сток с суммарной водосборной площади озера в 507 164 км<sup>2</sup>, или 93,9 % байкальского бассейна. Сток с оставшейся (неизученной) части территории рассчитывался методом аналогии.

Приток поверхностных вод в северную котловину с суммарной водосборной площади 38 070 км<sup>2</sup> оценивался по стоку пяти рек, главной из которых является Верхняя Ангара с площадью бассейна 21 000 км<sup>2</sup>.

Для средней котловины использованы данные по стоку шести рек, среди которых самые крупные Баргузин и Турка.

Приток в Южный Байкал рассчитан по данным о стоке 13 небольших водотоков, из которых самым большим является р. Снежная с площадью бассейна 3000 км<sup>2</sup>.

Для средней и южной котловин, помимо этого, учитывался сток Селенги, впадающей в озеро на границе между ними. Расчет распределения селенгинских вод в Южный и Средний Байкал выполнен с использованием помесечных весовых коэффициентов, полученных [Формирование и динамика..., 1986].

Распределение осадков и испарения по котловинам выполнялось соразмерно площадям каждой из них, принятых по результатам проекта INTAS [A new bathymetric ... , 2002]. Расчеты всех элементов водного баланса и показателей водообмена выполнялись с точностью до 0,1 км<sup>3</sup>.

### Результаты и обсуждение

Анализ элементов водного баланса оз. Байкал за 1961–2022 гг. показывает (табл. 1), что в составе его приходной части преобладает речной приток, на долю которого приходится 84 % внешнего поступления вод. Основная часть речных вод (26,4 км<sup>3</sup>/год, или 42,1 % общего притока) поступает в Средний Байкал. Приток к южной и северной котловинам практически равнозначен и в среднем составляет около 18 км<sup>3</sup>/год.

Таблица 1

Водный баланс оз. Байкал по котловинам, км<sup>3</sup>

Элементы баланса	Северная	Средняя	Южная	Сумма
Приток	18,4	26,4	17,6	62,4
Осадки	5,3	4,1	2,9	12,3
Испарение	6,5	5,0	3,5	15,0
Отток	17,2	25,5 (42,7)*	17,0 (59,7)*	59,7

Примечание: \*в скобках – с учетом перетока из соседних котловин.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что транзитный отток из каждой котловины приближенно соответствует притоку поверхностных вод, поскольку осадки и испарение практически полностью компенсируют друг друга. Переток внешних вод из северной котловины в южную, в среднем составляющий 17,2 км<sup>3</sup>/год, хорошо согласуется с результатами [Формирование и динамика..., 1986]. Несколько хуже соответствие полученных данных с оценками [Верболов, Шимараев, 1972], очевидно, из-за разных расчетных периодов, с разными условиями увлажнения. Более значительные расхождения выявляются при сравнении с данными А. Н. Афанасьева [1977], которые в основном являются следствием учета им поступления в Северный Байкал селенгинских вод.

Локальный сток из средней котловины в южную, равный  $25,5 \text{ км}^3/\text{год}$ , в целом не противоречит результатам [Верболов, Шимараев, 1972; Афанасьев, 1977; Течения в Байкале, 1977], тогда как внешнее поступление вод в Южный Байкал в объеме  $17 \text{ км}^3/\text{год}$  сопоставимо только с данными [Афанасьев, 1977] и до  $5\text{--}7 \text{ км}^3/\text{год}$  меньше оценок [Верболов, Шимараев, 1972; Течения в Байкале, 1977; Викулина, Кашинова, 1973]. Главной причиной этих расхождений, судя по их величине, является использование разных подходов к оценке распределения стока Селенги между средней и южной котловинами.

