

## ВОДНЫЙ БАЛАНС ОЗЕРА БАЙКАЛ В УСЛОВИЯХ ЗАРЕГУЛИРОВАННОГО РЕЖИМА

© 2011 г. В.Н. Синюкович

*Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск*

**Ключевые слова:** озеро Байкал, водный баланс, зарегулированный режим, приток, сток, осадки на поверхность озера, испарение с водной поверхности, аккумуляция воды, невязка водного баланса.



Рассчитаны составляющие водного баланса оз. Байкал и их изменчивость в период после зарегулирования озера плотиной Иркутской ГЭС (1962—2008 гг.). Полученные оценки характеризуют соотношение прихода и расхода воды в озере в годы с нарушенным водным режимом и отражают произошедшие изменения отдельных элементов. Отмечается необходимость совершенствования расчетных схем основных статей баланса, связанная с наличием устойчивой положительной невязки.

### Введение

Байкал — одно из величайших озер нашей планеты, занимающее первое место по объему пресных вод (23 000 км<sup>3</sup>). Оно издавна имело чрезвычайно важное значение для населения региона, а с включением озера в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (1996 г.) повысился и его международный статус. В связи с этим возросла и актуальность исследований как всего озера и его экосистемы, так и отдельных характеристик водоема, в том числе водных ресурсов и элементов водного баланса.

Строительство Иркутской ГЭС на р. Ангара изменило водный режим Байкала, превратив его в головное водохранилище Ангарского каскада с сезонным и частично многолетним регулированием. Начало нарушения водного режима озера от плотины ГЭС (подпора) приходится на сентябрь 1958 г., а с 1962 г. Иркутское водохранилище и оз. Байкал эксплуатируются уже в режиме нормальных подпорных уровней (НПУ) [1, 2].

Впервые водный баланс озера был составлен Г.Ю. Верещагиным за 1928—1929 гидрологический год в связи с составлением справочника по водным ресурсам СССР. В дальнейшем вопросы расчетов водного баланса Байкала исследовались в работах Б.С. Цейтлина, А.Н. Афанасьева, З.А. Викулиной, Н.Н. Янтер, Т.П. Гронской и Т.Э. Литовой и др. Составление официальных водных балансов озера осуществляет Иркутское межрегиональное управление федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Иркутское УГМС).

Полученные разными авторами (и для разных периодов) оценки составляющих водного баланса озера зачастую существенно различаются, что одновременно служит предметом дискуссий и стимулирует поиски путей совершенствования расчетных схем. Эти обстоятельства, вместе с удлинением рядов натуральных гидрометеорологических данных, совершенствованием технических средств измерений и вычислений, а также происходящими изменениями климата и уровня хозяйственного воздействия на те или иные компоненты окружающей среды, определяют целесообразность периодического пересмотра балансовых оценок.

В работах [3—5], наиболее полно описывающих водный баланс Байкала после зарегулирования, недостаточно отражены особенности формирования и учета элементов прихода-расхода воды, имеются расхождения в их оценках. Кроме того, баланс приводится к створу Иркутской ГЭС (т. е. включает Иркутское водохранилище), требуя дополнительной корректировки. С этих позиций, регулярный анализ точности расчета элементов водного баланса озера, с внесением необходимых уточнений, становится важнейшим фактором оптимизации режима наполнения и сработки водоема, обеспечивающего наиболее эффективное и рациональное использование его водных ресурсов.

#### **Методика и исходный материал**

В настоящей работе оценивается водный баланс озера (без Иркутского водохранилища) за период зарегулированного режима (1962—2008 гг.) с использованием данных Иркутского УГМС и литературных источников. Объем и качество исходной информации обеспечивают приемлемую для основных потребителей (гидроэнергетика, жилищно-коммунальный сектор, водный транспорт и др.) точность полученных результатов и позволяют оценить текущее состояние и происходящие изменения отдельных элементов баланса оз. Байкал, обусловленные русловым регулированием и изменением внешних условий.

Современная гидрометеорологическая изученность озера позволяет представить уравнение его водного баланса в следующем виде:

$$X + Y_p + Y_n + K - U - E = \Delta W,$$

где  $X$  — атмосферные осадки на поверхность озера;

$Y_p$  и  $Y_n$  — приток речных и подземных вод, соответственно;

$K$  — конденсация водяного пара на поверхности озера;

$U$  — поверхностный и подземный сток из озера;

$E$  — испарение с водного зеркала озера;

$\Delta W$  — изменение объема воды в озере за расчетный период.

