

ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 551.583 (551.57 (282.256.341))

В. Н. СИНЮКОВИЧ*, **Л. Н. СИЗОВА***, **М. Н. ШИМАРАЕВ***, **Н. Н. КУРБАТОВА****

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

**Иркутский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИТОКА ВОДЫ В ОЗЕРО БАЙКАЛ

Рассматриваются изменения притока воды в Байкал, происходящие в связи с глобальным потеплением, усилившимся с начала 1970-х гг., а также с разной реакцией стока отдельных рек бассейна Байкала на изменения климата.

Ключевые слова: приток, речной сток, потепление, колебания климата, осадки.

We examine the changes in water inflow into Baikal that are taking place due to global warming that enhanced beginning in the 1970s as well as due to the different responses of discharges of separate rivers within the Baikal watershed basin to climate change.

Keywords: inflow, streamflow, warming, climate fluctuations, precipitation.

ВВЕДЕНИЕ

Межгодовые и сезонные изменения притока воды в оз. Байкал определяют условия функционирования экосистемы озера и стратегию управления его водными ресурсами. Глобальное потепление, усилившееся с начала 1970-х гг., заметно повлияло на гидрологические процессы на Байкале, в том числе и на сток рек в его бассейне [1–3]. В результате происходящих колебаний стока байкальских рек, по-разному реагирующих на изменяющиеся климатические условия, в колебаниях суммарного поверхностного притока воды в оз. Байкал также отмечается нарушение установленных ранее закономерностей.

По основным климатическим сценариям происходящего потепления [4–6] увлажненность в регионе Сибири с ростом температуры воздуха должна возрасти. Тем не менее для территории Байкальского региона в начальный период потепления (1976–1981 гг.) почти повсеместно имело место аномальное снижение речного стока, сменившееся повышением водности рек, продолжавшимся до середины 1990-х гг. В последующий период приточность в озеро вновь стала пониженной, в основном из-за значительного уменьшения водности главного притока Байкала — Селенги, в то время как сток некоторых других рек, в частности Верх. Ангары, оставался повышенным.

Такая неоднозначность формирования притока указывает на определенную перестройку стокоформирующих процессов в байкальском бассейне и требует более детального исследования современных изменений приточности в озеро и оценки степени их трансформации в условиях нестабильности климата. Исследование этих вопросов и является целью настоящей статьи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Особенности колебаний притока воды в оз. Байкал оценивались относительно периода с наиболее выраженными темпами глобального потепления, наблюдаемыми в регионе с 1971 г. Для этого с использованием стандартных статистических процедур определялись различные показатели внутрирядной изменчивости исходных данных. С учетом выявления общих закономерностей и объективности сопоставления разных показателей пространственно-временной изменчивости притока и стока рек

последние приводились к единому расчетному периоду. При вычислении показателей серийности и переходных вероятностей исходные выборки представлялись двумя состояниями (повышенным и пониженным) относительно медианного значения. Для сопоставимости разномасштабных колебаний различных показателей исходные данные представлялись в виде модульных коэффициентов (k), т. е. нормировались по соответствующим средним значениям характеристик за расчетный период.

Материалами для исследования послужили данные многолетних наблюдений Росгидромета за притоком воды в оз. Байкал, а также за стоком воды в замыкающих створах основных байкальских рек — Селенги, Верх. Ангары и Баргузина. Продолжительность наблюдений за стоком этих рек составляет 70–76 лет, а ряд годовых значений притока насчитывает 110 лет (до начала гидрометрических измерений на байкальских реках приток в озеро восстанавливался по стоку р. Ангары, вытекающей из озера). Наряду со среднегодовыми использовались сезонные значения суммарного притока и стока отдельных рек.

