

УДК 556.166:551.583

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СТОК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ И ФАКТОРЫ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ

© 2016 г. С.А. Лавров, И.Л. Калюжный

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: весенний сток, объем половодья, изменения водности рек, климатические факторы, статистические оценки, прогноз, р. Волга, водосбор.



С.А. Лавров



И.Л. Калюжный

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. Выявлено, что изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер, на 70 % исследованных водосборов наблюдается уменьшение слоя стока весеннего половодья, на 30 % – рост. Только на 35 % частных водосборов изменения стока статистически значи-

мы. В среднем по Волге, на частных водосборах с отрицательным трендом объема стока, его величина за последние тридцать лет упала примерно на 10 %. Показано, что величина талого стока зависит от широкого спектра гидрометеорологических, физических и физико-географических факторов, которые зачастую взаимообусловлены. Для анализа физических закономерностей процессов формирования талого стока, выявления основных факторов, обуславливающих его изменчивость, использованы результаты лабораторных и полевых исследований, математического моделирования. Показано, что основными климатическими факторами, определяющими сток весеннего половодья, являются максимальные снегозапасы и осадки за период половодья. Факторы подстилающей поверхности выступают промежуточным регулятором, усиливают или уменьшают роль климатических факторов и определяют в конечном итоге тенденцию изменения стока весеннего половодья. В качестве основных предикторов для долгосрочного прогноза весеннего половодья предлагается использовать сумму из осадков за зимний и весенний климатические периоды, а также температуру воздуха зимнего периода.

Весеннее половодье является характерной особенностью равнинных рек России, в т. ч. и бассейна Волги. 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 трех климатических сезонов: осеннего, зимнего и весеннего. Поэтому оценка воздействия произошедших за последние десятилетия климатических изменений на весенний сток приобретает особую значимость и одновременно представляет исключительную сложность.

Все факторы, формирующие сток в речном бассейне, делятся на две большие группы: относительно постоянные физико-географические факторы и переменные, из года в год изменяющиеся, гидрометеорологические. 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 характеристик половодья. Одновременно возникает необходимость оценки изменчивости данных факторов под воздействием климатических изменений и возможности их использования в качестве предикторов для расчета и прогноза талого стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

Выбор створов проводили с учетом следующих условий:

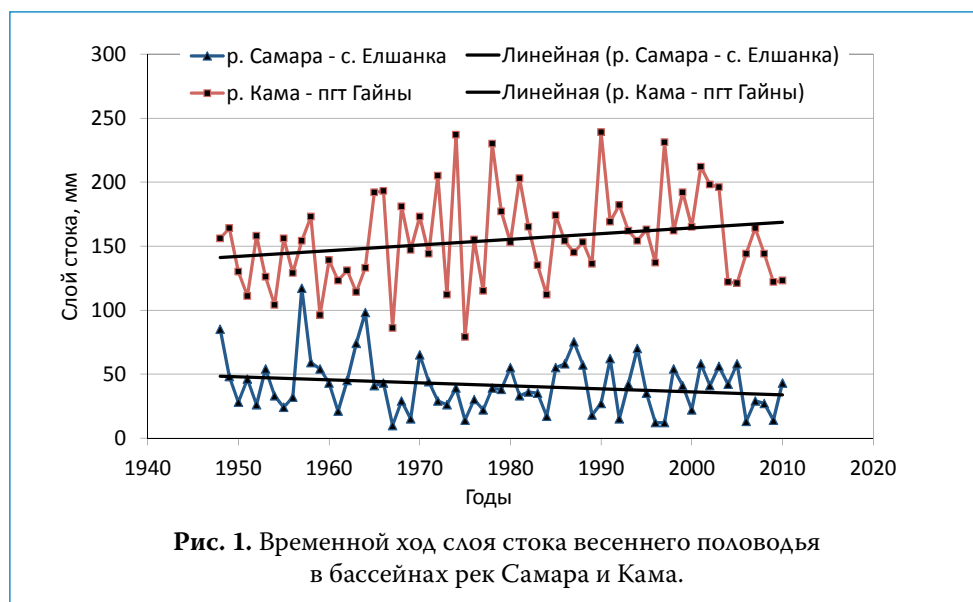
- использовали ряды с продолжительностью наблюдений 55 и более лет и отсутствием или минимальным числом пропусков в наблюдениях;
- не использовали данные по створам, выше которых расположены водохранилища сезонного или многолетнего регулирования.

С учетом соблюдения перечисленных выше условий в бассейне Волги было отобрано 107 рек. Далее была выполнена оценка изменений основных характеристик весеннего стока за период 1978–2010 гг. по отношению к 1948–1977 гг. с определением их значимости по критерию Стьюдента. Проведен анализ изменения метеорологической информации, наблюдений за снегозапасами, глубиной промерзания и влажностью почвы. Для этого использованы данные метеостанций, агрометеорологических и водноба-

лансовых станций. Подобная методология применялась ранее для анализа изменчивости зимнего стока и глубин промерзания в бассейне Волги [2, 3]

Для анализа физических закономерностей процессов формирования талого стока, выявления основных факторов, обуславливающих изменчивость талого стока, использованы результаты лабораторных и полевых исследований, математического моделирования промерзания и оттаивания, миграции и инфильтрации влаги в промерзающих почвах, формирования и таяния снежного покрова [4 – 6].

В отличие от годового и зимнего стока, средние значения которых за последние три десятилетия увеличились практически на всей территории бассейна Волги [3, 7], изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер. На рис. 1 представлен пример разнонаправленности изменений весеннего стока в бассейне Волги, приведены тренды стока из разных областей бассейна Волги. Однако разнонаправленность трендов весеннего половодья иногда наблюдается на двух смежных водосборах. Например, весенний сток р. Вятки (г. Киров) за последние десятилетия вырос, а у притока Вятки р. Кильмезь (д. Вичмарь) – уменьшился.