По результатам выполненных расчетов становится видно, что водообмен проточностью на границе между Средним и Южным Байкалом, с учетом оттока из северной части озера, возрастает до  $42,7 \text{ км}^3/\text{год}$ , а общий транзит (вместе с местным приходом в южную) – до  $59,7 \text{ км}^3/\text{год}$ . Этот объем должен соответствовать реальному стоку из озера, тогда как его фактическое среднее значение за 1961–2022 гг. составляет только  $58,0 \text{ км}^3/\text{год}$ . Ежегодный избыток прихода воды в  $1,7 \text{ км}^3$  за 62 года выражается объемом в  $105,4 \text{ км}^3$ , который должен был быть аккумулирован в Байкале. Однако из данных о средних уровнях Байкала на первое число каждого месяца видно, что на начало 1961 и 2023 гг. их разница составляла всего 9 см, что соответствует аккумуляции  $2,8 \text{ км}^3$ , или в среднем  $0,045 \text{ км}^3/\text{год}$ . Последняя величина меньше принятой нами точности расчетов и может не учитываться. Годовая невязка баланса в объеме  $1,7 \text{ км}^3$  является следствием ошибок определения его элементов и является предметом отдельного рассмотрения. Здесь только отметим, что история исследований прихода-расхода воды в Байкале свидетельствует о систематическом преобладании положительной невязки водного баланса со времени прекращения измерений стока р. Ангары в истоке и перехода к его учету на Иркутской ГЭС. Вопрос о надежности учета стока через Иркутский гидроузел остается дискуссионным до настоящего времени и требует проведения натурной тарировки станции. В нынешней ситуации для сведения водного баланса Байкала часть исследователей вынуждена относить невязку к стоку из озера, другая – к притоку.

### **Проточность и общий горизонтальный водообмен в озере**

Внешний водообмен между котловинами в объемах, приведенных в табл. 1, соответствует крайне низкой скорости потока в озере. На Селенгинском мелководье, где ширина Байкала составляет около 30 км, а средняя глубина 200 м, она в среднем составляет порядка  $0,02 \text{ см/с}$  и, следовательно, находится ниже порога чувствительности измерительной аппаратуры. Вместе с тем особенности циркуляции в озере способствуют основному перетоку вод в узкой полосе у северо-западного берега, где средняя за год скорость транзитного течения по данным [Верболов, Шимараев, 1972; Verbolov, 1996] возрастает до  $40 \text{ см/с}$ .

Низкие среднегодовые скорости перемещения «новых» вод оказались вполне ожидаемы в соответствии с некоторыми общепринятыми показателями водообмена, к которым относится коэффициент условного водообмена ( $K$ ) и период водообновления ( $T = 1/K$ ). При этом для Байкала, со значимой

невязкой водного баланса, более корректным будет определять  $K$  по формуле, учитывающей сумму всех воднобалансовых составляющих:

$$K = \frac{Y + X + Q + Z}{2V},$$

где  $Y$  – приток поверхностных вод;  $Q$  – сток через р. Ангару;  $X$  – осадки на акваторию;  $Z$  – испарение с водной поверхности;  $V$  – объем озера.

Используя данные табл. 1 и уточненные сведения по мофометрии озера [A new bathymetric..., 2002], находим, что  $K$  для Байкала составляет 0,00313, а период водообновления 320 лет. Это на 50–80 лет меньше, чем в работах [Verbolov, 1996; Water exchange ..., 2003], и связано с использованием в исследованиях этих авторов сведений по водному балансу Байкала из более раннего источника [Верболов, Шимараев, 1972] с более низкими значениями всех составляющих.

В табл. 2 приведены обновленные нами коэффициенты водообмена и время обновления вод в отдельных котловинах

Таблица 2

Коэффициент условного водообмена и период водообновления

	Северная котловина	Средняя котловина	Южная котловина
$K$	0,00289	0,0515	0,00996
$T$ , лет	345	194	100

Некоторые показатели водообмена из полученных данных существенно различаются с результатами предшествующих исследований, в особенности для Северной котловины, где  $T$  получилось соответственно на 84 и 163 года меньше, чем у [Water exchange ..., 2003] и [Verbolov, 1996].

