

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА РЕЧНОЙ СТОК В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ) // МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ. – 2013. – № 7. – С. 95-102.

Введение

В последние десятилетия отмечается потепление климата, которое проявляется как в глобальном масштабе, так и на всей территории России [6]. Повышение приземной температуры воздуха происходит также и в Забайкалье. Наибольшее ее увеличение, превышающее 3,5–4,0 °С за полувековой период, приходится на февраль и март [4]. Поскольку более сильное потепление произошло в зимний период, оно не могло не сказаться на гидрологическом режиме рек в этот период. Исходя из общих представлений о зимнем режиме рек и результатов, полученных некоторыми исследователями [1, 2], величина стока во время ледостава в основном зависит от предшествующего увлажнения водосборов, величины промерзания грунтов на водосборе и толщины льда. В указанных исследованиях отмечается увеличение зимнего стока, однако выводы о причинах не совпадают. В работе [2] сделан вывод, что основным фактором увеличения зимнего стока является изменение условий промерзания на водосборе, а в [1] – толщина льда.

В связи с этим целью данного исследования стало выявление многолетних изменений в зимнем речном стоке в условиях продолжительного ледостава, промерзания рек до дна, глубокого промерзания грунтов, наличия многолетней мерзлоты, которым отвечает территория Забайкалья. Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

- дать оценку многолетним изменениям температуры воздуха и почвы;
- выявить основные тенденции в изменениях толщины льда;
- выявить характер и тенденции изменений зимнего стока;
- оценить зависимость зимнего стока от предшествующего увлажнения и ледового режима рек;
- оценить предстоящие изменения зимнего стока в условиях меняющегося климата.

Материалы и методы исследования

Анализ выполнялся по данным государственной наблюдательной сети Росгидромета за период 1957/1958 – 2006/2007 гг. о средних месячных расходах воды, толщине льда, датах начала и окончания ледостава в 79 створах, расположенных на 56 реках Забайкалья, протекающих в пределах Забайкальского края и Республики Бурятии и относящихся к бассейнам рек Амура, Енисея и Лены. В работе использованы также данные 48 метеорологических станций о средних месячных температурах воздуха и 1 станции о температуре почвы на глубине до 3,2 м.

В исследовании использованы методы статистического анализа. Тенденции выявлялись методом наименьших квадратов. Для выявления циклов во временных рядах применялись разностные интегральные кривые, которые строились путем последовательного суммирования отклонений модульных коэффициентов от середины $\sum(K-1)$, где $K = x_i/x_{\text{ср}}$. С целью оценки тесноты связи между анализируемыми рядами использовался корреляционный анализ. Достоверность коэффициентов корреляции и значений трендов оценивалась с помощью критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости.

Результаты исследования и обсуждение

Величина стока в зимний период (ноябрь-март) большинства рек Забайкалья, как показано в работе авторов [5], составляет незначительную часть годового объема. Это связано в первую очередь с их промерзанием до дна. В бассейне Лены, за исключением р. Чары, все реки промерзают, и их сток в этот период не превышает 1 % годового объема. На не перемерзающих реках Амурского бассейна доля зимнего стока в среднем равна 3–5 %, а на перемерзающих – менее 1 %. При этом не перемерзают только самые крупные реки бассейна – Шилка, Аргунь, Ингода, Онон. Доля зимнего стока рек бассейна Енисея существенно больше, чем рек других бассейнов в Забайкалье. На этих реках, особенно притоках оз. Байкал доля зимнего стока в

годовом объеме составляет от 12 до 18 %. Лишь на отдельных реках сток в период ледостава менее 5 %.

Температура воздуха в зимний период за 50 лет увеличилась в среднем по территории Забайкалья на 1,8 °С. В ее изменениях отмечается неравномерность. С 1957/1958 по 1987/1988 гг. колебания температуры происходили в диапазоне $-13 \div -18$ °С при среднем значении $-14,9$ °С. Затем произошло резкое ее повышение, и следующее десятилетие характеризовалось высоким фоном температур. Их значения не опускались ниже -14 °С, а среднее за период составило $-13,2$ °С. В последующий 10-летний период (1998/1999 $\div$ 2007/2008 гг.) средняя температура понизилась до $-13,9$ °С. Несмотря на некоторое снижение, фон температур остается достаточно высоким. За исключением зимнего сезона 2000/2001 гг., средняя температура воздуха холодного периода не понижалась ниже $-14,5$ °С.