Рассмотрим отдельные нюансы формирования и определения каждой из воднобалансовых составляющих.

*Речной приток* является основной (80—88 %) компонентой приходной части водного баланса Байкала. Он формируется с площади 540 000 км<sup>2</sup> и учитывается в замыкающих створах наиболее крупных притоков. Две трети притока обеспечиваются за счет трех основных рек — Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин. Изученная площадь, с которой учитывается сток, год от года меняется и в среднем составляет 93 % от всей водосборной территории Байкала. С неизученной части бассейна приток определяется расчетным путем с использованием метода аналогии, локальных зависимостей от физико-географических факторов, разложения полей стока на естественные ортогональные составляющие (ЕОС) и др.

*Атмосферные осадки* на поверхность озера (12—20 % прихода) рассчитываются по результатам фактических наблюдений на береговых и островных станциях. В связи с введением в систему учета осадков поправок на смачивание (с 1966 г.), полученные ранее оценки осадков нуждаются в корректировке. Нами приняты осадки (и испарение) за период 1971—2008 гг. по сведениям Иркутского УГМС, 1962—1970 гг. — откорректированным данным Государственного гидрологического института (ГГИ) [3].

Для подсчета осадков по акватории озера используется система изогет или районные зависимости первых трех векторов разложения их полей, учитывающие условия циркуляции воздуха над Байкалом и орграфические особенности расположения пунктов наблюдений. Площадь водной поверхности в большинстве случаев принимается постоянной и равной 31 500 км<sup>2</sup>, хотя по последним уточнениям она несколько больше — 31 722 км<sup>2</sup> [6].

*Подземный приток* в оз. Байкал в первых исследованиях в связи со слабой изученностью определялся по величине невязки баланса.

В последующем он, в основном, принимается по данным [7] (1,64 км<sup>3</sup>/год, из которых 1,52 — подрусловой сток). Последнее обстоятельство не позволяет напрямую вводить полученную оценку подземного стока в уравнение баланса воды в озере, т. к. подрусловой сток приведен к береговой линии озера, а замыкающие гидрометрические створы на притоках отнесены от нее за пределы предгорных равнин, сложенных рыхлыми отложениями, способствующими переводу поверхностного стока на подземную (подрусловую) составляющую. Очевидно, по этой причине А.Н. Афанасьев [8, 9], приводя более высокие оценки подземного притока в оз. Байкал, не вычленяет его из общего речного или материкового притока.

Сток из озера (73—86 % расходной части баланса) осуществляется через р. Ангару, гидрометрические измерения в ее истоке ведутся с 1899 г. После заполнения Иркутского водохранилища сток из озера учитывается на Иркутской ГЭС.

Подземный отток воды из озера эпизодически рассматривался, но каких-либо определенных результатов в этом направлении получено не было. В работе [10] его величина, например, была принята равной невязке баланса, составляющей 1,17 км<sup>3</sup>/год или 37 мм.

Испарение с акватории озера (14—27 % расхода) рассчитывается по данным наблюдений за температурой воды и воздуха, влажностью воздуха и скоростью ветра. С 1966 г. испарение с водной поверхности рассчитывается по формулам ГГИ и В.А. Рымши — Р.В. Донченко, которые дают более высокие значения в сравнении с применяемой до этого времени формулой Б.Д. Зайкова. Поэтому требуется корректировка данных при анализе испарения за многолетний период.

Конденсация водяного пара на поверхности Байкала имеет место в период со времени вскрытия озера до выравнивания температуры поверхности воды и поверхности суши (август). Роль этой составляющей в водном балансе озера крайне невелика, а в связи с ее недостаточной изученностью в расчетах баланса она учитывается не всегда. В большинстве случаев конденсация включается (с обратным знаком) в испарение и не выделяется отдельной статьей баланса.

В работе [9] предлагалось учитывать почвенную конденсацию паров воды, играющую в некоторых районах бассейна Байкала заметную роль в балансе подземных вод. По нашему мнению, данная составляющая, в конечном итоге, опосредована в приходной части баланса через поверхностный и подземный приток, поэтому ее оценки оправданы при изучении формирования данных составляющих.