Для суждения о роли водообмена проточностью в общем межкотловинном перетоке вод сравним полученные результаты с имеющимися сведениями по основным составляющим водообмена, вызванного внутренними причинами. По результатам натурных измерений течений, а также экспериментальных данных на модели озера по ветровым течениям и переносу вод, созданной в Государственном гидрологическом институте, было установлено, что за период открытого русла через Селенгинское мелководье в Южный Байкал перетекает около 96 км<sup>3</sup> воды, а в Средний – порядка 64 км<sup>3</sup> [Айнбунд, 1988]. При этом оказалось, что разнонаправленные потоки существуют одновременно: в верхних слоях направление движения вод совпадает с направлением ветра, а с глубиной меняется на противоположное. Общий водообмен между южной и средней котловинами за счет действия ветра достигает, 160 км<sup>3</sup> и почти в четыре раза превышает водообмен проточностью на этом участке. Однако результирующий переток в Южный Байкал, составляющий 32 км<sup>3</sup>, наоборот, несколько уступает водообмену, рассчитанному по водному балансу (см. табл. 1).

О роли ветровой деятельности в горизонтальном водообмене в озере можно также судить по сведениям о денивеляции уровня при сгонах и нагонах. По данным [Течения в Байкале ..., 1977; Verbolov, 1996], в северную котловину из средней при нагонах поступает около 20 км<sup>3</sup>, а при сгонах пе-

ретекает в другую сторону  $10 \text{ км}^3$ . В южную котловину из средней при нагонах затекает  $10 \text{ км}^3$ , а при сгонах в обратном направлении перетекает  $20 \text{ км}^3$ . По окончании ветровой деятельности происходит обратный переток вод, поэтому данная составляющая водообмена в основном способствует общему перемешиванию вод, выравнивая характеристики водных масс в разных частях озера. Тем не менее интенсивность водообмена при сгонно-нагонных явлениях, по мнению авторов [Течения в Байкале ... , 1977], близка к величине эффекта его проточности.

Аналогичная оценка водообмена, по сведениям о колебаниях уровня [Комплексные исследования ... , 1975], отличается более высокими его значениями в северной и южной котловинах – от 99,3 до  $183,5 \text{ км}^3$  за год. Еще более высокие показатели, составляющие для северной и средней котловин до  $240 \text{ км}^3/\text{год}$ , получены [Water exchange ... , 2003] с использованием данных о минерализации речных и озерных вод.

Такой разброс оценок водообмена свидетельствует как о сложности механизма его формирования, так и необходимости дальнейшего изучения динамики вод озера. Количественное определение всех слагаемых межкотловинного водообмена позволит получить достоверные оценки условного времени замещения вод в каждой из котловин, определяющего скорость различных внутриводоемных процессов. Предварительные расчеты [Water exchange ... , 2003] показывают, что для южной котловины время водообновления может сократиться до 50 лет, а северной и средней – до 30–33 лет.

### Межгодовые колебания проточности

Представленные результаты характеризуют осредненную картину межкотловинного водообмена в Байкале, которая в соответствии с колебаниями элементов водного баланса и уровня озера может существенно отличаться в отдельные периоды. В первую очередь это будет зависеть от притока речных вод в каждую из котловин озера, определяющегося, как было видно, в южную и среднюю котловины стоком р. Селенги (в среднюю 63 %), а в Северный Байкал на 47 % – стоком Верхней Ангары.

Анализ межгодовых колебаний приточности к отдельным котловинам (рис. 1) показывает, что они происходят достаточно синхронно и определяются условиями увлажнения водосборного бассейна озера. Связь изменений объемов притока в Южный и Средний Байкал со стоком основной питающей реки, Селенги, по коэффициенту корреляции ( $r$ ) составляет 0,94–0,95. Сток рек в Северный Байкал столь же тесно связан с водностью Верхней Ангары ( $r = 0,88$ ).

