

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СТОК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ И ЕГО ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ

С.А. Лавров<sup>1</sup>, И.Л. Калужный<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

## INFLUENCE OF CLIMATIC CHANGES ON A DRAIN OF A SPRING HIGH WATER AND ITS LONG-TERM FORECAST IN THE VOLGA BASIN

S.A. Lavrov<sup>1</sup>, I.L. Kalyuzhny<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*Выполнена оценка изменений характеристик весеннего стока и факторов его формирования в бассейне Волги за период 1978–2010 гг. по отношению к периоду 1948–1977 гг. Показано, что изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер, на 70% исследованных водосборах наблюдается уменьшение слоя стока весеннего половодья, а на 30% - рост. Только на 35% частных водосборов изменения стока статистически значимы. Показано, что величина талого стока зависит от широкого спектра гидрометеорологических, физических и физико-географических факторов, которые зачастую взаимообусловлены. Основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются осадки за зимний и весенний периоды и температура воздуха зимнего периода.*

*The assessment of changes of characteristics of a spring drain and factors of his formation in the basin of Volga during 1978-2010 in relation to the period of 1948-1977 is executed. It is shown that changes of a spring drain have multidirectional character, for 70% the studied reservoirs reduction of a layer of a drain of a spring high water, and for 30% - growth is observed. Only for 35% of private reservoirs of change of a drain are statistically significant. It is shown that the size of a thawed drain depends on a wide range of hydrometeorological, physical and physiographic factors which are often interdependent. The major climatic factors defining a drain of a spring high water is rainfall for the winter and spring periods and the air temperature of the winter period.*

Весеннее половодье является характерной особенностью равнинных рек России, в том числе и бассейна р. Волга. При относительно небольшой продолжительности половодья сток за этот период составляет 50 – 70 % годового, а в отдельных районах и больше. При этом весенний сток является наиболее климатообусловленной составляющей годового стока. На его величину оказывают влияние условия трёх климатических сезонов: осеннего, зимнего и весеннего. Поэтому, оценка воздействия климатических изменений, произошедших за последние десятилетия на весенний сток, с одной стороны приобретает особую значимость, а с другой представляет исключительную сложность.

Все факторы, которые формируют сток в речном бассейне, делятся на две большие группы: на относительно постоянные физико-географические и переменные, из года в год изменяющиеся гидрометеорологические факторы. Переменными факторами, зависящими от климатических условий, являются запасы воды в снеге, атмосферные осадки, их количество и интенсивность выпадения, температура воздуха в приземном слое, теплообмен, определяющий интенсивность таяния снега и испарение, водопоглотительная способность бассейна и др. В конечном счете, эти факторы и определяют количественные изменения стока и других характеристики половодья. Одновременно возникает необходимость оценки изменчивости данных факторов под воздействием климатических изменений и возможность их использования в качестве предикторов для расчета и прогноза талого стока.

В настоящей работе для анализа пространственной и временной изменчивости характеристик стока использовались ранее разработанная в Государственном гидрологическом институте методология [1], в соответствии с которой основой диагноза современных климатообусловленных изменений водности рек является комплексный статистический анализ динамики стока средних рек.

Выбор створов проводился с учетом следующих условий:

1. Использовались ряды с продолжительностью наблюдений 55 и более лет и отсутствием или минимальным числом пропусков в наблюдениях;
2. Не использовались данные по створам, выше которых имеются водохранилища сезонного или многолетнего регулирования.

С учетом соблюдения перечисленных выше условий было отобрано 107 рек, расположенных в бассейне Волги. Далее была выполнена оценка изменений основных характеристик весеннего стока за период 1978–2010 гг. по отношению к предшествующему периоду 1948–1977 гг. с определением их значимости по критерию Стьюдента. Также был проведён соответствующий анализ изменения метеорологической информации, наблюдений за снегозапасами, глубиной промерзания и влажностью почвы. Для этого были использованы данные метеостанций, агрометеорологических и воднобалансовых станций. Подобная методология использовалась нами ранее, в основном для анализа изменчивости зимнего стока и глубин промерзания в бассейне Волги [2-3].

В отличие от годового и зимнего стока, средние значения которых за последние три десятилетия увеличились практически на всей территории бассейна р. Волга [3], изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер. Из 107 выбранных нами рядов наблюдений за стоком были проанализированы данные по 25-ти частным бассейнам Нижней Волги, 43 - бассейна Камы, и 39 – Верхней Волги. Было установлено, что для различных районов бассейна Волги, тенденции изменчивости объёма весеннего стока имеют определенные отличия.