При анализе исходных данных по притоку и стоку рек возникает вопрос оценки достоверности их изменений, которая зависит от погрешности определения водности рек. Для объективной интерпретации получаемых результатов следует оценить масштабы тех отклонений приточности, которые могут быть обусловлены ошибками ее измерения и расчета. Учитывая, что точность исходных данных по притоку зависит от того, насколько полно бассейн озера охвачен измерениями стока рек и их погрешности, качество используемой информации в последние 20 лет вызывает определенные сомнения в связи с сокращением числа пунктов учета стока и низким уровнем их технического оснащения. Как известно, приток поверхностных вод в оз. Байкал формируется на площади в 540 тыс. км², из которых 490 тыс. км² приходится на бассейны трех главных притоков — Селенги, Верх. Ангары и Баргузина. Всего по гидрометрическим измерениям приток подсчитывается по 28 рекам с общей площадью 505 тыс. км², или около 94 % водосборной территории озера. С неизученной площади, включающей междуречные пространства водотоков, охваченных гидрометрическими измерениями, и нижние части бассейнов изученных рек (ниже замыкающих створов), сток рассчитывается методом аналогии. В общей сложности на неизученной территории методом аналогии сток определяется по 42 участкам, из которых 20 приходятся на междуречья.

Исходя из незначительной доли неизученной площади бассейна Байкала, можно считать, что точность расчета притока поверхностных вод в озеро соответствует точности оценки стока рек, охваченных гидрометрическими наблюдениями, и по стандарту [7] находится на уровне 6–10 %. Тогда при значениях годового притока, близких к средним, погрешностями расчетов могут быть вызваны отклонения от средних значений до 6 км³. Несмотря на столь внушительную величину, данная ошибка составляет только 0,6 среднеквадратического отклонения (σ) приточности, а кроме того, при исследовании вопросов многолетней изменчивости стока (при неизменности способов измерений и расчета) она становится систематической и мало искажает относительный характер колебаний. При использовании осредненных данных (сезон, год) погрешность их определения снижается более чем в два раза и даже для рек с неустойчивым руслом при нормативной частоте измерений расходов воды составляет 4 % [8]. Следовательно, используемые данные по притоку воды в озеро и стоку отдельных рек представляются достаточно достоверными, и значимые изменения характера их колебаний не могут быть следствием недостаточной точности исходных данных.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИТОКА

Анализ динамики притока в оз. Байкал с начала XX в. показывает, что его изменения происходят волнообразно (циклично), с периодом 20–30 лет (рис. 1). В целом заметно, что колебания притока имеют определенную асинхронность по отношению к колебаниям температуры воздуха в теплое время года (май–сентябрь), что вполне логично, так как в этот период в регионе выпадает около 80 % годового количества осадков.

Наличие циклов позволяет более корректно выбрать расчетный период для определения среднемноголетних показателей притока и стока главных рек бассейна, который должен включать не менее двух полных циклов водности.

С учетом времени начала гидрометрических наблюдений на основных притоках Байкала (1933–1939 гг.) такой период — с 1959 по 2010 г.¹ За это время среднее значение притока воды в оз. Байкал

¹ Последний цикл должен был закончиться приблизительно в 2007–2008 гг., однако низкая водность двух последующих лет указывает на его продолжение или на растянутый переход к следующему циклу.