Для притока в Средний и Южный Байкал характерна незначительная тенденция общего спада с начала расчетного периода ( $0,2\text{--}0,4 \text{ км}^3$  за 10 лет), а также маловодные 1976–1981 гг. и период с конца XX в. до 2017 г. Наступившее затем повышение водности в 2021 г. оказалось экстремальным вследствие аномально высокого стока Селенги. Следует отметить также многолетнюю тенденцию постепенного снижения доли стока Селенги в обводнении средней и южной котловин. Если до 1996 г. суммарно она составляла в среднем 46 %, то в период 1996–2022 г. уже только 41 %, снижаясь в 2002 и 2007 гг. до 30 %.

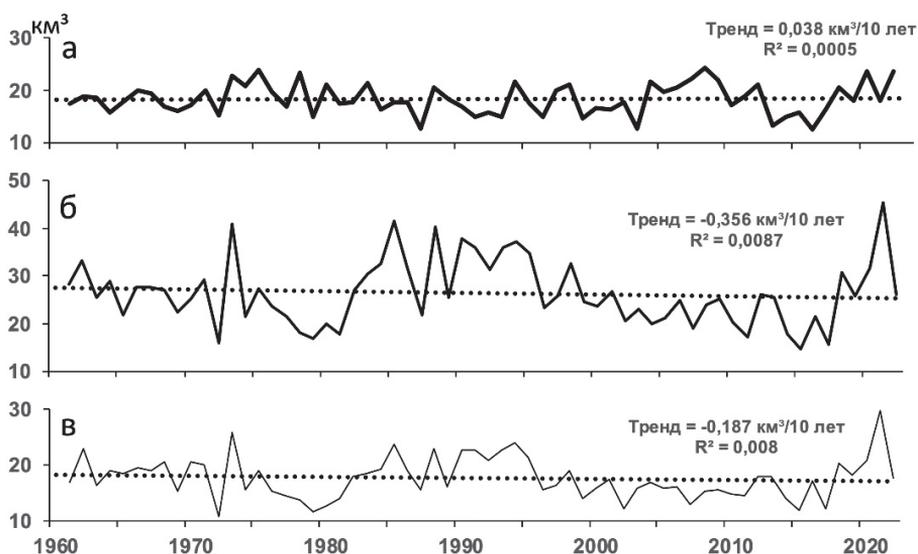


Рис. 1. Многолетние колебания притока речных вод к отдельным котловинам Байкала: а – северной, б – средней, в – южной

Многолетняя динамика притока в северную котловину, наоборот, характеризуется слабым положительным трендом. При этом в 1996–2017 гг., которые для большинства байкальских рек были маловодными, приточность в Северный Байкал оставалась, в соответствии с водностью Верхней Ангары, повышенной.

Диапазон колебаний притока в южную и северную котловины составляет 10,8–29,7 км³/год, а в среднюю 14,7–45,4 км³/год. Это указывает на то, что в отдельные годы интенсивность межкотловинного водообмена проточностью может различаться в два-три раза.

### Внутригодовая изменчивость

Еще большая вариабельность характерна для оценок проточности по месячным элементам водного баланса. Это связано с крайне неравномерным внутригодовым распределением воднобалансовых составляющих (рис. 2), а также с несовпадением во времени максимальных значений прихода и расхода воды в каждой котловине. Если для Южного Байкала сдвиг между максимумами прихода и расхода по оценкам [Афанасьев, 1977] составляет один месяц, то для Северного – уже шесть.

В холодное время года транзитная, или сточная, циркуляция в озере активизируется из-за резкого уменьшения притока речных вод и выпадения осадков, при сохранении сравнительно высокого стока р. Ангары. После установления ледостава, исключая возникновение ветровых течений, она становится преобладающей.

