

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ЗИМНЕГО И ВЕСЕННЕГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

© 2012 г. С.А. Лавров, И.Л. Калюжный

Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург

Ключевые слова: сток рек, физические процессы, потепление климата.

На основе обобщения многолетних наблюдений выявлен механизм влияния климатических изменений на зимний и весенний сток рек бассейна Волги. Установлено, что основными факторами, влияющими на рост зимнего стока рек в последние десятилетия, являются: увеличение среднесуточной температуры воздуха; уменьшение глубины промерзания почвы и зимней миграции влаги к фронту промерзания; рост осеннего стока; а также рост количества зимних оттепелей.

В работах В.Ю. Георгиевского и И.А. Шикломанова [1] показано влияние климатических изменений последних десятилетий на формирование водных ресурсов России. Установлено, что особенностью их изменений является увеличение меженного стока, особенно зимнего, практически на всей территории страны. Наиболее четко рост зимнего стока (на 50–120 %) наблюдается на Европейской территории России (ЕТР) от верхней части бассейна Северной Двины до низовьев Дона и Волги. Статистические оценки позволяют проследить общие тенденции изменения стока во времени, но не раскрывают механизм данных изменений, а также физических процессов, обуславливающие характер реакции стока на изменение климата. Выполненные в 1970–2000 гг. полевые, лабораторные и теоретические исследования процессов формирования весеннего половодья [2, 3, 4,5] заложили фундаментальную основу для изучения механизма воздействия климата на зимний и весенний сток.

Основные физические факторы

При формировании зимнего стока существенную роль играют как условия увлажнения почв на водосборе осенью, так и изменение их влажности в зимний период. В этот отрезок времени происходят сложные процессы перераспределения влажности в профиле почвы, связанные в основном с замерзанием свободной, способной к передвижению влаги, морозной миграцией ее к фронту промерзания и аккумуляцией в мерзлом слое. Повышение зимней температуры приводит к уменьшению глубины промерзания почвы и соответственно к уменьшению зимней миграции влаги и общей аккумуляции влаги в мерзлой зоне. При этом растут дренирующие свойства почв и доля талой влаги, способной к участию в грунтовом стоке. Рост зимней температуры воздуха замедляет мерзлотные процессы на водосборе, вызывает рост зимнего стока, увеличение потерь на инфильтрацию и, наоборот, падение талого стока весной.

Помимо опосредованного влияния гидрофизических процессов на зимний сток, существенный вклад в величину стока вносят зимние оттепели, количество и продолжительность которых растет с повышением температуры воздуха. Во время оттепелей происходит снеготаяние и водоотдача из снежного покрова, формируется поверхностный сток. Эти процессы также приводят к уменьшению талого стока весной.

Следует также отметить и влияние на зимний сток факторов, не связанных с температурой, таких как уровень грунтовых вод и исходное осеннее увлажнение почв, т. е. основных факторов, определяющих бассейновые запасы влаги. Рост влажности в предзимний период, особенно в верхних горизонтах, с одной стороны, приводит к росту грунтовой составляющей стока, а с другой – к интенсификации процессов зимнего перераспределения влаги в почве, росту восходящих миграционных потоков к фронту промерзания, что оказывает неоднозначное опосредованное воздействие на сток.

Численные оценки влияния отдельных физических факторов на зимний сток

Из анализа процессов формирования зимнего стока следует высокая степень их взаимообусловленности и многофакторности. Особый интерес вызывают оценки вклада каждого фактора в изменчивость стока под влиянием климатических изменений.

В качестве объектов исследований нами были использованы гидрологические, метеорологические и почвенно-гидрологические наблюдения на следующих водосборах:

– Подмосковная воднобалансовая станция, бассейн р. Медвенки – выше впадения р. Закзы, площадь водосбора $F=21,5 \text{ км}^2$.

– Река Ока (г. Муром), $F=188 \text{ 000 км}^2$; р. Ока (г. Калуга), $F=54 \text{ 000 км}^2$; р. Ока (г. Белёв), $F=17 \text{ 500 км}^2$. Метеоданные по метеостанции Елатьма.