Из 107 выбранных рядов наблюдений за стоком проанализированы данные по 25 частным бассейнам Нижней Волги, 43 бассейнам Камы и 39 – Верхней Волги. Установлено, что для различных районов бассейна Волги тенденции изменчивости объема весеннего стока имеют определенные отличия. Для частных водосборов Нижней Волги объем 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 носят значимый характер, причем в 31 случае сток падает, а в 8 – растет.

Суммируя данные результаты, в итоге получаем, что на 70 % исследованных частных водосборов бассейна Волги наблюдается падение объема весеннего половодья, а на 30 % – рост. Однако только в 35 % случаев эти тенденции значимы. На рис. 2 приведен график ранжированных по возрастанию данных об изменении средних слоев стока весеннего половодья в бассейне Волги за период 1978–2010 гг. по отношению к периоду 1948–1977 гг. На диаграмме видно, что на почти половине водосборов в бассейне Волги объем стока весеннего половодья практически не изменился. В среднем по Волге, на частных водосборах с отрицательным трендом объема стока, его величина за последние тридцать лет упала примерно на 10 %. На некоторых частных водосборах падение достигло 30 %. Примерно такие же результаты 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 объем стока весеннего половодья, является величина атмосферных осадков, выпавших в холодный период. Рост твердых осадков приводит к росту максимальных снеготпасов и, соответственно, способствует увеличению объема стока весеннего половодья. Роль жидких осадков в зимний период двояка: с одной стороны их рост может привести к уменьшению максимальных снеготпасов и, как следствие, уменьшению объема стока весеннего половодья. С другой стороны – выпадение жидких осадков приводит к росту влажности в верхних горизонтах почвы (вплоть до возникновения ледяной корки). А рост влажности почвы (льдистости) обуславливает уменьшение фильтрационной способности почв в весенний период и увеличение коэффициента стока и объема весеннего половодья.

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 (табл. 1), за исключением некоторых районов бассейна 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, тенденция изменения осадков в зимний период в целом способствует росту весеннего стока.

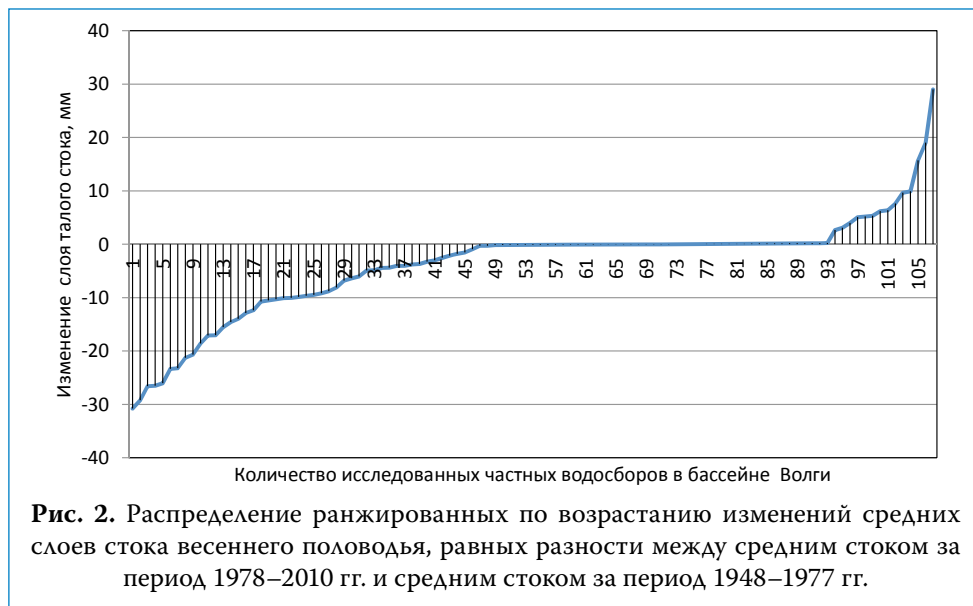


Рис. 2. Распределение ранжированных по возрастанию изменений средних слоев стока весеннего половодья, равных разности между средним стоком за период 1978–2010 гг. и средним стоком за период 1948–1977 гг.

Максимальные снегозапасы в зимний период

С осадками в зимний период неразрывно связан такой фактор, как максимальные запасы воды в снеге (снегозапасы) на водосборе. Следует отметить, что доля наибольших снегозапасов по отношению к осадкам зимнего периода составляет в среднем от 50 до 70 %. Однако ежегодные изменения доли снегозапасов существенно варьируют в пространстве. В южных районах бассейна их доля изменяется от 0 до 50 %, в северных – диапазон изменения составляет от 50 до 90 %. Кроме оттепелей, свой вклад в уменьшение запасов влаги в снежном покрове вносит испарение с поверхности снежного покрова, которое может достигать в южных районах 30 мм за зимний период. Очевидно, что рост максимальных снегозапасов приводит к росту объема стока весеннего половодья. С другой стороны, это приводит к уменьшению промерзания почвы и росту ее инфильтрационной способности в весенний период, что в дальнейшем способствует увеличению потерь талого стока, уменьшению коэффициента стока и объема весеннего половодья.

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 отмечен в северных районах бассейна – от 5 до 10 %. В бассейне Камы и в низовьях Волги существуют разнонаправленные тенденции, но в среднем величина максимальных снегозапасов практически не изменилась. Преимущественный их рост в бассейне Волги 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 объема стока весеннего половодья. Однако увеличение количества оттепелей способствует росту влажности в верхних горизонтах почвы (льдистости). Рост льдистости обуславливает уменьшение фильтрационной способности почв в весенний период, рост коэффициента стока и, в некоторой степени, объема весеннего половодья. Однако повышение температуры воздуха приводит к деградации мерзлого слоя, изменяет фазовый состав влаги в почве (понижая льдистость), тем самым увеличивая степень водопроницаемости верхнего горизонта почвы.