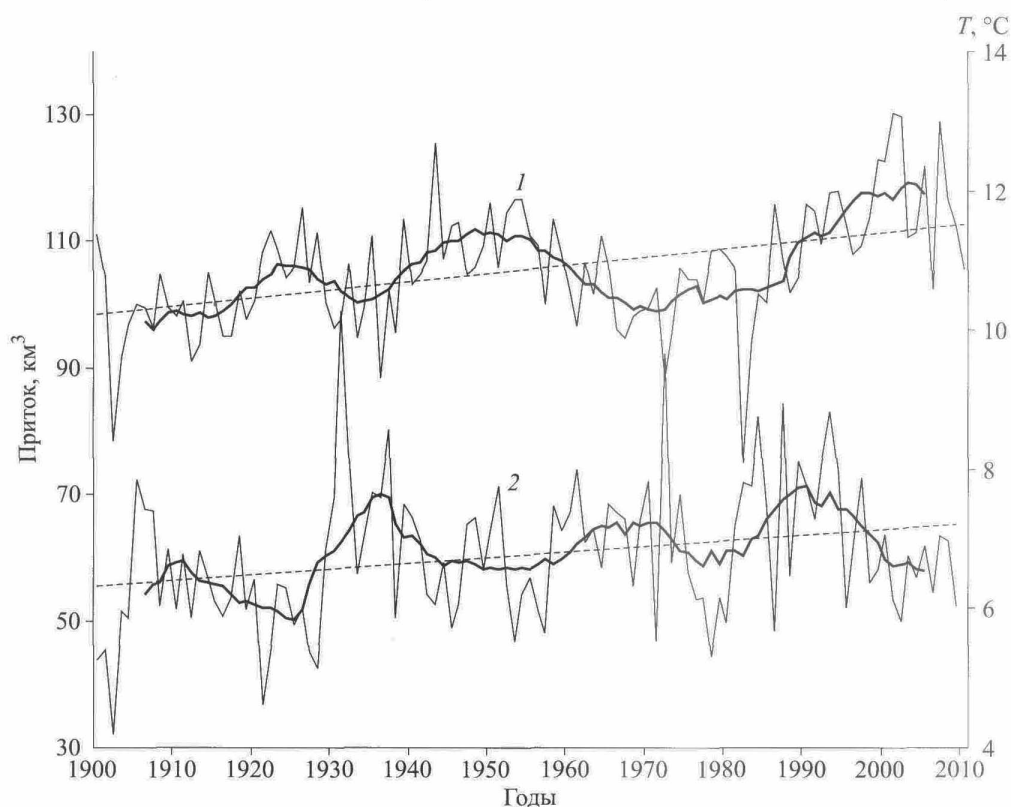


Рис. 1. Колебания годовых величин притока в озеро (1) и средней температуры воздуха (2) за май–сентябрь по данным м/ст. г. Бабушкин в период 1901–2010 гг.

Приведены текущие значения и скользящие 11-летние средние. Штриховая линия — тренд.

составило $63,5 \text{ км}^3/\text{год}$, а его среднеквадратическое отклонение — $10,2 \text{ км}^3/\text{год}$. В целом за указанные годы приток снижался со скоростью около $0,1 \text{ км}^3/\text{год}$. Относительно расчетного периода величина притока за время потепления (1971–2010 гг.) была ниже в среднем на $0,4 \text{ км}^3/\text{год}$, однако в сравнении с предшествующим периодом (1901–1970 гг.) произошел ее рост на $4,4 \text{ км}^3/\text{год}$. Несмотря на это, после 1971 г. для притока были характерны и многоводные, и маловодные периоды (рис. 2). Так, в 1976–1981 гг. приточность была на 18 % ниже средней, а в 1982–1995 гг., наоборот, на 11 % выше.

В период 1996–2010 гг. приток в озеро вновь снизился (в среднем на 8 %), при этом особенно сильно уменьшился сток главного притока, Селенги (на 23 %). В связи с этим следует отметить, что согласованность колебаний стока трех главных рек байкальского бассейна в годы потепления стала ухудшаться. Особенно явная асинхронность стока наблюдается для Селенги и Верх. Ангары. Если до потепления коэффициент корреляции (r) их водности составлял 0,26, то в последующий период он стал отрицательным (–0,15). Менее согласованными также стали изменения стока Верх. Ангары и Баргузина: до 1971 г. связь между ними по коэффициенту корреляции составляла 0,68, а в период с начала 1970-х гг. снизилась до 0,42–0,44. Примечательно, что в 1971–1995 гг. водность Баргузина была более тесно связана со стоком Селенги, чем со стоком Верх. Ангары.