– Река Кострома (г. Буй), $F=8870 \text{ км}^2$; р. Кострома (с. Гнездилова), $F=800 \text{ км}^2$. Метеоданные по метеостанции Кострома.

– Река Вятка (г. Вятские поляны), $F=124 \text{ 000 км}^2$. Метеоданные по метеостанции Киров.

– Река Белая (г. Стерлитамак), $F=21 \text{ 000 км}^2$, р. Дёма (д. Бочкарёво), $F=12 \text{ 500 км}^2$. Метеоданные по метеостанции Уфа.

– Река Самара (с. Елшанка), $F=22 \text{ 800 км}^2$. Метеоданные по метеостанции Саратов.

В табл. 1 приведены данные о росте зимнего стока в январе и феврале в период с 1978 по 2004 гг. по сравнению с периодом 1946–1977 гг.

Как видно, на всех приведенных речных водосборах, находящихся в бассейне Волги, наблюдается значительный рост зимнего стока в последние десятилетия. В данной работе остановимся на оценках влияния трех основных, на наш взгляд, факторов обуславливающих этот рост: оттепелях, промерзании почв и предзимнем увлажнении водосбора.

Таблица 1. Рост среднемесячного стока (%) в январе-феврале за период 1978–2004 гг. по сравнению с периодом 1946–1977 гг.

<i>Река – пост</i>	<i>Январь</i>	<i>Февраль</i>
Самара – с. Елшанка	60	80
Ока – г. Муром	43	58
Ока – г. Калуга	56	69
Ока – г. Белёв	71	66
Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	72	91
Кострома – п. Буй	40	34
Кострома – с. Гнездилова	84	94
Белая – г. Стерлитамак	78	84
Вятка – г. Вятские Поляны	52	53
Дёма – д. Бочкарёва	85	85

Оттепели

Чтобы оценить вклад оттепелей в зимний сток была проведена сортировка суточных данных по стоку и температуре. Талый сток во время оттепелей, который характеризуется значительными всплесками по величине при положительных температурах воздуха, выделен в отдельную составляющую.

Остановимся на анализе данных наблюдений на Подмосковной воднобалансовой станции для оценки вклада оттепелей в зимний сток.

В результате получены следующие данные. Количество суток с положительной температурой в январе-феврале за период 1978–2008 гг. увеличилось с 71 до 269 по сравнению с периодом 1958–1977 гг.. Средняя величина стока в холодный период за 1958–1977 гг. без учета оттепелей составила 46,7 л/с, а с учетом оттепелей – 48, 4 л/с. Влияние оттепелей привело к увеличению стока на 3,6 %. За период 1978–2008 гг. средний сток без учета влияния оттепелей равен 74,1 л/с, а с учетом – 91,0 л/с. Вклад оттепелей составляет 35 % от величины стока за период 1958–1977 гг.

Был также выполнен статистический анализ связи величины доли оттепелей в среднемесечном стоке в январе-феврале с суммой положительных температур за эти месяцы. Формула связи величины стока вызванного оттепелями ($Y_{от}$) с суммой положительных суточных температур ($\sum T+$) в январе-феврале имеет вид:

$$Y_{от} = 0,08(\sum(T+))^2 - 0,91(\sum(T+) + 3,1) \quad R^2 = 0,88 \quad (1)$$

Как следует из полученных результатов, с конца семидесятых годов на всех исследуемых водосборах наблюдается значительный рост доли оттепелей в зимнем стоке. При этом, чем южнее водосборы, тем выше вклад оттепелей. В табл. 2 приведены данные о росте зимнего стока в период 1978–2004 гг. по сравнению с периодом 1952–1977 гг. за счет оттепелей. Погрешность расчета, по нашим оценкам, составляет ± 5 %.

Таблица 2. Данные о доле вклада (%) различных факторов в рост зимнего стока в период 1978–2004 гг. по сравнению с периодом 1952–1977 гг.