В последние десятилетия также произошло повышение температуры почвы. Так, по данным метеостанции Чита температура в трехметровом слое почвы повысилась за 33 года примерно на 1 °С. При этом ее переход через 0 °С стал происходить в среднем на 5 дней позднее. Учитывая высокую пространственную согласованность многолетних изменений температуры воздуха и значимую ее связь с температурой почвы, характеризуемой коэффициентом корреляции, превышающим 0,5, можно предположить, что повышение температуры почвы произошло на всей территории Забайкалья. Как повышение температуры почвы, так и смещение дат ее перехода через 0 °С на более поздние сроки обуславливает увеличение длительности нахождения грунтовых вод в жидком состоянии и поступления их в реки.

Для оценки многолетних изменений толщины льда не представилось возможности использовать данные по всем створам в связи промерзанием большинства рек до дна. Кроме того, на отдельных реках образуется значительный по мощности многослойный ледяной покров, обусловленный наледями. Ряды таких рек из анализа исключались ввиду их

нерепрезентативности, и в результате исследование изменений толщины льда выполнено по 23 створам.

Продолжительность ледостава на реках Забайкалья за многолетний период изменяется в широких пределах: от 125-135 в юго-западной его части до 220-230 дней на северо-востоке. Максимальная толщина льда, которая достигается, как правило, в марте, составляет в среднем за многолетний период от 70 до 150 см. Ее значения, не превышающие 100 см, характерны для рек бассейна Енисея, впадающих в оз. Байкал. В двух других бассейнах она обычно превышает эту величину. На некоторых реках в отдельные годы толщина льда достигает 200 см и более. При этом она значительно меняется не только в пространстве, но и от года к году. Более чем на одной трети створов амплитуда ее межгодовых изменений превышает 100 см. Почти в половине створов она находится в пределах от 50 до 100 см.

За исследуемый период максимальная толщина льда на большинстве рек уменьшилась. В четверти створов ее уменьшение составило более 30 см. Еще в четверти створов оно оценивается в пределах от 10 до 30 см. Тенденции величиной от 0 до –10 см за 50 лет отмечены в 44 % створов. В одном створе, наоборот, зафиксировано увеличение толщины льда на 4 см. Относительные ее изменения находятся в пределах от 4 до 32 %. Все тренды, величина которых по модулю составила менее 10 см за 50 лет, не достоверны при 5%-ном уровне значимости.

Изменение толщины льда на большинстве рек согласуется с изменениями температуры воздуха. Наибольшая согласованность характерна для изменений максимальной толщины льда и средней температуры за период октябрь-март. При этом в 78 % створов коэффициенты корреляции достоверны при 5%-ном уровне значимости. Из средних месячных температур наибольшее влияние на максимальную толщину льда оказывает температура февраля. В 56 % створов коэффициент корреляции, оценивающий эту связь, больше чем в другие месяцы. Согласованность пространственно осредненных межгодовых изменений температуры воздуха и максимальной толщины льда характеризуется коэффициентом корреляции равным –0,76.

В многолетних изменениях речного стока в зимний период на территории Забайкалья отмечаются различные по величине и знаку тенденции. На трети створов они отрицательны, но только в 5 из них линейные тренды статистически достоверны при 5 %-ном уровне значимости. Достоверных трендов, имеющих положительный знак, значительно больше – 23. Основываясь на этом, можно было бы сделать вывод об увеличении зимнего стока. Однако, как показывают результаты работы [5], многолетние тенденции годового стока неустойчивы во времени в связи с преобладанием в структуре его межгодовых колебаний внутривековой цикличности. Цикличность свойственна и зимнему стоку, анализ которой показал, что в начале XXI века в 60 % створов наблюдается маловодная фаза. Следовательно, на большинстве рек сток, наоборот, уменьшился. Положительные же линейные тренды обусловлены, главным образом, тем, что предшествующий многоводный период характеризовался наибольшими за весь анализируемый период расходами воды.