Изменение во времени связи стока разных рек дает основание считать, что в условиях потепления колебания приточности в оз. Байкал по-новому реагируют на вариации климата, и не только вследствие их масштабности, но и, вероятно, за счет участия иных факторов. Среди других видимых признаков изменений характера колебаний притока в период потепления можно выделить снижение их инерционности и увеличение стока с бассейна в зимнее время.

Присущая притоку в оз. Байкал высокая инерционность не только его внутригодовых, но и многолетних колебаний неоднократно подчеркивалась разными исследователями. Неслучайный характер межгодовой изменчивости притока наглядно подтверждают расчеты некоторых его внутрирядных

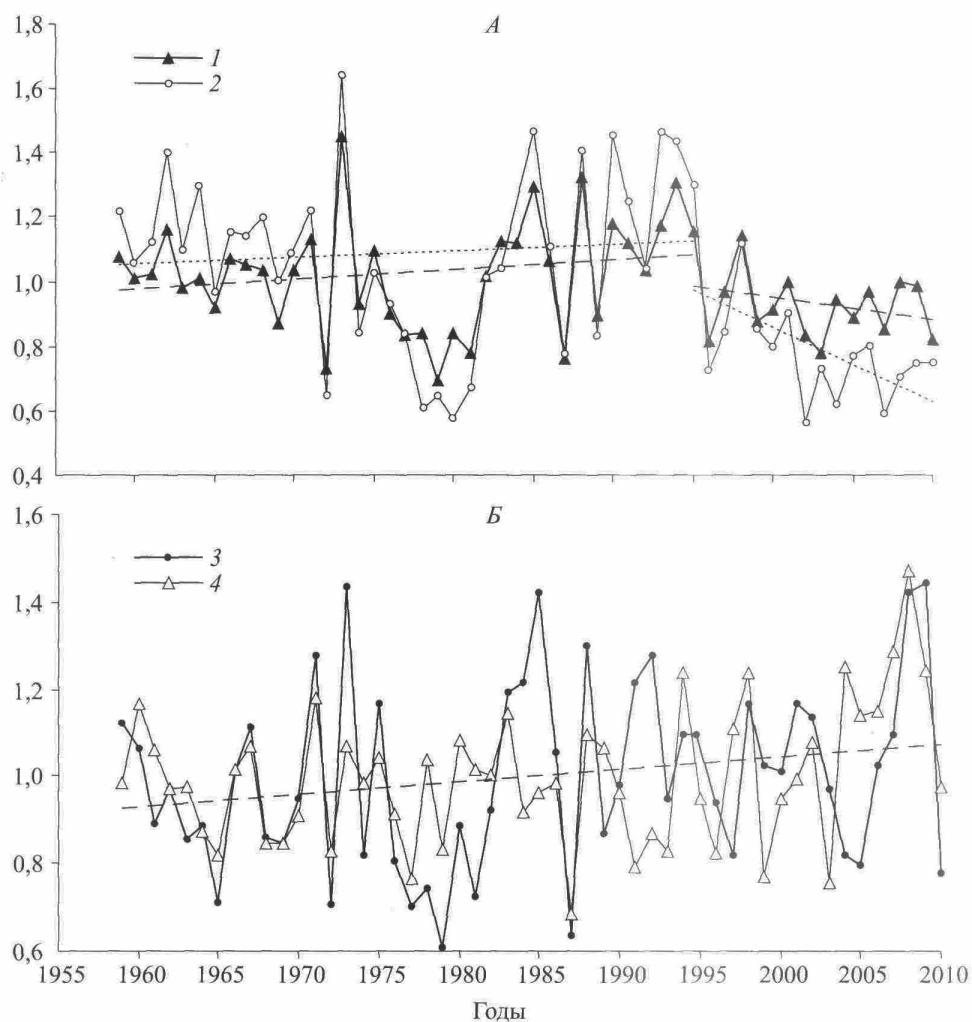


Рис. 2. Колебания стока воды в оз. Байкал.