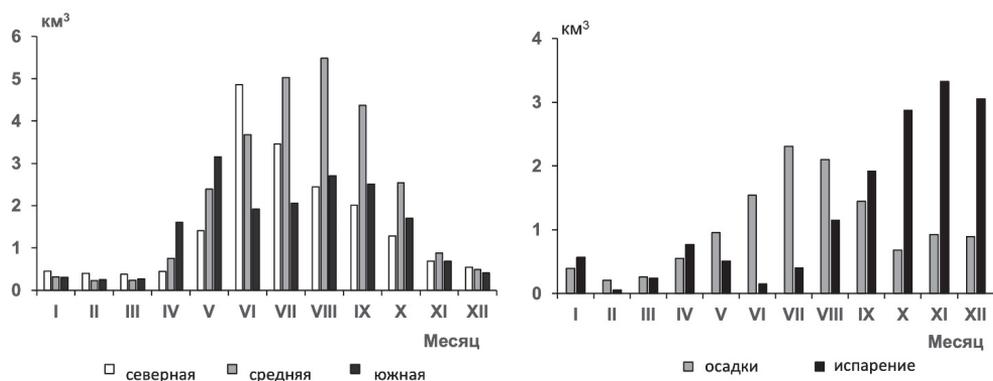


Рис. 2. Внутригодовое распределение элементов водного баланса:  
 а – приток поверхностных вод по котловинам; б – осадки на поверхность озера  
 и испарение с нее

Среднемесячные значения водообмена проточностью (табл. 3) свидетельствуют о том, что максимальное накопление воды в северной котловине, в соответствии с преобладанием снегового питания северных притоков Байкала, наблюдается в июне, а в средней и южной – в июле-августе. В период январь-март водообмен в каждой из котловин составляет около  $0,3 \text{ км}^3$ , а в ноябре-декабре может принимать отрицательные значения. Это связано с чрезвычайно высокими потерями воды на испарение, которые в данные месяцы превосходят ее приход со стоком рек и атмосферными осадками. По данным [Формирование и динамика ... , 1986], значительный переток вод в обратном направлении наблюдается также в многоводные периоды летом, и, например, из средней котловины в северную может достигать  $1,3\text{--}1,6 \text{ км}^3/\text{мес}$ .

Таблица 3

Внутригодовое распределение характеристик водообмена проточностью по котловинам озера,  $\text{км}^3$

Котловина, река	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Проточность по котловинам												
Северная	0,4	0,5	0,4	0,3	1,6	5,4	4,3	2,9	1,8	0,3	-0,4	-0,3
Средняя	0,3	0,3	0,2	0,7	2,5	4,1	5,7	5,8	4,2	1,8	0,1	-0,2
Южная	0,3	0,3	0,3	1,6	3,3	2,2	2,5	2,9	2,4	1,2	0,1	-0,1
Суммарно	1,0	1,1	0,9	2,6	7,4	11,7	12,5	11,6	8,4	3,3	-0,2	-0,6
Сток из озера												
Ангара-Исток	4,8	4,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,8	5,0	5,0	5,1	5,1	5,2

Вместе с тем рассматриваемые месячные значения водообмена, как уже отмечалось, служат потенциальными показателями оттока воды из котловин, так как в периоды сезонного подъема уровня озера поступившие в ту или иную котловину воды могут частично или полностью в них задерживаться, обеспечивая аккумуляционную составляющую водного баланса (в годовых

оценках проточности нами не учитывалась). Затем, во время снижения уровня, накопленный за предшествующий период запас воды срабатывается, причем как частично или полностью, так и сверх того, в зависимости от масштабов снижения уровня. Иными словами, водообмен проточностью трансформируется внутри года в соответствии с сезонным ходом уровня озера, формируемым соотношением между общим приходом воды в него и расходом через р. Ангару.