Анализ данных о температуре воздуха за период 1978–2011 гг. по сравнению с 1948–1977 гг. указывает на ее рост во всех частях бассейна Волги. В среднем по всему бассейну рост температуры за холодный период составил около 1 °С (табл. 1). При этом за последние 30 лет значительно возросло количество оттепелей, в среднем на 5 дней или на 50 %. Динамика температуры воздуха в зимний период в целом способствует уменьшению стока весеннего половодья.

Продолжительность зимнего периода

Данный фактор является в значительной мере следствием температурного режима воздуха в зимний период. За продолжительность холодного периода года принят интервал времени в сутках от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С в осенний период до даты ее устойчивого перехода через 0 °С весной. Осредненные характеристики холодного сезона года в бассейне Волги по результатам наблюдений на 21 метеостанции с 1948 по 1977 гг. и с 1978 по 2011 гг. приведены в табл. 1. В период стабилизации климатических характеристик продолжительность холодного периода в среднем составляла 143 сут; на этапе их изменений она уменьшилась до 134 сут. В среднем в бассейне Волги продолжительность холодного периода года сократилась на 8–10 сут.

Сокращение длительности зимнего периода приводит к уменьшению промерзания почвы, увеличению ее инфильтрационной способности в весенний период, уменьшению коэффициента стока и объема весеннего поло-

Таблица 1. Сравнительные характеристики холодного сезона года в бассейне Волги за периоды наблюдений с 1948 по 1977 гг. и с 1978 по 2011 гг.

Метеостанция	Период наблюдений	Продолжительность холодного сезона, сут		Температура холодного сезона, °С		Осадки холодного сезона, мм	
		Средняя за период	Разность	Средняя за период	Разность	Средние за период	Разность
Киров	1948–1977	161		–9,7		167	
	1978–2011	154	–7	–8,6	1,1	233	66
Кострома	1948–1977	153		–8,1		148	
	1978–2011	141	–12	–7,4	0,7	182	36
Казань	1948–1977	154		–9,3		149	
	1978–2011	146	–8	–7,9	1,4	161	12
Елаьта	1948–1977	147		–8		193	
	1978–2011	134	–13	–7,1	0,9	191	–2
Рязань	1948–1977	142		–8,7		129	
	1978–2011	130	–12	–7,7	1	156	27
Павелец	1948–1977	146		–7,8		129	
	1978–2011	134	–12	–6,7	1,1	137	8
Безенчук	1948–1977	147		–7,7		113	
	1978–2011	137	–10	–6,9	0,8	146	33
Пермь	1948–1977	163		–9,5		181	
	1978–2011	159	–4	–8,3	1,2	211	30
Уфа	1948–1977	154		–11,3		187	
	1978–2011	150	–4	–10,6	0,7	214	27
Самара	1948–1977	149		–10,2		162	
	1978–2011	141	–8	–9	1,2	214	51
Воронеж	1948–1977	130		–10,4		148	
	1978–2011	118	–12	–9,3	1,1	154	6
Саратов	1948–1977	136		–6,8		140	
	1978–2011	130	–6	–4,9	1,9	165	25
Александров Гай	1948–1977	135		–8,8		97	
	1978–2011	126	–9	–7,6	1,2	114	17
Элиста	1948–1977	109		–8		83	
	1978–2011	90	–19	–6,7	1,3	73	–10
Астрахань	1948–1977	104		–8,8		45	
	1978–2011	81	–23	–7,5	1,3	42	–3

водья. С другой стороны, сокращение длительности зимнего периода может привести к уменьшению поступления твердых осадков и, соответственно, падению объема стока весеннего половодья. Однако, несмотря на сокращение продолжительности зимнего периода, величина твердых осадков в бассейне, как указывалось выше, растет, т. е. данный фактор не сказывается на величине осадков.

Установлено, что переход температуры осенью через 0 °С в период изменения климатических характеристик наступает в более поздние сроки, а переход температуры весной через 0 °С, наоборот, в более ранние. Позднее начало зимнего периода способствует увеличению количества жидких осадков, которые расходуются на пополнение запасов почвенной влаги до уровня наименьшей полевой влагоемкости и выше. Практически повсеместно это наблюдается в лесной, несколько меньше в лесостепной и степной зонах. Отсюда следует, что при относительно небольшой глубине промерзания и более позднем начале зимнего периода увеличивается объем стокоформирующей влаги в талой зоне почвы (превышение влажности над уровнем наименьшей влагоемкости), как следствие, увеличивается зимний сток и уменьшается слой стока весеннего половодья.

Температура воздуха в весенний период

Температура воздуха в этот период определяет характеристики снеготаяния – интенсивность и продолжительность, а также испарение со снежного покрова. Рост температуры воздуха приводит к росту интенсивности снеготаяния и способствует увеличению коэффициента стока весеннего половодья.

В бассейне Волги потепление в весенний период за последние 30 лет выражено не столь значительно как зимой. Наиболее высокие аномалии весенней температуры отмечались в центральных частях бассейна, где они составили 0,5–1,0 °С. Незначительное повышение температуры в весеннее время отмечено в бассейне Нижней Волги, где величины аномалий не превышали 0,3 °С. Следствием потепления воздуха весной является рост интенсивности снеготаяния, поэтому 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 предыдущим периодом. При этом только в четырех случаях тренды были значимы. На 33 частных водосборах зафиксировано падение максимального стока, на 17 из них тренды значимы. Для Нижней Волги на 24 из 25 частных водосборах наблюдалось падение максимальных расходов (15 трендов значимы).