Аккумуляция воды в озере оценивается через изменение среднего уровня водоема за расчетное время и площадь его водной поверхности.

С начала XXI в. колебания объема воды в озере значительно уменьшились в связи с изменением предельных уровней водоема, регламентированных постановлением Правительства РФ.

Аккумуляция в ледовом покрове для Байкала обычно не учитывается из-за непродолжительного ледостава (в среднем 4 месяца) и незначительных объемов осевшего на берегах льда вследствие преобладания приглубых берегов на озере и сравнительно низкой (не более 0,6 м) сработки уровня за ледоставный период.

Аккумуляция в подземных водах (береговое регулирование) малозначима и не учитывается по причине невысокой амплитуды колебаний уровня.

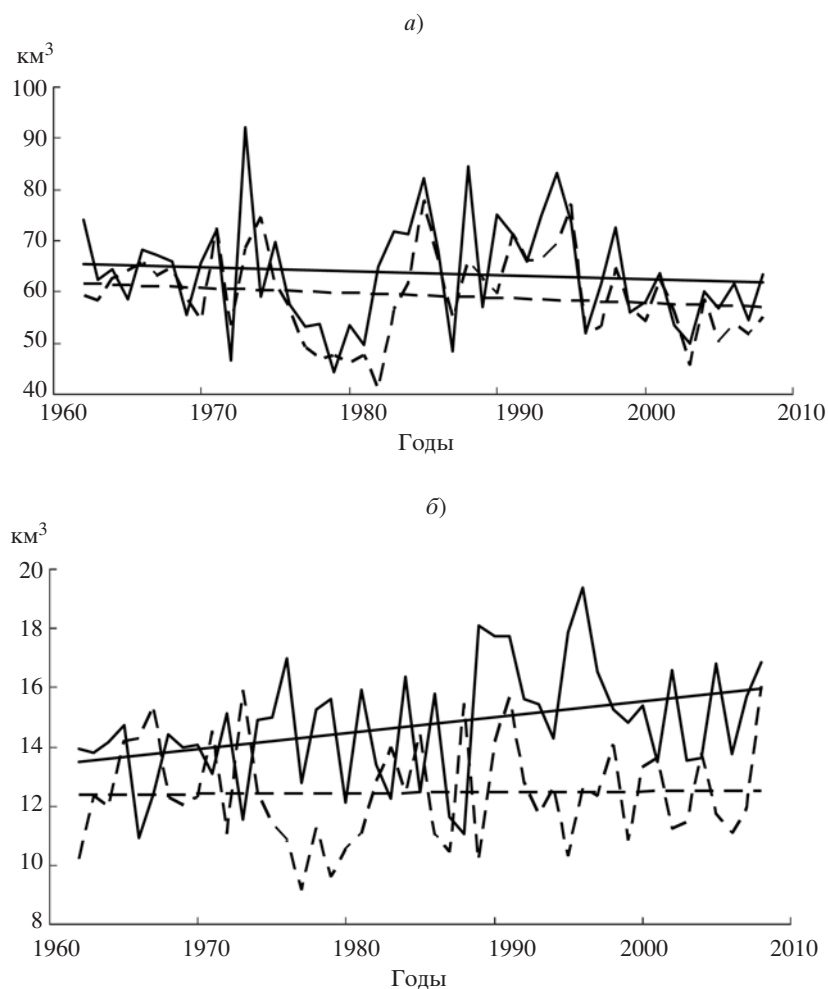
### Результаты и обсуждение

Сначала оценим репрезентативность рассматриваемого расчетного периода (1962—2008 гг.) в отношении его соответствия многолетним условиям тепло- и влагообеспеченности территории. Для этого обратимся к анализу динамики многолетнего хода притока, определяющего элемента водного баланса Байкала, отражающего условия увлажнения его водосборной территории. Как видно из [11], начало используемого нами периода приходится на первые годы внутривекового цикла приточности 1959—1979 гг., а конец — окончание следующего цикла, начавшегося в 1980 г. Таким образом, период 1962—2008 гг. практически включает два полных цикла водности, что позволяет считать оценки средних значений элементов водного баланса Байкала за эти годы достаточно репрезентативными и объективными.