Обращает на себя внимание согласованность многолетних изменений годового и зимнего стока. С целью ее оценки произведено сопоставление тенденций и циклов (фаз) водности, а также выполнен корреляционный анализ. Результаты показали, что в 70 % створов тренды совпадают по знаку, а в остальных случаях они разнонаправлены, однако большинство из них не являются статистически достоверными. Хорошее совпадение отмечается и в цикличности. В 77 % створов многоводным и маловодным фазам циклов годового стока соответствуют аналогичные фазы циклов зимнего стока (рис. 1). Высокая степень согласованности годового и зимнего стока подтверждается и при корреляционном анализе. Коэффициенты корреляции превышают значение 0,7 в 47 % створов. При этом для всех створов они значимы при 5%-ном уровне.

Корреляционный анализ использован и для определения степени зависимости зимнего стока от предшествующего увлажнения. В связи с тем, что в конце октября – начале ноября обычно устанавливается ледостав, величину стока в октябре можно принять в качестве меры запасов подземных вод на водосборе к началу зимнего режима на реках, т.е. предшествующего

увлажнения водосборов. Анализ показал существенную зависимость стока в ноябре-марте от стока в октябре. В 76 % створов коэффициент корреляции этой связи имеет значения 0,7 и более, и в 98 % створов – 0,5 и более (таблица).

Таким образом, на подавляющем большинстве рек Забайкалья величина стока в зимний период практически полностью определяется предшествующим увлажнением. Соответственно, все закономерности межгодовых изменений, присущие годовому стоку [5], характерны и для зимнего стока, в том числе превалирование цикличности над многолетними трендами. В связи с тем, что на большинстве рек Забайкалья в начале XXI в. отмечалась маловодная фаза цикла [5], в зимний период также преобладала пониженная водность.

Существенная зависимость зимнего стока от предшествующего увлажнения затушевывает влияние на него изменений, вызванных потеплением. С целью исключения влияния летне-осеннего стока в дальнейшем исследовании зимний сток представлен в относительных величинах – в долях от годового стока.

Доля зимнего стока, осредненная по территории Забайкалья, за 50-летний период увеличилась. Ее увеличение составило около 1 % годового объема стока или 20 % объема зимнего стока. Анализ многолетних тенденций доли зимнего стока в отдельных створах показал, что в большинстве из них (в 55 из 79) она возросла. Однако только в 30-ти временных рядах положительные линейные тренды достоверны при 5%-ном уровне значимости. В 22-х рядах выявлен отрицательный тренд, в 6-ти из которых тренды статистически достоверны.

В многолетних изменениях территориально осредненных значений доли стока и температуры воздуха в зимний период (рис. 2а, в) выявлены общие черты. Повышенным температурам в 1990-х – 2000-х годах соответствуют бóльшие по сравнению с предыдущим периодом доли зимнего стока. Несмотря на то, что коэффициент корреляции между температурой и долей стока не достоверен при 5%-ном уровне значимости ($r = 0.21$), согласованность между их полиномиальными трендами практически функциональна ($r = 0.999$).

Однако температура воздуха непосредственно не влияет на величину стока. Такая тесная связь обусловлена воздействием температуры воздуха на температуру грунтов и ледовый режим. Повышение температуры верхнего слоя грунта и смещение на более поздние сроки дат перехода ее значений через 0 °С обусловили увеличение разгрузки бассейновых запасов воды в реки. Уменьшение толщины льда способствовало увеличению пропускной способности русел рек. Оба эти фактора определили повышение доли зимнего стока.

Величина доли зимнего стока имеет обратную зависимость от толщины льда, которая для средних по территории Забайкалья значениях характеризуется коэффициентом корреляции равным $-0,55$, а тренды временных рядов имеют противоположный ход (рис. 2б, в).

Наличие отрицательных трендов доли зимнего стока на перемерзающих реках можно объяснить тем, что в последние годы в связи с уменьшением абсолютных значений стока происходит более раннее промерзание рек до дна. Чем меньше сток, тем раньше перемерзает река при равных температурах воздуха. Не перемерзающие реки, на которых отмечено уменьшение доли стока, относятся к категории малых рек. Здесь большое влияние оказывают локальные факторы, которые, вероятно, и обусловили отрицательные тренды.