Для частных водосборов Нижней Волги объём половодья в 20 случаях имеет отрицательный тренд, в 5 положительный. Однако в 18 случаях эти оценки не значимы. Значимы в основном тенденции к уменьшению стока. Для бассейна Камы отрицательный тренд прослеживается в 24 случаях из 43. При этом значимые оценки изменчивости получены для десяти частных водосборов с отрицательным трендом талого стока и 4 – с положительным. Исследования трендов весеннего стока водосборов Верхней Волги, показывают, что только 16 из 39 трендов носит значимый характер. Причём в 31 случаях сток падает, а в 8 – растёт.

Суммируя полученные результаты в итоге получаем, что на 70 % исследованных частных водосборах бассейна Волги наблюдается падение объёма весеннего половодья, а на 30 % - рост. Однако, только в 35 % случаев эти тенденции значимы.

В среднем по Волге, на частных водосборах с отрицательным трендом объёма стока, его величина за последние тридцать лет упала примерно на 10 %. На некоторых частных водосборах падение достигло 30 %. Примерно те же цифры получаются и для водосборов с положительным трендом весеннего стока. На наш взгляд, такой неоднозначный характер изменчивости стока связан с высокой степенью разнообразия и разнонаправленности факторов формирования весеннего половодья. Ниже рассмотрим основные из этих факторов.

#### **Осадки в зимний период.**

Основным климатическим фактором, определяющим объём стока весеннего половодья, является величина атмосферных осадков, выпавших в холодный период. Как следует из анализа метеоданных, количество осадков холодного периода в 1978-2011 гг. по сравнению с 1948-1977 гг. увеличилось практически во всех частях бассейна Волги, за исключением некоторых районов бассейна р. Оки и Нижней Волги. В среднем по всему бассейну рост составил 18 мм. Количество осадков за дни с положительной температурой воздуха внутри холодного периода (предположительно жидких), также возросло во всех частях бассейна, в среднем на 6 мм. Таким образом, тенденции изменения осадков в зимний период в целом способствует росту весеннего стока.

#### **Максимальные снегозапасы в зимний период.**

С осадками в зимний период неразрывно связан такой фактор, как максимальные запасы воды в снеге (снегозапасы) на водосборе. Необходимо отметить, что доля наибольших снегозапасов, по отношению к осадкам зимнего периода составляет в среднем от 50 до 70 %. Анализ данных наблюдений за максимальными снегозапасами показал, что в период 1978 – 2012 гг. по сравнению с периодом 1966 – 1977 гг. на 63 % станций в бассейне Волги запасы воды в снежном покрове увеличились, а на 36 % – уменьшились. В основном, рост снегозапасов наблюдается в северных районах бассейна, от 5 до 10 %. В бассейне Кама и в низовьях Волги существуют разнонаправленные тенденции, но в среднем величина максимальных снегозапасов практически не изменилась. Преимущественный их рост в бассейне Волги, в общем, способствует росту стока весеннего половодья.

### **Температура воздуха в зимний период.**

Наряду с осадками температура воздуха является основным фактором формирования стока весеннего половодья. Рост температуры воздуха приводит к росту количества оттепелей и уменьшению максимальных снегозапасов, что способствует падению объёма стока весеннего половодья. Однако рост количества оттепелей способствует росту влажности в верхних горизонтах почвы (льдистости). Рост льдистости почвы обуславливает уменьшение фильтрационной способности почв в весенний период, рост коэффициента стока и, в некоторой степени, объёма весеннего половодья. Но с другой стороны повышение температуры воздуха приводит к деградации мерзлого слоя, изменяет фазовый состав влаги в почве (понижая льдистость), и тем самым увеличивает степень водопроницаемости верхнего горизонта почвы. Анализ данных о температуре воздуха за период 1978-2011 гг. по сравнению с периодом 1948-1977 гг. указывает на её рост во всех частях бассейна Волги. В среднем по всему бассейну рост температуры за холодный период составил около 1 °С. При этом значительно возросло количество оттепелей за последние 30 лет, в среднем на 5 дней или на 50 %. Динамика температуры воздуха в зимний период в целом способствует уменьшению стока весеннего половодья.