Отметим две основные причины возникновения этого явления. Первая связана с преимущественным ростом интенсивности инфильтрации талой влаги почвой над интенсивностью снеготаяния, что обусловлено уменьшением промерзания почв зимой и увеличением их водопроницаемости в весенний период. Вторая причина, вероятно, обусловлена характером изменения температуры в весенний период. Несмотря на ее средний рост, точные аномалии могут быть более сглаженными. Обе эти причины приводят к уменьшению такого фактора, как «дружность» весеннего половодья.

Продолжительность половодья

Рост температуры воздуха при одинаковых по объему снеготаяниях приводит к сокращению длительности весеннего половодья. В свою очередь, это может приводить к уменьшению объема осадков, выпавших за время половодья, и уменьшению объема талого стока.

Анализ данных показал, что на 11 из 65 частных водосборах Средней Волги за последние 30 лет наблюдался рост продолжительности половодья. При этом только в 5 случаях тренды были значимы. На 54 частных водосборах отмечено падение продолжительности, в среднем на 8 сут. 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 сут, 15 трендов значимы.

Для Нижней Волги, в отличие от более северных районов, за последние 30 лет характерен рост продолжительности половодья, т. е. весенние паводки стали носить более затяжной характер. Это является дополнительным фактором снижения максимальных расходов весеннего половодья.

Осадки в весенний период

При формировании стока весеннего половодья значительная роль принадлежит осадкам, выпавшим в период снеготаяния. Количество выпавших осадков при снеготаянии изменяется в широких пределах. Так, в бассейне р. Вятки они изменяются в диапазоне от 4 до 150 мм, в среднем 36 мм. Например, весной 1974 г. осадки составили 150 мм при запасе воды в снеге 180 мм.

Выпавшие за период снеготаяния осадки существенно увеличивают сток весеннего половодья. В весенний период основная часть бассейна Волги за последние 30 лет находилась в области небольших изменений осадков. Наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии, но значимых трендов нет. В среднем по бассейну за календарный весенний период (март – май) осадки выросли на 3 мм. Для сравнения, за зимний период осадки выросли на 7 мм, летний и осенний – на 6 мм.

Свойства подстилающей поверхности

Рассматриваемые факторы определяют водопроницаемость почвы в весенний период и являются основными в перераспределении накопившейся в снежном покрове влаги на поверхностную и инфильтрационную (т. е. потери талого стока) составляющие весеннего половодья. При этом одна группа факторов зависит от климатических характеристик (влажность и льдистость почвы, температура и глубина промерзания), а другая носит практически постоянный характер (плотность почвы, ее механический состав, почвенно-гидрологические константы и др.). Отдельно можно назвать группу факторов, связанных с физико-географическими условиями на водосборе (рельеф, залесенность, заболоченность, виды землепользования и др.).

Установлено [5, 6, 8], что водопроницаемость мерзлой почвы речных водосборов определяется двумя основными характеристиками – запасами влаги в верхнем слое почвы и термическим режимом почвы в течение зимы. Из анализа данных агрометеорологических и воднобалансовых станций Росгидромета следует, что за последние 30 лет наблюдается незначительный рост величин почвенных влагозапасов в предзимний период практически по всей территории бассейна Волги за исключением юго-запада таежной зоны. Влажность почвы изменяется в широких пределах в зависимости от физико-географических условий и типов почв на водосборе. В засушливые годы в верхнем полуметровом слое почвы она может снижаться до значений влажности завядания. Однако в отдельные годы влажность достигает значений наименьшей влагоемкости. Амплитуда колебаний влагозапасов метрового слоя почвы может достигать 120–150 мм.

По сравнению с предзимним периодом непосредственно перед снеготаянием запасы влаги в почве значительно возрастают. Это происходит за счет оттепелей, наблюдаемых в зимний период, и миграции влаги к фронту промерзания. В период оттепелей в процессе водоотдачи из снега запасы влаги в метровом слое могут увеличиваться на 10–50 мм и более. Наибольшее приращение влаги наблюдается в верхних промерзающих горизонтах. Зимняя миграция, в противовес оттепелям, значительно изменяет содержание влаги при существенном понижении температуры воздуха ниже нуля. Процесс миграции наблюдается практически ежегодно и повсеместно, изменяя влажность верхних горизонтов почвы от 5 до 100 мм. Наиболее ярко миграция выражена в тяжелых по механическому составу почвах (суглинках, глинах), особенно при залегании грунтовых вод близко к дневной поверхности. В этом случае происходит непрерывный поток мигрирующей влаги от уровня грунтовых вод и накопление ее в зоне промерзания. Рост влагонакопления в верхних горизонтах почвы в зимний период приводит в конечном итоге к росту коэффициента стока весеннего половодья и его объема.

На основании выполненных экспериментальных исследований [9] можно сделать вывод, что водопроницаемость мерзлой почвы в весенний период зависит как от исходной льдистости почвы до начала весеннего половодья, так и от приращения ее в процессе впитывания талой влаги в мерзлую почву. Исходную величину льдистости определяет влажность почвы в конце зимнего периода, а приращение – температура почвы. Попадая в верхний слой почвы, часть талой влаги замерзает за счет «запаса холода», зависящего от теплоемкости и величины отрицательной температуры почвы данного слоя, а также «потока холода», идущего из нижних, более холодных, горизонтов почвы. Как отмечено в [9], даже небольшое приращение льдистости во время половодья приводит к заметному снижению водопроницаемости почвы, т. к. это приращение происходит в наиболее крупных ее порах.