А — суммарный сток рек (1) и сток Селенги (2); Б — сток Верх. Ангары (3) и сток Баргузина (4). Значения показателей выражены в модульных коэффициентах.

параметров за разные периоды и их сопоставление с соответствующими показателями случайных выборок аналогичной длины (см. таблицу). Так, согласно критерию серийности [9], в рассматриваемом ряду величин приточности за 1901–2010 гг., в котором исходные значения выражены двумя состояниями относительно медианного значения, насчитывается 45 серий, тогда как в реализации независимых величин из 110 членов общее число всех серий изменяется от 46 до 64.

Аналогичные различия в продолжительности средних и максимальных по длительности серий, наличие существенно положительной автокорреляции, а также вероятности смены высокой и низкой приточности в смежные годы свидетельствуют с 95%-й доверительной вероятностью о том, что тенденция группирования элементов в ряду притока выходит за пределы чисто случайного происхождения.

При раздельном рассмотрении периодов до и после 1970-х гг. видно, что в первом из них значения соответствующих показателей еще больше отличались от случайных, а во втором произошло явное снижение степени инерционности колебаний притока. Наиболее заметно снизились коэффициенты корреляции притока в смежные годы (с 0,45 до 0,04) и особенно в последние: для периода 1996–2010 гг. соответствующий коэффициент получился отрицательным. Средняя длительность серий высокой и низкой приточности в период потепления уменьшилась на 0,7 года (24 %) и вместе с пе-

Внутрирядные параметры притока (числитель) и случайных реализаций (знаменатель*)

Параметры	Период, годы	
	1901–1970	1971–2010
Среднее значение, км ³ /год	59,1	63,1
Общее число серий	24	18
	29 – 42	15 – 26
Наибольшая серия, лет	10	6
	9	8
Средняя длина серий, лет	2,92	2,22
	1,67 – 2,41	1,54 – 2,67
Первый коэффициент автокорреляции	0,45	0,04
	-0,24 ÷ 0,24	-0,31 ÷ 0,31
Второй коэффициент автокорреляции	0,26	0,29
	-0,24 ÷ 0,24	-0,31 ÷ 0,31
Вероятность смены года:		
многоводного многоводным	0,68	0,55
	0,42 – 0,58	0,39 – 0,61
многоводного маловодным	0,32	0,45
	0,42 – 0,58	0,39 – 0,61
маловодного маловодным	0,66	0,58
	0,42 – 0,58	0,39 – 0,61
маловодного многоводным	0,34	0,42
	0,42 – 0,58	0,39 – 0,61

* С 95%-й доверительной вероятностью.

реходными вероятностями лет с повышенным и пониженным притоком теперь уже не выходит из диапазона случайных значений.

Помимо межгодовой изменчивости притока воды в оз. Байкал, последние колебания климата нашли отражение и в его внутригодовом распределении. По определению [10], в Сибири и на сопредельных территориях оно в основном связано сезонно-мерзлотному регулированию стока, заключающемуся в росте аккумулирующе-регулирующей способности водосборов с ростом мощности летнего талого слоя в зоне распространения многолетней мерзлоты при повышении температуры воздуха. При этом вытаивание льда в деградирующих многолетнемерзлых породах также ведет к повышению запасов подземных вод и речного стока. В отсутствие многолетней мерзлоты повышение температуры воздуха в любом случае означает более благоприятные условия разгрузки подземных вод в речные системы, и вопрос повышения зимнего стока определяется только запасами воды в подземных бассейнах. Кроме того, отмеченная тенденция может быть и следствием более раннего начала весеннего снеготаяния в результате общего смягчения климатических условий в зимний период.

Анализ среднемеженного (ноябрь–март) стока Селенги показывает, что с начала 1970-х гг. ее зимние расходы воды в среднем стали на 20 м³/с (13 %) выше. Рост зимней водности Селенги наблюдается с 1935 г. (скорость 5,2 м³/с за 10 лет), однако с 1996 г. зимний расход воды заметно сократился в связи со снижением влагонасыщения деятельного слоя и запасов подземных вод из-за общего уменьшения увлажнения в селенгинском бассейне и водности в теплое время года.