Из анализа месячных данных проточности можно проследить механизм формирования уровня озера и оценить средние скорости транзитных течений. Так, при максимальном локальном приходе воды в южную котловину, который наблюдается в мае и равен  $3,3 \text{ км}^3$ , сток р. Ангары составляет  $4,6 \text{ км}^3$ . В результате здесь формируется дефицит воды в объеме в  $1,3 \text{ км}^3$ , который компенсируется ее перетоком из вышележащих частей озера. Вместе с этим из общего поступления воды в Северный и Средний Байкал за май еще остается  $2,8 \text{ км}^3$ , этот объем равномерно распределится по всему озеру и повысит его уровень на 9 см. За счет этого в южную котловину через Селенгинское поднятие дополнительно поступит около  $1 \text{ км}^3$  воды. Общий переток, таким образом, возрастает до  $2,3 \text{ км}^3$ , а соответствующая ему средняя за месяц скорость течения составляет  $0,01 \text{ см/с}$ , что оказывается еще ниже, чем при годовом осреднении.

Самые высокие скорости транзитного потока приходятся на декабрь, когда разница между стоком Ангары и приходом вод в озеро составляет  $5,8 \text{ км}^3$ , вызывая снижение уровня на 18 см. В результате переток воды через Селенгинское мелководье достигает  $5,1 \text{ км}^3$ , а его скорость  $0,03 \text{ см/с}$ . Максимальная же расчетная скорость движения воды за счет проточности здесь получилась около  $0,05 \text{ см/с}$  для декабря 1971 г. Надо полагать, что средние скорости перетока вод над Академическим хребтом, где площадь водного сечения больше, а объемы переноса меньше, будут еще ниже.

Таким образом, даже в самых исключительных случаях осредненные скорости перетока вод через границы между котловинами за счет проточности оказываются чрезвычайно малы и недостаточны для надежной регистрации гидрологическими приборами. Не исключено, что основной транзитный поток между котловинами будет локализован на более или менее ограниченных участках, где скорости течения будут значительно выше. Для выявления таких зон требуется проведение систематических наблюдений за скоростным режимом вод на границах между котловинами.

### **Заключение**

Полученные в результате выполненных исследований оценки межкотловинного перетока вод в оз. Байкал за счет проточности отражают современные климатические условия в регионе и получились несколько выше, чем в более ранних литературных источниках. Годовые значения локального оттока вод из каждой котловины количественно практически соответствуют локальному притоку речных вод, что обусловлено компенсацией прихода влаги от выпадающих осадков ее потерями на испарение. Точность расчетов

водообмена проточностью снижается из-за присущей современным данным о водном балансе оз. Байкал положительной невязки, составляющей  $1,7 \text{ км}^3/\text{год}$  и требующей проведения натурной тарировки Иркутской ГЭС, на которой осуществляется учет стока из озера.

Внутригодовые изменения водообмена проточностью трансформируются сезонными колебаниями уровня воды, формирующимися в зависимости от соотношения между общим приходом и расходом воды в озере. В период с октября по апрель, когда происходит снижение уровня озера, транзитный переток вод активизируется и становится максимальным в декабре. В остальную часть года в котловинах преобладает накопление поступающей воды, а ее перемещение между ними возможно в обе стороны.

Средние скорости течения, обусловленные водообменом проточностью, на границах между котловинами не превышают  $0,05 \text{ см/с}$  и могут регистрироваться измерительными приборами только в случае локализованного перетока вод. По некоторым данным на таких участках они могут достигать  $40 \text{ см/с}$ .