В работе [2] приведены данные о том, что потепление климата обуславливает уменьшение глубины промерзания почвы во всех климатических зонах бассейна р. Волги. Показано, что средние глубины промерзания в бассейне изменялись в широких пределах от 60 до 110 см. За последние тридцать лет уменьшение глубин промерзания в некоторых частях бассейна составило 50 см, в среднем по бассейну – 25 см.

Однако анализ процесса формирования талого стока показывает, что прямую зависимость слоя талого стока от температурного режима почвы и глубины промерзания выявить достаточно трудно. Эта зависимость косвенная, т. к. важнейшим фактором формирования талого стока является аккумулятивная в мерзлом слое почвы влага (льдистость). С ростом температуры воздуха и уменьшением глубины промерзания почвы сокращается влагонакопление в верхних горизонтах почвы при морозной миграции, а рост льдистости в процессе снеготаяния также не столь значителен [5]. Этими процессами осуществляется опосредованное влияние степени промерзания почв на их инфильтрационные свойства в весенний период, что в конечном итоге может приводить к уменьшению талого стока.

Данное положение не столь однозначно, оно зависит от физических свойств почв на водосборе. Для суглинистых и глинистых почв с низкими фильтрационными свойствами влияние степени промерзания на водопроницаемость не столь существенно. В данном случае даже незначительное промерзание приводит практически к полной водонепроницаемости [5]. При этих условиях объем талого стока полностью определяется снегозапасами и осадками. Аналогичная картина наблюдается и при изначально высоких значениях влажности (льдистости) почв в предвесенний период. Степень промерзания и здесь не влияет на объем талого стока. Существует также и критическая для конкретных водосборов глубина промерзания, превышение которой уже не приводит к заметному изменению фильтра-

ционных свойств почв в весенний период. При определенном сочетании влажности мерзлой почвы и ее температуры возникает так называемый «запирающий слой», когда практически все почвенные поры заполняются льдом и процесс инфильтрации прекращается [5].

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПРЕДИКТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Из приведенного выше следует, что величина талого стока зависит от достаточно широкого спектра гидрометеорологических, физических и физико-географических факторов, находящихся в сложном взаимодействии и значительной взаимообусловленности. Это определяет существующие трудности при разработке методов расчета и прогноза весеннего половодья. Обычно в гидрологической практике, для этой цели используются выражения, которые имеют следующий общий вид [4].

$$y = S + x - p, \quad (1)$$

$$y = (S + x) k, \quad (2)$$

где y – сток весеннего половодья, мм;

S – максимальные запасы воды в снежном покрове в предвесенний период, мм;

x – осадки за период половодья, мм;

p – потери стока на инфильтрацию, испарение со снега и заполнение бессточных емкостей, мм;

k – коэффициент стока.

Наряду со снегозапасами и осадками, потери талого стока на инфильтрацию и коэффициент талого стока являются наиболее климатообусловленными характеристиками. Потери в виде слоя воды, аккумулированной в отрицательных формах микрорельефа и испарения со снежного покрова, в большинстве случаев составляют небольшую часть от общих потерь, в среднем 1–5 мм и 5–10 мм соответственно [4, 5].

В работах [4, 5, 8, 10, 11] на основе многочисленных полевых данных подробно исследованы факторы, определяющие потери талого стока на инфильтрацию. Было проведено районирование Европейской территории России по трем основным стокоформирующим факторам ($S + x$), W – увлажнение почвогрунтов, L – промерзание [4]. Практически во всех исследованиях, посвященных весеннему половодью, главным фактором формирования стока в весенний период является увлажнение почв. Зачастую из-за отсутствия информации о влажности почвы в качестве индекса увлажнения используются осадки или речной сток осеннего периода [4]. Параметрами промерзания могут быть температура почвы, глубина промерзания или среднесуточная

температура воздуха за зимний период [4, 5, 8, 10]. В некоторых случаях вводится комплексный параметр – произведение влажности на глубину промерзания ($W \cdot L$), характеризующий льдистость почвы [11]. При высоких значениях влажности и отрицательных температур почвы могут возникнуть условия для образования «запирающего слоя» [5], в этом случае величина стока не зависит от характеристик увлажнения и промерзания почвы.

Основные результаты, изложенные в работах [4, 5, 8, 10, 11], получены в 1960–1980 гг., т. е. до начала периода потепления климата. Поэтому имеются некоторые расхождения с вышеизложенными обобщениями. Так, согласно [4], в районе Верхней Волги основными факторами формирования талого стока являются снеготалоходы и увлажнение почвогрунтов. За последние десятилетия, как отмечалось выше, величины данных факторов выросли, что должно было привести к повсеместному росту талого стока. Однако сток вырос только на 8 из 39 частных водосборах Верхней Волги. Очевидна решающая роль фактора потепления климата, которая в более ранних исследованиях не была выявлена.

В гидрологической практике для расчетов и прогноза талого стока наиболее широко используются данные о величине снеготалоходов перед началом снеготаяния и осадков за время половодья. В табл. 2 приведены уравнения регрессии для расчета объема половодья на некоторых частных водосборах бассейна Волги.