Кроме оценки изменений доли зимнего стока представляется важным определить, каким образом в связи с потеплением меняется за многолетний период степень зависимости зимнего стока рек от предшествующего увлажнения. Этот анализ выполнен путем сравнения соотношений средних расходов воды за ноябрь – март и средних месячных расходов воды в октябре за различные временные интервалы. Ряды разбивались на два периода: 1957/58 – 1987/88 и 1988/89 – 2006/07 годы, которые, как было показано ранее, резко отличаются по температуре воздуха. Во второй период температура в среднем была на 1, 3 °С выше, чем в первый период.

Для каждого периода рассчитывалось уравнение зависимости стока в ноябре-марте (Q_{XI-III}) от стока в октябре (Q_X). Линейные зависимости $Q_{XI-III} = f(Q_X)$ за два периода отличаются друг от друга. В большинстве створов одному и тому же значению октябрьского расхода воды во

втором периоде, как правило, соответствует больший зимний расход, чем в первом периоде (рис. 3). Это указывает на то, что при сохранении высокой степени зависимости зимнего стока от предшествующего увлажнения вклад потепления все-таки ощутим, и выражается в количественных изменениях этой зависимости. При повышении температуры воздуха возрастает водоотдача речных водосборов. Однако выявленная закономерность характерна не для всех рек. В створах, где были отмечены тенденции снижения доли зимнего стока, ситуация противоположная.

Таким образом, климатические изменения, выразившиеся в повышении температуры воздуха, привели к повышению температуры почвы и к уменьшению толщины льда рек. Эти процессы повлияли на режим стока: доля зимнего стока возросла. Тем не менее, объем стока в период ледостава в первую очередь зависит от предшествующего увлажнения и это указывает на то, что абсолютные его значения будут изменяться в соответствии с изменениями летне-осеннего стока.

Учитывая, что согласно прогнозу Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова температура в холодный период года до конца первой четверти XXI в. будет возрастать [3], следует ожидать повышение температуры почвы и уменьшение толщины льда на реках, и, соответственно, увеличение доли зимнего стока. Кроме того, велика вероятность, что в этот же период будут преобладать годы с речным стоком выше нормы [5], что приведет также к увеличению абсолютных значений расходов воды в зимний период.

Выводы

1. На территории Забайкалья в зимний период (ноябрь – март) произошло повышение приземной температуры воздуха, которое за 50-летний период в среднем по территории составило 1,8 °С. Рост температуры воздуха сопровождался увеличением температуры в верхнем трехметровом слое грунта и смещением дат ее перехода через 0 °С на более поздние сроки.

2. На большинстве рек за исследуемый период максимальная толщина льда уменьшилась на 4 – 32 %. Ее изменения хорошо согласуются с изменениями температуры воздуха.

3. Многолетним изменениям речного стока в зимний период свойственна цикличность. В начале XXI века на большинстве рек отмечалась маловодная фаза цикла, и, соответственно, в этот период преобладали годы со средними расходами воды ниже нормы.

4. Зимний сток имеет высокую степень зависимости от предшествующего увлажнения, которое преобладает над другими факторами. Влияние изменений толщины льда и, вероятно, промерзания грунтов на водосборах проявилось в увеличении доли зимнего стока и его величины относительно предшествующего увлажнения.

5. В связи с предполагаемым ростом температуры воздуха и наступлением многоводной фазы цикла в многолетних изменениях речного стока следует ожидать до середины 2020-х годов возрастание, как абсолютных значений зимнего стока, так и его доли в годовом стоке.

Литература

1. Гуревич Е.В. Влияние ледяного покрова на взаимодействие поверхностных и подземных вод. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук. – СПб, 2010, 20 с.
2. Калужный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата. – Метеорология и гидрология, 2012, № 1, с. 68-81.
3. Мещерская А.В., Обязов В.А., Богданова Э.Г. и др. Изменение климата Забайкалья во второй половине XX века по данным наблюдений и ожидаемые его изменения в первой четверти XXI века. – Труды ГГО, 2009, Вып. 559, с. 32-57.
4. Обязов В.А. Региональные изменения климата: выработка стратегий адаптации. – Материалы международного симпозиума «Изменение климата Центральной Азии: социально-экономические и экологические последствия». – Чита, Изд-во ЗабГГПУ, 2008. с. 182-184.
5. Обязов В.А., Смахтин В.К. Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз. – Водное хозяйство России, 2012, № 1, с. 63 – 72.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: в 2 т. Т. I. Изменения климата. – М., Росгидромет, 2008, 227 с.