Среднее значение притока за указанный период составило 63,60 км<sup>3</sup>/год (2019 мм), а характеризующий его межгодовую изменчивость коэффициент вариации  $C_v = 0,17$ . Максимальный объем годового притока в эти годы достигал 92,24 км<sup>3</sup> (1973 г.), минимальный — 44,38 (1979 г.). В течение 1962—2008 гг. происходило общее снижение притока со скоростью около 0,08 км<sup>3</sup>/год (рис. 1а), или 3,67 км<sup>3</sup> за весь период. Примечательно, что тренд притока стал отрицательным в результате маловодья на реках бассейна озера, наступившего в середине 1990-х годов.

Сток из озера в рассматриваемые годы изменялся от 40,53 (1982 г.) до 77,43 км<sup>3</sup>/год (1985 г.) при среднем значении 58,90 км<sup>3</sup>/год (1870 мм) и  $C_v = 0,15$ . За расчетные 47 лет сток уменьшился на 4,80 км<sup>3</sup> (0,10 км<sup>3</sup>/год).

Осадки на поверхность озера в период после зарегулирования менялись в диапазоне от 9,17 (1977 г.) до 16,08 км<sup>3</sup>/год (2008 г.) при средней



**Рис. 1.** Динамика элементов водного баланса в исследуемый период:  
а) сплошная линия — приток, пунктирная — сток;  
б) сплошная — испарение, пунктирная — осадки (прямая линия — тренд).

величине  $12,45 \text{ км}^3/\text{год}$  ( $393 \text{ мм}$ ) и  $C_v = 0,14$ . Долговременные тенденции осадков (рис. 1б) практически не выражены — тренд менее  $0,01 \text{ км}^3/\text{год}$  и статистически недостоверен.

Абсолютные значения испарения варьировали в пределах от  $10,92$  (1966 г.) до  $19,38 \text{ км}^3/\text{год}$  (1996 г.) при средней величине  $14,73 \text{ км}^3/\text{год}$  ( $468 \text{ мм}$ ) и  $C_v = 0,13$ . Наиболее значительное повышение испарения приходится на период 1989—2000 гг., в течение которого его величина

оставалась не ниже  $14 \text{ км}^3/\text{год}$ , а среднее значение за эти годы составило 16,5.

В исследуемый период, в отличие от рассмотренных выше составляющих, испарение отличается незначительным ростом с градиентом тренда  $0,054 \text{ км}^3/\text{год}$ , что определяет его общее увеличение за 1962—2008 гг. на  $2,54 \text{ км}^3$ .

В целом, динамика многолетних колебаний стока и осадков соответствует изменениям притока воды в озеро — характеризующий их коэффициент корреляции ( $r$ ) составляет 0,68 и 0,58, соответственно. Межгодовые колебания испарения, наоборот, по отношению к притоку направлены противоположно ( $r = -0,24$ ).

Внутри года значения элементов водного баланса распределены по-разному. Основное поступление воды в озеро приходится на теплое время года, а расходная часть наиболее значима в холодный период (рис. 2, табл.). Приход за май-сентябрь составляет 84 % его годового объема, при этом приток максимален в июне (18 % от годовой величины), а осадки — в июле (21 %). Сток в течение года изменяется незначительно (см. рис. 2), принимая максимальные значения в ноябре-декабре.

Испарение достигает наибольших значений в предледоставный период при наибольшем контрасте температур воды и воздуха — средний

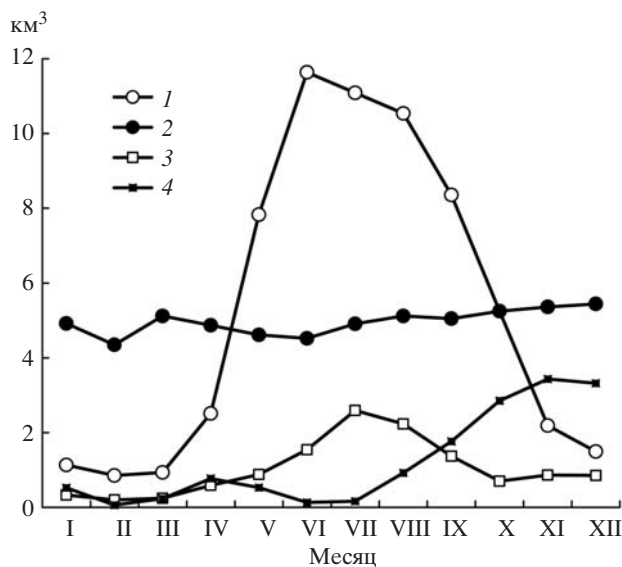


Рис. 2. Внутригодовое распределение элементов водного баланса: 1 — приток; 2 — сток; 3 — осадки; 4 — испарение.