Таблица 2. Зависимости слоя талого стока от суммы максимальных снеготалоходов и осадков за период половодья для ряда водосборов бассейна Волги

Пункты наблюдений	Зависимость слоя талого стока (y , мм) от суммы запасов воды в снеге (S , мм) и осадков за период половодья (x , мм)	Коэффициент корреляции
р. Белая – г. Бирск	$y = 0,86 (S + x) - 25$	0,91
р. Ветлуга – с. Дубники	$y = 1,35 (S + x) - 44$	0,80
р. Сура – с. Княжиха	$y = 1,47 (S + x) - 73$	0,69
р. Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	$y = 0,55 (S + x) - 9$	0,75
р. Вятка – г. Вятские Поляны	$y = 0,76 (S + x) - 8$	0,73

Значительно труднее учесть влияние факторов подстилающей поверхности на сток талых вод ввиду их сложной взаимообусловленности. С учетом высоких требований к точности задания снеготалоходов, увлажнения и промерзания почв, а также их значительной пространственной изменчивости выбор оптимальных предикторов при расчетах и прогнозах талого стока индивидуален и зачастую требует дополнительных полевых исследований. Однако в последнее время количество наблюдений за снеготалоходами, глу-

биной промерзания, влажностью и температурой почв резко сократилось, поэтому возникают проблемы использования данных предикторов в прогнозах стока весеннего половодья.

Самым доступным параметром для текущего прогноза объема стока весеннего половодья являются осадки зимнего периода (X_3). При отсутствии данных о снегозапасах их можно использовать в качестве основного предиктора. В табл. 3 приведены уравнения зависимостей слоев стока от осадков, выпавших в холодный период года преимущественно в виде снега, и дана оценка тесноты этой связи для ряда частных водосборов бассейна Волги. Согласно табл. 3, коэффициент корреляции уравнений регрессии изменяется в широких пределах, от 0,16 до 0,60: очень низкий уровень корреляции связи наблюдается в бассейнах степной зоны; он увеличивается, приближаясь к бассейнам рек таежной зоны.

Таблица 3. Зависимости слоя талого стока от осадков, выпавших в холодный период года, для ряда частных водосборов бассейна Волги

Пункты наблюдений за стоком	Зависимость слоя талого стока (y , мм) от осадков за зимний период (X_3 , мм)	Коэффициент корреляции
р. Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	$y = 0,31 X_3 + 30$	0,47
р. Молома – с. Пермьское	$y = 0,48 X_3 + 47$	0,49
р. Молога – д. Устюжна	$y = 0,18 X_3 + 88$	0,22
р. Кильмезь – пос. Кильмезь	$y = 0,30 X_3 + 46$	0,47
р. Дема – д. Бочкарева	$y = 0,22 X_3 + 23$	0,44
р. Кама – пос. Бондюг	$y = 0,35 X_3 + 60,3$	0,60
р. Вятка – г. Вятские Поляны	$y = 0,45 X_3 + 63$	0,52
р. Самара – с. Елшанки	$y = 0,42 X_3 + 175$	0,14
р. Сок – пос. Сургут	$y = 0,09 X_3 + 50$	0,16

По результатам наблюдений в бассейне рек Самара и Сок аналогичная связь практически отсутствует. Столь низкий коэффициент корреляции свидетельствует о том, что в степной зоне выпавшие зимние осадки не являются определяющим фактором стокообразования весеннего половодья. Они существенно уменьшаются под влиянием оттепелей и испарения со снега, которое в этой зоне достигает 30–50 мм. В лесостепной и лесной зонах оттепели, испарение со снега существенно снижаются и коэффициент связи зависимости стока весеннего половодья с осадками холодного периода года повышается до 0,5–0,6.

В период значительных климатических изменений возникает проблема долгосрочного прогноза изменений речного стока, в т. ч. и весеннего по-

ловодья. Очевидно, что данный прогноз невозможен без надежных оценок изменения климатических характеристик. Современные климатические модели, по мнению климатологов [12], могут наиболее достоверно предсказать тренд температуры воздуха, осадков – уже хуже. У других климатических характеристик точность предвычисления еще ниже, поэтому в долгосрочных прогнозах талого стока реально можно использовать лишь температуру воздуха и осадки.

Для численных оценок изменения талого стока в перспективе на несколько десятилетий могут использоваться, с одной стороны, уравнения регрессии, связывающие сток с климатическими факторами, с другой – физически обоснованные математические модели, позволяющие описывать процессы формирования талого стока во всем их многообразии на основе физических закономерностей. Первый подход наиболее доступен. Проблема лишь в наличии надежных корреляционных связей стока с осадками и температурой воздуха в зимний период. Что касается осадков, то выше показано (табл. 3) наличие подобных связей для некоторых водосборов бассейна Волги.

Коэффициент корреляции между объемом весеннего стока и зимней температурой воздуха довольно низкий, в основном меньше 0,3. Но проведенный выше анализ и опыт предыдущих исследований указывают на существование данной связи. Исходя из того, что основной задачей долгосрочных прогнозов является выявление тренда изменчивости весеннего половодья, а не расчет его ежегодных значений, при корреляционном анализе использованы не ежегодные значения стока и температуры, а усредненные данные за пять лет. Вернее, проанализированы не сами значения стока, а коэффициент стока. В качестве данного параметра использован показатель равный $y/(X_3 + X_в)$, вместо снегозапасов – осадки за зимний климатический период (X_3 , мм), а вместо осадков за время половодья – их значения за весенний климатический период ($x_в$, мм). Это сделано для того, чтобы минимизировать влияние зимних и весенних осадков на сток и в расчетах использовать реально прогнозируемые предикторы.

Предварительно проводили сортировку рядов коэффициента стока и температуры по возрастанию значений температуры. Полученные таким образом ряды разбивали на выборки по пять лет. Затем рассчитывали средневывборочные значения температуры и коэффициента стока. Как правило, отклонение значений температур внутри отдельных выборок от средневывборочных составляло менее 0,5 °С. Эти средние по выборкам значения в итоге и анализировали. Длина ежегодных рядов потерь стока и температур составляла 63 члена, новых рядов – 12. Однако коэффициент корреляции между коэффициентом стока и среднесуточными температурами воздуха за зимний период для усредненных 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 использована и для получения более явной связи величины весеннего стока с суммой осадков за зимний и весенний периоды. При этом также применяли усредненные значения в выборках по пять лет. Обычно отклонение значений осадков внутри отдельных выборок от средневыборочных составляло менее 10 мм. В табл. 4 приведены уравнения линейной регрессии, связывающие средневыборочные значения стока весеннего половодья с осадками за зимний и весенний климатические периоды и коэффициент талого стока со средней температурой за зимний период по наблюдениям в бассейне р. Волги. Статистический анализ также выявил отсутствие заметной корреляционной связи между объемом осадков за зимний и весенний периоды и средней зимней температурой.