### Список литературы

- Айнбунд М. М.* Течения и водообмен в Байкале. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 140 с.
- Афанасьев А. Н.* К проблеме водообмена в озере Байкал // Водные ресурсы. 1977. № 4. С. 27–35.
- Веролов В. И., Шимараев М. Н.* О водообмене в озере Байкал // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1972. Вып. 26. С. 41–47.
- Формирование и динамика байкальских вод / В. И. Веролов, Т. Н. Покатилова, М. Н. Шимараев [и др.]. Новосибирск : Наука, 1986. 121 с.
- Викулина З. А., Кашинова Т. Д.* Водный баланс оз. Байкал // Труды ГГИ. 1973. Вып. 203. С. 3–33.
- Гронская Т. П., Литова Т. Э.* Краткая характеристика водного баланса озера Байкал за период 1962–1988 гг. // Мониторинг состояния озера Байкал. Л. : Гидрометеиздат, 1991. С. 153–158.
- Комплексные исследования водного баланса, течений и водообмена оз. Байкал / В. А. Знаменский, М. М. Айнбунд, З. А. Викулина [и др.] // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. 1975. Т. 5. С. 193–204.
- Сокольников В. М.* Течения и водообмен в Байкале // Элементы гидрометеорологического режима оз. Байкал. М. ; Л. : Наука, 1964. С. 5–21.
- Течения в Байкале / ред. А. Н. Афанасьев, В. И. Веролов. Новосибирск : Наука, 1977. 160 с.
- A new bathymetric map of Lake Baikal / M. de Batist, M. Canals, P. Sherstyankin [et al.]. INTAS Project 99-1669.2002. URL: <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm> (дата обращения: 12.03.2025).
- Cold intrusions in Lake Baikal: Direct observational evidence for deep-water renewal / A. Wuest, T. Ravens, N. Granin [et al.] // Limnol. Oceanogr. 2005. Vol. 50, N 1. P. 184–196.
- Distribution of helium and tritium in lake Baikal / R. Hohmann, M. Hofer, R. Kipfer [et al.] // J. Geophys. Res., 1998. Vol. 103, N C6. P. 12823–12838.
- Horizontal mixing in lakes / F. Peeters, A. Wuest, G. Piepke [et al.] // J. of Geophysical Res. 1996. Vol. 101, N 8. P. 361–375.
- Kipfer R., Peeters F.* Some speculations on the possibility of changes in deep-water renewal in Lake Baikal and their consequence // Lake Baikal. Elsevier, 2000. P. 273–280.
- Processes of deep-water renewal in Lake Baikal / R. Hoomann, R. Kipfer, F. Peeters [et al.] // Limnol. Oceanogr. 1997. Vol. 42, N 5. P. 841–855.

Sokolnikov V. M. Hidrologische Elemente des Stoff- und Energiewechsels um Baikalsee // *Untern. Wereinigung fur theoret. Und Angew. Limnol. Verhandlungen*. 1972. Vol. 18, Pt. 2. P. 563–567.

Verbolov V. I. Currents and water exchange in Lake Baikal // *Water resources*. 1996. Vol. 23, N 4. P. 381–391.

Water exchange between Bed Depressions in Baikal / M. N. Shimaraev, N. G. Granin, V. M. Domysheva [et al.] // *Water Resources*. 2003. Vol. 30, N 6. P. 623–626.

Weiss R. F., Carmack E. C., Koropalov V. M. Deep-water renewal and biological production in lake Baikal // *Nature*. 1991. N 6311. P. 665–669.

## References

Ainbund M.M. *Techeniya i vodoobmen v Baikale* [Currents and water exchange in Baikal]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 140 p. (in Russian)

Afanas'ev A.N. K probleme vodoobmena v ozere Baikal [On the problem of water exchange in Lake Baikal]. *Vodnye resursy* [Water resources], 1977, no. 4, pp. 27-35. (in Russian)

Verbolov V.I., Shimaraev M.N. O vodoobmene v ozere Baikal [On water exchange in Lake Baikal]. *Doklady Instituta geografii Sibiri i Dalnego Vostoka* [Reports of the Institute of Geography of Siberia and the Far East], 1972, is. 26, pp. 41-47. (in Russian)

Verbolov V.I., Pokatilova T.N., Shimaraev M.N. et al. *Formirovanie i dinamika baikalskikh vod* [Formation and dynamics of Baikal waters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 121 p. (in Russian)

Vikulina Z.A., Kashinova T.D. Vodnyi balans oz. Baikal [Water balance of Lake Baikal]. *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1973, iss. 203, pp. 3-33. (in Russian)

Gronskaya T.P., Litova T.E. Kratkaya kharakteristika vodnogo balansa ozera Baikal za period 1962-1988 gg. [Brief characteristics of the water balance of Lake Baikal for the period 1962-1988]. *Monitoring sostoyaniya ozera Baikal* [Monitoring the state of Lake Baikal]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, pp. 153-158. (in Russian)