### **Температура воздуха в весенний период.**

Температура воздуха в этот период определяет характеристики снеготаяния – интенсивность и продолжительность, а также и испарение со снежного покрова. Рост температуры воздуха приводит к росту интенсивности снеготаяния и способствует росту коэффициента стока весеннего половодья. В бассейне р. Волга потепление в весенний период за последние 30 лет выражено не столь значительно, как в зимний период. Следствием потепления воздуха весной является рост интенсивности снеготаяния, и логично ожидать более высокие максимальные расходы воды в этот период. Однако, как показывает анализ данных о максимальных расходах весеннего половодья для района Средней Волги, только на 32 из 65 частных водосборах наблюдался рост максимальных расходов за последние 30 лет по сравнению с предыдущими. При этом только в 4 случаях тренды были значимы. На 33 частных водосборах наблюдалось падение максимального стока. На 17 из них тренды значимы. Для Нижней Волги на 24 частных водосборах из 25 наблюдалось падение максимальных расходов (15 трендов значимы).

### **Продолжительность половодья.**

Рост температуры воздуха, при одинаковых по объёму снегозапасах, приводит к сокращению длительности весеннего половодья. Это, в свою очередь, может приводить к уменьшению объёма осадков, выпавших за время половодья и уменьшению объёма талого стока. Анализ данных показал, что на 11 из 65 частных водосборах Средней Волги, наблюдался рост продолжительности половодья за последние 30 лет по сравнению с предыдущими. При этом только в 5 случаях тренды были значимы. На 54 частных водосборах наблюдалось падение продолжительности (в среднем на 8 суток). На 37 из них тренды значимы. Для Нижней Волги только на 6 исследованных частных водосборах из 25 наблюдалось падение продолжительности половодья (2 значимы), а на 19 рост (в среднем на 3 суток, 15 трендов значимы). Для Нижней Волги, в отличие от более северных районов, характерен рост продолжительности половодья за последние 30 лет. То есть весенние паводки стали носить более затяжной характер. Это является дополнительным фактором снижения максимальных расходов весеннего половодья.

Для численных оценок изменения талого стока в перспективе на несколько десятилетий могут использоваться с одной стороны, уравнения регрессии, связывающие сток с климатическими факторами, а с другой – физически обоснованные математические модели, позволяющие описывать процессы формирования талого стока во всём их многообразии на основе физических закономерностей. Первый подход является наиболее доступным. Проблема лишь в наличии надёжных корреляционных связей стока с осадками и температурой воздуха в зимний период.

Коэффициент корреляции между объёмом весеннего стока и зимней температурой воздуха довольно низкий, в основном меньше 0,3. Но проведённый нами анализ и опыт предыдущих исследований указывает на существование данной связи. Чтобы её выявить нами была выполнена следующая процедура. Исходя из того, что основной задачей долгосрочных прогнозов является выявление тренда изменчивости весеннего половодья, а не расчёт его ежегодных значений, мы при корреляционном анализе использовали не ежегодные значения

стока и температуры, а усреднённые за 5 лет. Вернее, мы анализировали не сами значения стока ( $y$ , мм), а коэффициент стока. В качестве данного параметра мы использовали показатель равный ( $y / (X_3 + x_в)$ ), с использованием вместо снегозапасов осадков за зимний климатический период ( $X_3$ , мм), а вместо осадков за время половодья их значения за весенний климатический период ( $x_в$ , мм). Это выполнялось для того чтобы минимизировать влияние зимних и весенних осадков на сток и для того чтобы в расчётах использовались реально прогнозируемые предикторы.

Предварительно проводилась сортировка ежегодных рядов коэффициента стока и температуры по возрастанию значений температуры. Полученные таким образом ряды разбивались на выборки по 5 лет. Затем рассчитывались средневыборочные значения температуры и коэффициента стока. Как правило, отклонение значений температур внутри отдельных выборок от средневыборочных составляло менее  $0,5^\circ\text{C}$ . Эти средние по выборкам значения в итоге и анализировались. Длина ежегодных рядов коэффициента стока и температур составляла 63 члена, а новых рядов – 12. Однако коэффициент корреляции между коэффициентом стока и среднесуточными температурами воздуха за зимний период для усреднённых значений значительно вырос, по сравнению с ежегодными значениями. Например, для р. Кильмезь, (приток р. Вятки)  $R$  вырос с 0,33 до 0,9.

Подобная методика была использована и для получения более явной связи величины слоя весеннего стока с суммой осадков за зимний и весенний периоды. При этом также использовались усреднённые значения в выборках по 5 лет. Обычно отклонение значений осадков внутри отдельных выборок от средневыборочных составляло менее 10 мм. Статистический анализ показал, что корреляционная связь между объёмом осадков за зимний и весенний периоды и среднезимней температурой отсутствует. Исходя из полученных данных коэффициент определяющий степень влияния температуры воздуха в зимний период на коэффициент стока, в среднем изменяется в пределах от  $-0,02$  до  $-0,03$  (таблица 1).