Таблица 4. Зависимости слоя талого стока от выпавших за зимний и весенний климатические периоды осадков и зависимости коэффициента талого стока от средней температуры за зимний период в бассейне Волги

Пункты наблюдений за стоком	Зависимость слоя талого стока (y , мм) от суммы осадков за зимний (X_3 , мм) и весенний (x_B , мм) периоды	Зависимость коэффициента талого стока (k) от средней температуры за зимний период (T_3 , °C)
р. Молога – г. Устюжна	$y = 0,38 (X_3 + x_B) + 49 (R=0,8)$	$k = -0,038 T_3 + 0,34 (R=0,7)$
р. Ока – г. Калуга	$y = 0,23 (X_3 + x_B) + 22 (R=0,8)$	$k = -0,024 T_3 + 0,16 (R=0,9)$
р. Ока – г. Белёв	$y = 0,12 (X_3 + x_B) + 33 (R=0,7)$	$k = -0,032 T_3 + 0,03 (R=0,9)$
р. Ока – г. Муром	$y = 0,13 (X_3 + x_B) + 48 (R=0,8)$	$k = -0,015 T_3 + 0,23 (R=0,9)$
р. Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	$y = 0,24 (X_3 + x_B) + 16 (R=0,9)$	$k = -0,028 T_3 + 0,4 (R=0,7)$
р. Вятка – г. Киров	$y = 0,52 (X_3 + x_B) + 35 (R=0,9)$	$k = -0,029 T_3 + 0,36 (R=0,8)$
р. Вятка – г. Вятские Поляны	$y = 0,35 (X_3 + x_B) + 74 (R=0,9)$	$k = -0,021 T_3 + 0,45 (R=0,7)$
р. Кильмезь – д. Вичмарь	$y = 0,11 (X_3 + x_B) + 18 (R=0,6)$	$k = -0,023 T_3 + 0,2 (R=0,9)$
р. Быстрица – д. Шипицино	$y = 0,29 (X_3 + x_B) + 43 (R=0,9)$	$k = -0,013 T_3 + 0,34 (R=0,8)$
р. Молома – д. Спасское	$y = 0,25 (X_3 + x_B) + 94 (R=0,8)$	$k = -0,008 T_3 + 0,6 (R=0,6)$
р. Иньва – г. Кудымкар	$y = 0,22 (X_3 + x_B) + 65 (R=0,8)$	Зависимость отсутствует
р. Белая – г. Бирск	$y = 0,29 (X_3 + x_B) + 55 (R=0,8)$	Зависимость отсутствует
р. Кама – пгт Гайны	$y = 0,29 (X_3 + x_B) + 87 (R=0,8)$	Зависимость отсутствует
р. Дема – д. Бочкарева	$y = 0,19 (X_3 + x_B) + 25 (R=0,8)$	Зависимость отсутствует
р. Самара – с. Елшанка	$y = 0,42 (X_3 + x_B) + 42 (R=0,3)$	$k = -0,022 T_3 + 0,01 (R=0,6)$
р. Кубня – с. Чутеево	$y = 0,18 (X_3 + x_B) + 44 (R=0,7)$	$k = -0,029 T_3 + 0,2 (R=0,8)$
р. Бузулук – с. Перевозниково	$y = 0,19 (X_3 + x_B) + 2 (R=0,7)$	$k = -0,022 T_3 - 0,03 (R=0,7)$
р. Сок – ст. Сургут	$y = 0,09 (X_3 + x_B) + 46 (R=0,5)$	Зависимость отсутствует

Для расчета потерь талых вод на инфильтрацию в весенний период дополнительно использовалась физико-математическая модель тепло-влажнопереноса в промерзающих и оттаивающих почвах [6]. Модель позволяет учесть весь спектр физических свойств почв, а также природное многообразие гидрометеорологических условий, от которых зависят выше-названные процессы. На основании расчетов, выполненных для р. Медвенки (Подмосковная воднобалансовая станция), получено следующее уравнение, связывающее коэффициент стока со средней зимней температурой воздуха

$$y = -0,032 T_3 + 0,25. \quad (3)$$

Данное уравнение близко по своим параметрам уравнению, полученному на основе корреляционного анализа (табл. 4).

Таким образом, коэффициент, определяющий степень влияния температуры воздуха в зимний период на коэффициент стока, в среднем изменяется в пределах от $-0,02$ до $-0,03$ (табл. 4), т. е. при повышении температуры воздуха на 1°C коэффициент стока уменьшится на $0,02-0,03$. В проведенном анализе показатель, соответствующий коэффициенту стока равен $y/(X_3 + x_в)$. Например, для водосборов Верхней Волги среднее значение суммы осадков ($X_3 + x_в$) примерно равно 250 мм, а объем половодья – 100 мм. Уменьшение коэффициента стока на $0,02-0,03$, соответственно, приводит к падению стока на $5-7$ мм или на $5-7\%$. А это значит, что в долгосрочной перспективе потепление климата не окажет значительного влияния на сток весеннего половодья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки влияния климатических изменений на сток весеннего половодья и факторов его формирования в бассейне Волги было отобрано 107 рек. При выборе исследуемых створов использовали ряды с продолжительностью наблюдений 55 и более лет и минимальным числом пропусков в наблюдениях. Также не использовали данные по створам, выше которых расположены водохранилища сезонного или многолетнего регулирования.