Среднемеженный сток Верх. Ангары за период потепления также увеличился — приблизительно на 6,3 м³/с (8,1 %), но в отличие от Селенги особенно высокие его значения имели место в 2005–2010 гг. Еще более заметным при потеплении было увеличение зимнего стока Баргузина — 7,7 м³/с (20,6 %), причем наиболее высоким сток был именно в 1996–2010 гг. В соответствии с указанными изменениями стока главных рек байкальского бассейна суммарный меженный приток в озеро с 1970 г. также увеличился на ~10 %, однако после 1995 г. он стал пониженным в связи с уменьшением водности Селенги.

Несомненный интерес представляют попытки диагностирования отмеченных нюансов современной изменчивости притока с позиций ее обусловленности основными стокоформирующими характеристиками климата, которыми являются атмосферные осадки и температура воздуха. Данные о температурных условиях в регионе с 1971 г. свидетельствуют о том, что в маловодье 1976–1981 гг. каких-либо заметных аномалий температуры в регионе не отмечалось, кроме некоторого ее понижения в летнее время в 1966–1985 гг. В период последнего маловодья (с 1996 г.), наоборот, заметным было понижение зимних и весенних значений температуры, однако рост годовой температуры воздуха в регионе остановился. Несмотря на разные особенности температурного режима, и в первом и во втором случае маловодья приходилось на периоды снижения интенсивности процессов зонального переноса воздушных масс [11]. При этом заметно, что в течение первого из маловодных периодов ослабление активности зональной циркуляции сопровождалось снижением количества выпадающих атмосферных осадков практически на всей байкальской водосборной территории, а во время второго — низкая увлажненность в одних районах (бассейн Селенги) компенсировалась ее ростом в других. В результате сток некоторых байкальских рек (в первую очередь Верх. Ангары и Баргузина) увеличился и снижение притока в озеро оказалось не столь существенным, как в 1976–1981 гг.

Публикуемые в ежегодных обзорах особенностей климата на территории РФ сведения о многолетних колебаниях осадков указывают на то, что с начала 1970-х гг. они также отличались заметной разнонаправленностью по территории бассейна. Общей тенденцией изменения годовых сумм осадков в котловине Байкала и бассейнах Баргузина и Верх. Ангары в период потепления является наличие небольшого положительного тренда, что характерно и для всех регионов Сибири [12]. Что касается территории бассейна Селенги, то (судя по данным указанного источника) для нее лишь косвенно можно говорить о слабом положительном тренде осадков, который характерен для Предбайкалья и Забайкалья в целом. Вместе с тем фактические данные метеостанций по осадкам указывают на то, что 1996–2010 гг., по крайней мере в бассейне, были засушливыми. Кроме того, в более ранних обзорах [13] для Байкальского региона отмечалась специфическая реакция увлажнения на потепление с начала 1970-х гг., состоящая в постоянном снижении осадков со средней интенсивностью 7 мм/100 лет. Анализ опубликованных [1, 11, 14, 15] и фактических данных говорит о разнонаправленных трендах осадков в селенгинском бассейне, но в целом на российской его части имеет место их незначительное снижение в период 1996–2010 гг.