Таблица 1. Зависимости слоя талого стока от осадков, выпавших за зимний и весенний климатические периоды и коэффициента талого стока от средней температуры за зимний период по наблюдениям в бассейне р. Волга

Пункты наблюдений за стоком	Зависимость слоя талого стока ( $y$ , мм) от суммы осадков за зимний ( $X_3$ , мм) и весенний ( $x_в$ , мм) периоды	Зависимость коэффициента талого стока ( $k$ ) от средней температуры за зимний период ( $T_3, ^\circ\text{C}$ )
р. Молога – г. Устюжна	$y=0,38(X_3+x_в)+49$ ( $R=0,8$ )	$k = -0,038 T_3 + 0,34$ ( $R=0,7$ )
р. Ока - г. Калуга	$y=0,23(X_3+x_в)+22$ ( $R=0,8$ )	$k = -0,024 T_3 + 0,16$ ( $R=0,9$ )
р. Ока - г. Белёв	$y=0,12(X_3+x_в)+33$ ( $R=0,7$ )	$k = -0,032 T_3 + 0,03$ ( $R=0,9$ )
р. Ока - г. Муром	$y=0,13(X_3+x_в)+48$ ( $R=0,8$ )	$k = -0,015 T_3 + 0,23$ ( $R=0,9$ )
р. Медвенка - Подмосковная воднобалансовая станция	$y=0,24(X_3+x_в)+16$ ( $R=0,9$ )	$k = -0,028 T_3 + 0,4$ ( $R=0,7$ )
р. Вятка - г. Киров	$y=0,52(X_3+x_в)+35$ ( $R=0,9$ )	$k = -0,029 T_3 + 0,36$ ( $R=0,8$ )
р. Вятка – г. Вятские Поляны	$y=0,35(X_3+x_в)+74$ ( $R=0,9$ )	$k = -0,021 T_3 + 0,45$ ( $R=0,7$ )
р. Кильмезь – д. Вичмарь	$y=0,11(X_3+x_в)+18$ ( $R=0,6$ )	$k = -0,023 T_3 + 0,2$ ( $R=0,9$ )
р. Быстрица - д. Шипицино	$y=0,29(X_3+x_в)+43$ ( $R=0,9$ )	$k = -0,013 T_3 + 0,34$ ( $R=0,8$ )
р. Молома - д. Спасское	$y=0,25(X_3+x_в)+94$ ( $R=0,8$ )	$k = -0,008 T_3 + 0,6$ ( $R=0,6$ )
р. Белая - г. Бирск	$y=0,29(X_3+x_в)+55$ ( $R=0,8$ )	Зависимость отсутствует
р. Кама – пгт. Гайны	$y=0,29(X_3+x_в)+87$ ( $R=0,8$ )	Зависимость отсутствует
р. Дема - д. Бочкарева	$y=0,19(X_3+x_в)+25$ ( $R=0,8$ )	Зависимость отсутствует
р. Самара - с. Елшанка	$y=0,42(X_3+x_в)+42$ ( $R=0,3$ )	$k = -0,022 T_3 + 0,01$ ( $R=0,6$ )
р. Кубня - с. Чутеево	$y=0,18(X_3+x_в)+44$ ( $R=0,7$ )	$k = -0,029 T_3 + 0,2$ ( $R=0,8$ )
р. Бузулук – с. Перевозниково	$y=0,19(X_3+x_в)+2$ ( $R=0,7$ )	$k = -0,022 T_3 - 0,03$ ( $R=0,7$ )
р. Сок - ст. Сургут	$y=0,09(X_3+x_в)+46$ ( $R=0,5$ )	Зависимость отсутствует

То есть, при повышении температуры воздуха на 1 °С, коэффициент стока уменьшится на 0,02-0,03. В нашем анализе показатель, соответствующий коэффициенту стока равен  $y/(X_3+x_B)$ . Например, для водосборов Верхней Волги среднее значение суммы осадков ( $X_3+x_B$ ) примерно равно 250 мм, а объём половодья – 100 мм. Уменьшение коэффициента стока на 0,02-0,03, соответственно приводит к падению стока на 5-7 мм или на 5 – 7 %. То есть в долгосрочной перспективе потепление климата не окажет значительного влияния на сток весеннего половодья.

### **Литература**

1. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53-86.
2. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Глубина промерзания почв и подпочвенных грунтов в бассейне р. Волга при климатических изменениях за последний тридцатилетний период и методика ее расчета // Инженерные изыскания. 2015. № 3. С.52 – 59.
3. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России. 2012. № 4 С. 74-84.