Степень изменчивости основных характеристик весеннего стока рек бассейна Волги за период 1978–2010 гг. по отношению к предшествующему периоду 1948–1977 гг. оценивалась по разности средних значений характеристик стока за два периода. Исследования показали, что изменения весеннего стока носят разнонаправленный характер: на 70 % исследованных частных водосборах бассейна Волги наблюдается уменьшение слоя стока весеннего половодья, на 30 % – рост. Только на 35 % частных водосборов изменения стока статистически значимы.

Как показал анализ данных о максимальных расходах весеннего половодья для района Средней Волги, на 32 из 65 частных водосборах наблюдался рост максимальных расходов, для Нижней Волги рост отмечен лишь на одном водосборе из 25.

Величина талого стока зависит от достаточно широкого спектра гидрометеорологических, физических и физико-географических факторов, находящихся в сложной взаимообусловленности. В рамках данного исследования проанализировано влияние таких факторов как осадки в зимний период, максимальные снегозапасы, температура воздуха в зимний период, продолжительность зимнего периода, температура воздуха в весенний период, продолжительность половодья, осадки в весенний период, свойства подстилающей поверхности. Суммируя полученные результаты показано, что основными климатическими факторами, определяющими слой стока весеннего половодья, являются осадки, выпавшие за зимний и весенний периоды, а также температура воздуха зимнего периода. Рост величины осадков за последние 30 лет способствует увеличению объема весеннего половодья, а повышение температуры его уменьшению.

Свойства подстилающей поверхности определяют водопроницаемость почвы в весенний период и являются основными в перераспределении накопившейся в снежном покрове зимой влаги на поверхностную составляющую весеннего половодья и инфильтрационную (т. е. потери талого стока). Водопроницаемость мерзлой почвы речных водосборов определяется двумя основными характеристиками – увлажнением верхнего слоя почвы и степенью ее промерзания. Причем наблюдаемый в последние десятилетия рост увлажнения почв должен приводит к росту стока весеннего половодья. А уменьшение промерзания, связанное с потеплением климата, наоборот, к его падению. Однако анализ процесса формирования талого стока показывает, что прямую зависимость слоя талого стока от глубины промерзания выявить трудно. Эта зависимость косвенная, т. к. важнейшим фактором формирования талого стока является влажность мерзлого слоя почвы. Таким образом, факторы подстилающей поверхности являются промежуточным регулятором, они усиливают или уменьшают роль осадков или температуры воздуха и в конечном итоге определяют тенденцию изменения стока весеннего половодья.

Для расчетов и прогноза талого стока наиболее широко применяются данные о величине максимальных снегозапасов за зимний период и осадков за время половодья. Уравнения регрессии, связывающие слой стока с этими характеристиками, имеют довольно высокое значение коэффициента корреляции для некоторых водосборов. Однако использование снегозапасов и осадков за время половодья для долгосрочных прогнозов неприемлемо – достоверность прогноза данных характеристик очень низка. Поэтому в качестве основных предикторов для долгосрочного прогноза весеннего половодья предлагается использовать осадки за зимний и весенний климатические периоды, которые более прогнозируемы.

Коэффициент корреляции между объемом весеннего стока и зимней температурой воздуха довольно низкий, несмотря на существование дан-

ной связи. Исходя из того, что основной задачей долгосрочных прогнозов является выявление тренда весеннего половодья, а не расчет его ежегодных значений, при корреляционном анализе использованы не ежегодные значения стока и температуры, а усредненные данные за пятилетние периоды. Аналогичная методика применена и для расчетов связи величины весеннего стока с суммой осадков за зимний и весенний периоды. В результате получены более явные связи объема половодья с осадками и температурой для многих водосборов бассейна Волги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.А.* Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / коллективная моногр., рук. С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
2. *Калюжный И.А., Лавров С.А.* Глубина промерзания почв и подпочвенных грунтов в бассейне р. Волги при климатических изменениях за последний тридцатилетний период и методика ее расчета // Инженерные изыскания. 2015. № 3. С. 52–59.
3. *Лавров С.А., Калюжный И.А.* Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России. 2012. № 4. С. 74–84.
4. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.А., Павлова К.К.* Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 192 с.
5. *Калюжный И.А., Павлова К.К.* Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 159 с.
6. *Калюжный И.А., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. Экспериментальные исследования и моделирование. СПб.: Нестор-История, 2012. 616 с.
7. *Георгиевский В.Ю.* Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
8. *Комаров В.Д.* Весенний сток равнинных рек европейской части СССР. М.: Гидрометеиздат, 1959. 294 с.
9. *Лавров С.А.* Экспериментальные методы определения влагопроводности мерзлых почв // Тр. ГГИ. 1986. Вып. 322. С. 74–82.
10. *Змиева Е.С., Субботин А.И.* Пространственная неравномерность весеннего стока и потеря в речном бассейне // Тр. Гидрометцентра СССР. 1973. Вып. 113. С. 31–65.
11. *Комаров В.Д., Макарова Т.Т.* Исследование влияния глубины промерзания почвы и других факторов на талый сток рек степной и лесостепной зон // Метеорология и гидрология. 1972. № 8. С. 67–74.
12. *Кокорев В.А., Анисимов О.А.* Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменения климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем / под ред. Ю.А. Израэля. М.: Планета, 2013. С. 121–153.

Сведения об авторах:

Лавров Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; e-mail: lavrov@ecopro.spb.ru

Калюжный Игорь Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ГГИ), Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; e-mail: hfl@mail.ru