Znamenskii V.A., Ainbund M.M., Vikulina Z.A. et al. Kompleksnyye issledovaniya vodnogo balansa, techenii i vodoobmena oz. Baikal [Comprehensive studies of water balance, currents and water exchange of Lake Baikal]. *Trudy IV Vsesoyuznogo gidrologicheskogo syezda*. [Proceedings of the IV All-Union Hydrological Congress ], 1975, vol. 5, pp. 193-204. (in Russian)

Sokolnikov V.M. *Techeniya i vodoobmen v Baikale* [Currents and water exchange in Lake Baikal]. *Elementy gidrometeorologicheskogo rezhima oz. Baikal*. [Elements of the hydrometeorological regime of Lake Baikal]. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1964, pp. 5-21. (in Russian)

Afanasiev A.N., Verbolov V.I. (eds.). *Techeniya v Baikale* [Currents in Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977, 160 p. (in Russian)

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P. et al. *A new bathymetric map of Lake Baikal*. INTAS Project 99-1669.2002. Available at: <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm> (date of access: 12.03.2025).

Wuest A., Ravens T., Granin N. et al. Cold intrusions in Lake Baikal: Direct observational evidence for deep-water renewal. *Limnol. Oceanogr.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 184-196.

Hohmann R., Hofer M., Kipfer R. et al. Distribution of helium and tritium in lake Baikal. *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, no. C6, pp. 12823-12838.

Peeters F., Wuest A., Piepke G. et al. Horizontal mixing in lakes. *J. of Geophysical Res.*, 1996, vol. 101, no. 8, pp. 361-375.

Kipfer R., Peeters F. Some speculations on the possibility of changes in deep-water renewal in Lake Baikal and their consequence. *Lake Baikal*, Elsevier Publ., 2000, pp. 273-280.

Hoomann R., Kipfer R., Peeters F. et al. Processes of deep-water renewal in Lake Baikal. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, vol. 42, no. 5, pp. 841-855.

Sokolnikov V.M. Hidrologische Elemente des Stoff- und Energiewechsels um Baikalsee. *Untern. Wereinigung fur theoret. Und Angew. Limnol. Verhandlungen*, 1972, vol. 18, pt. 2, pp. 563-567.

Verbolov V.I. Currents and water exchange in Lake Baikal. *Water resources*, 1996, vol. 23, no. 4, pp. 381-391.

Shimaraev M.N., Granin N.G., Domysheva V.M. et al. Water exchange between Bed Depressions in Baikal. *Water Resources*, 2003, vol. 30, no. 6, pp. 623-626.

Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M. Deep-water renewal and biological production in lake Baikal. *Nature*, 1991, no. 6311, pp. 665-669.

#### Сведения об авторах

**Синюкович Валерий Николаевич**

кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрофизики,

Лимнологический институт СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-

Баторская, 3

e-mail: sin@lin.irk.ru

**Жданов Андрей Александрович**

кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрофизики

Лимнологический институт СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Улан-Баторская, 3

e-mail: listandy@mail.ru

#### Information about the authors

**Sinyukovich Valery Nikolaevich**

Candidate of Sciences (Geography), Senior Research Scientist, Laboratory of Hydrology and Hydrophysics,

Limnological Institute SB RAS

3, Ulan-Batorskaya st., 664033, Irkutsk,

Russian Federation

e-mail: sin@lin.irk.ru

**Zhdanov Andrey Aleksandrovich**

Candidate of Sciences (Geography), Senior Research Scientist, Laboratory of hydrology and hydrophysics,

Limnological Institute SB RAS

3, Ulan-Batorskaya st., 664033, Irkutsk,

Russian Federation

e-mail: listandy@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.16

Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted May, 13, 2025; approved after reviewing June, 11, 2025; accepted for publication June, 11, 2025