**Таблица.** Средние годовые и месячные значения элементов водного баланса за 1962—2008 гг.  
(числитель — км<sup>3</sup>, знаменатель — мм)

| Годовая<br>сумма | Месяц       |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
|------------------|-------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                  | I           | II    | III   | IV    | V    | VI    | VII   | VIII  | IX   | X     | XI    | XII   |
|                  | Приток      |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
| 63,60            | 1,13        | 0,85  | 0,93  | 2,50  | 7,74 | 11,71 | 11,09 | 10,46 | 8,29 | 5,23  | 2,18  | 1,49  |
| 2019             | 36          | 27    | 30    | 79    | 246  | 372   | 352   | 332   | 263  | 166   | 69    | 47    |
|                  | Осадки      |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
| 12,45            | 0,33        | 0,20  | 0,24  | 0,58  | 0,91 | 1,61  | 2,58  | 2,20  | 1,39 | 0,70  | 0,86  | 0,86  |
| 395              | 10          | 6     | 8     | 19    | 29   | 51    | 82    | 70    | 44   | 22    | 27    | 27    |
|                  | Сток        |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
| 58,90            | 4,88        | 4,32  | 5,08  | 4,82  | 4,54 | 4,46  | 4,82  | 5,08  | 5,02 | 5,18  | 5,31  | 5,39  |
| 1870             | 155         | 138   | 161   | 153   | 144  | 142   | 153   | 161   | 159  | 165   | 169   | 171   |
|                  | Испарение   |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
| 14,73            | 0,55        | 0,06  | 0,23  | 0,77  | 0,52 | 0,12  | 0,17  | 0,94  | 1,77 | 2,85  | 3,42  | 3,33  |
| 468              | 18          | 2     | 7     | 24    | 17   | 4     | 5     | 30    | 56   | 90    | 109   | 106   |
|                  | Аккумуляция |       |       |       |      |       |       |       |      |       |       |       |
| 0,15             | -4,14       | -3,32 | -4,10 | -2,63 | 3,48 | 7,99  | 7,87  | 6,19  | 2,15 | -2,02 | -5,48 | -5,84 |
| 5                | -132        | -106  | -130  | -83   | 111  | 254   | 250   | 196   | 68   | -64   | -174  | -185  |



слой испарившейся влаги в ноябре составляет 109 мм или 23 % годовой величины испарения. За три предледоставных месяца (октябрь-декабрь) этот показатель составляет 65 %.

Аккумуляция изменяется в соответствии с меняющимся соотношением прихода-расхода воды. В период с октября по апрель, когда сток выше притока, аккумуляция отрицательна, т. е. происходит сработка уровня озера, в среднем достигающая в декабре 186 мм. В остальное время года идет накопление воды, с максимальными приращениями уровня в июне-июле по 250 мм.

Сумма приходных статей баланса за рассматриваемый период (табл.) получилась больше расходных, т. е. имеет место положительная невязка. С учетом аккумуляции (0,15 км<sup>3</sup>/год или 5 мм) невязка баланса в среднем составила 2,27 км<sup>3</sup>/год (72 мм), или около 107 км<sup>3</sup> за 47 лет. По мнению авторов работ [1, 4] невязка обусловлена недостаточной точностью учета стока, который должен быть скорректирован на ее величину. По другим данным [3, 5] сток через Иркутский гидроузел измеряется надежнее притока, поэтому корректировать надлежит последний. Именно по этой причине, при практически совпадающих оценках осадков и испарения, приток и сток у этих авторов существенно различаются.

В связи с тем, что в настоящих расчетах баланс сознательно не уравнивается, полученные нами данные по притоку получились близкими к результатам [4], а по стоку — к оценкам [3].