В то же время если снижение осадков в бассейне Селенги с 1996 г. было незначительным, то оно не может объяснить столь существенного уменьшения стока реки (23 %) и предполагает участие других факторов. Поскольку более 80 % бассейна Селенги относится к очень сухим, сухим и умеренно влажным территориям [15], т. е. отмечается дефицит влаги, то во время потепления этот дефицит должен только увеличиваться из-за роста потерь влаги на испарение. Повышение доли испарившихся осадков, таким образом, способствует дополнительному снижению стока Селенги с повышением температуры воздуха. Для количественной оценки роста потерь влаги на испарение требуется постановка специальных исследований в разных частях бассейна Байкала, в том числе и на территории Монголии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате глобального потепления климата с начала 1970-х гг. приток в оз. Байкал в целом несколько увеличился, однако в начальный период повышения температур воздуха (1976–1981 гг.) и в 1996–2010 гг. (с прекращением роста температуры в регионе) отмечено снижение поступления воды в озеро из его бассейна. При этом в пределах байкальской водосборной территории усилилась асинхронность колебаний стока рек, обуславливающая формирование разнонаправленных долговременных тенденций водности. Произошедшее снижение пространственной согласованности колебаний стока рек является одной из причин снижения общей амплитуды колебаний притока на фоне учащения менее значимых отклонений. Изменение характера межгодовых колебаний притока находит отражение в изменении параметров его внутрирядной изменчивости, свидетельствующих об ослаблении многолетней инерционности суммарного стока с байкальского бассейна. За счет смягчения климатических условий зимняя приточность в озеро и межлетний зимний сток основных байкальских рек также выросли, однако с 1996 г. приток в озеро, в соответствии с уменьшением стока Селенги, стал пониженным и остается низким до настоящего времени. Именно с 1996 г. изменения притока становятся особенно нестабильными вследствие изменившихся условий атмосферной циркуляции, главным образом из-за падения активности ее зональной составляющей. Снижение годово-

го и межленного притока в озеро чревато не только обострением дефицита водных ресурсов и водоохозяйственной обстановки в регионе, но и негативным воздействием на функционирование отдельных звеньев байкальской экосистемы из-за снижения поступления в озеро растворенных веществ и в первую очередь биогенных элементов. Эти обстоятельства определяют необходимость дальнейших исследований характера межгодовых колебаний притока воды в оз. Байкал и стока отдельных рек его бассейна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12-05-31268 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синокович В. Н., Цехановский В. В. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // Докл. РАН. — 2002. — Т. 383, № 3. — С. 397–400.
2. Латышева И. В., Синокович В. Н., Чумакова Е. В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал // Изв. Иркут. ун-та (Науки о земле). — 2009. — № 2. — С. 117–133.
3. Сизова Л. Н., Шимараев М. Н. Циркуляция атмосферы и современные тенденции изменения речного притока озера Байкал // Природоохранное сотрудничество в трансграничных экологических регионах: Россия–Китай–Монголия: Материалы конф. — Чита: Поиск, 2012. — Вып. 3, ч. 2. — С. 135–139.
4. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. — UNEP. — 2001. — http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/
5. Израэль Ю. А., Груза Г. В. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. — 2001. — № 5. — С. 5–21.
6. Кабанов М. В., Лыкосов В. Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 19, № 9. — С. 753–764.
7. Методические указания МИ 1759–87. Расходы воды на реках и каналах. Госстандарт СССР. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 25 с.
8. Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Методы оценки погрешностей гидрометрического учета речного стока // Метеорология и гидрология. — 2001. — № 6. — С. 96–106.
9. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 424 с.
10. Джамалов Р. Г., Потехина Е. В. Природно-климатические и антропогенные причины изменения подземного стока бассейна Лены. — Георазрез. — <http://georazrez.uni-dubna.ru>
11. Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 3. — С. 62–68.
12. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. — М.: Росгидромет, 2011. — 66 с.
13. Бюллетень изменения климата. Обзор состояния и тенденций изменения климата России 1998 г. — М.: Изд. ИГКЭ, 1999. — <http://climatechange.igce.ru>
14. Синокович В. Н., Старыгина Л. Н., Шимараев М. Н., Курбатова Н. Н. О климатических причинах современных изменений поверхностного притока в оз. Байкал // Экологический риск и экологическая безопасность. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012. — С. 126–128.
15. Бирюкова Е. В. Ландшафтно-экологический анализ трансграничных геосистем Байкальского региона (Селенгинский район): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 2001. — 18 с.

Поступила в редакцию 21 мая 2013 г.