Для оценки произошедших за годы эксплуатации Иркутского водохранилища в условиях НПУ изменений отдельных статей баланса озера сравним полученные результаты с аналогичными данными для периода естественного водного режима [9]. В целом, средние значения прихода и расхода за 1962—2008 гг. оказалось несколько выше, чем в бытовых условиях. Так, приток увеличился на 10,6 % как вследствие более полного учета, так и происходящих вариаций климата.

Сток из озера изменился несущественно (снижение на 2,5 %), что, с одной стороны, связано с затратами воды на наполнение полезного объема Байкала, а с другой, с занижением стока через Иркутский гидроузел, т. к. даже при достаточной точности учета стока на ГЭС неучтенными остаются обходная фильтрация и фильтрация через плотину. Основные же изменения стока коснулись его внутригодового распределения, которое раньше соответствовало изменениям притока, а теперь существенно выровнялось.

Более высокие осадки после зарегулирования, в первую очередь, обусловлены усовершенствованием методов их измерений (введением поправок к показаниям осадкомеров с 1966 г.). Увеличение же испа-

рения на 42 % определяется как переходом на новые расчетные формулы, так и более теплым климатом в годы после зарегулирования озера.

### **Заключение**

Рассчитанные составляющие водного баланса Байкала за 1962—2008 гг. отражают гидрометеорологические условия в бассейне озера в период после создания Иркутского водохранилища и являются достаточно репрезентативными оценками.

В исследуемые годы динамика притока, стока и осадков характеризуется незначительными отрицательными трендами, тогда как испарение, наоборот, повышается. Во внутригодовом ходе элементов баланса произошло существенное перераспределение стока воды из озера, заключающееся в его выравнивании и смещении максимальных расходов воды на зимние месяцы.

В сравнении с периодом естественного режима отмечается некоторое увеличение ежегодного кругооборота воды, вызванное не только колебаниями климата, но и изменениями техники расчета отдельных статей, обусловившими, в частности, более высокие значения осадков и испарения.

В период зарегулированного режима водный баланс озера характеризуется систематическим преобладанием его приходной части над расходной (суммарное превышение за рассматриваемый период  $107 \text{ км}^3$ ), указывая на недостаточную точность учета основных статей — притока и стока. Наличие положительной невязки не позволяет также включить в приходную часть баланса подземный приток в озеро и требует проведения натурной тарировки стока воды через Иркутский гидроузел.

Следует отметить, что в совершенствовании нуждаются методы определения и других элементов баланса. Так, точность учета притока снизилась из-за сокращения числа пунктов наблюдений и их технического оснащения, а стандарты расчетов тепло- и влагооборота в котловине разработаны для равнинных водоемов Европейской части России.

Указанные нюансы, вместе с колебаниями климата и хозяйственным воздействием на окружающую среду, определяют неоднозначность оценок воднобалансовых составляющих оз. Байкал и обуславливают необходимость их периодического пересмотра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Иркутское водохранилище. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 140 с.
2. Синюкович В.Н. Реконструкция естественного уровня озера Байкал после строительства Иркутской ГЭС // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 70—76.
3. 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.
4. Янтер Н.Н. Водный баланс оз. Байкал в период зарегулированного режима // Труды V всесоюз. гидрол. съезда. Т. 8. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 161—169.
5. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
6. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., М. Де Батист, Хус Р., Каналье М., Касамор Х.Л. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // ДАН. 2006. Т. 408. № 1. С. 102—107.
7. Писарский Б.И. Региональные закономерности формирования подземного стока в Прибайкалье (вторая половина XX века) // Водные ресурсы Байкальского региона: Проблемы формирования и использования на рубеже тысячелетий. Т. 1. Иркутск. 1998. С. 42—43.
8. Афанасьев А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: Наука, 1967. 231 с.
9. Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1976. 239 с.
10. Цейтлин Б.С. Водный баланс оз. Байкал // Труды III всесоюз. гидрол. съезда. Т. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1959. С. 184—192.
11. Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии // Метеорология и гидрология. 2002. № 3. С. 71—78.

**Сведения об авторе:**

Синюкович Валерий Николаевич, к. г. н., старший научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, Уланбаторская, 3; e-mail: sin@lin.irk.ru