<i>Река – пост</i>	<i>Оттепели</i>	<i>Промерзание</i>	<i>Увлажнение</i>
Самара – с. Елшанка	41	6	53
Ока – г. Муром	37	31	32
Ока – г. Калуга	34	27	39
Ока – г. Белёв	40	27	33
Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	38	52	10
Кострома – п. Буй	39	52	10
Белая – г. Стерлитамак	20	31	49
Вятка – г. Вятские Поляны	22	31	47
Дёма – д. Бочкарёва	14	3	83

Предзимнее увлажнение водосбора

Предзимнее увлажнение водосбора характеризуется влажностью почв и уровнем грунтовых вод. К сожалению, данная информация носит отрывочный характер. Поэтому косвенными показателями предзимнего увлажнения могут быть такие характеристики, как осенние осадки и осенний сток

Из приведенных данных (табл. 3) следует, что в ноябре практически на всех исследуемых водосборах наблюдается значительный рост стока.

Дополнительную трудность представляет разделение факторов промерзания и увлажнения по степени влияния на зимний сток. Она возникает из-за того, что зачастую рост температуры воздуха сопровождается ростом осенних осадков и осеннего стока.

Для анализа связи между зимним (Y_3) и стоком в ноябре (Y_H) использовались отдельные выборки из рядов наблюдений за этими характеристиками при температурах воздуха с отклонением от средневыборочных не более чем на ± 1 °С.

Было получено линейное уравнение регрессии для р. Медвенка (2) при значениях средnezимней температуры $-8,3 \pm 1,0$

$$Y_3 = 0,2Y_H + 43,8 \quad R^2 = 0,79 \quad (2)$$

Таблица 3. Рост среднемесячного стока (%) в ноябре и осенних осадков за период 1978–2004 гг. по сравнению с периодом 1946–1977 гг.

<i>Река – створ</i>	<i>Ноябрь</i>	<i>Осенние осадки</i>
Самара – с. Елшанка	56,3	11,8
Ока – г. Муром	42,0	5,6
Ока – г. Калуга	39,8	
Ока – г. Белёв	49,6	
Медвенка – Подмосковная воднобалансовая станция	35,7	20,9
Кострома – п. Буй	8,2	0,4
Кострома – с. Гнездилова	–12,6	
Белая – г. Стерлитамак	65,5	0,5
Дёма – д. Бочкарёва	80,2	
Вятка – г. Вятские Поляны	46,2	6,1

Для водосбора р. Оки (г. Муром), связь зимнего стока с осенним более значимая. Уравнение регрессии для этого случая:

$$Y_3 = 0,2Y_H + 246,3 \quad R^2 = 0,92 \quad (3)$$

Однако на некоторых речных водосборах влияние зимней температуры на сток в этот период минимально. В качестве примера можно привести р. Дёму, для которой сток в холодные месяцы практически полностью определяется ноябрьским. Уравнение связи ноябрьского и зимнего стока для р. Дёмы имеет вид:

$$Y_3 = 0,72Y_H - 0,1 \quad R^2 = 0,90 \quad (4)$$

Данная закономерность получена для периода наблюдений 1950–2006 гг.

Используя полученные зависимости зимнего стока от стока в ноябре и полагая, что изменчивость последнего и определяет изменчивость предзимнего увлажнения, были рассчитаны доли вклада роста осеннего увлажнения в рост зимнего стока исследуемых нами водосборов (см. табл. 2).

Промерзание почв

Несмотря на существенную роль оттепелей и увлажнения водосбора в формировании зимнего стока в последнее время, их вклад в рост его величины в январе-феврале, например для водосбора р. Медвенки составляет только 48 % от общего роста среднего зимнего стока за последние десятилетия. Влияние на сток условий промерзания и предзимнего увлажнения выше – 52 %.

Отметив существенную связь среднемесячных значений стока в зимний период с температурой воздуха, были проанализированы гидрометеорологические данные Подмосковной воднобалансовой станции более подробно на суточном уровне. При этом была выявлена общая закономерность, из которой следует, что в большинстве случаев колебания среднесуточных значений стока синхронны во времени с колебаниями температуры, иногда с некоторым запаздыванием. В качестве примера на рис. 1 приведены графики посуточного хода стока и температуры воздуха в ноябре-апреле 1972 г. («холодная зима») и 1975 г. («теплая зима»). На графиках можно выделить относительно высокие пики в гидрографах стока, связанные с оттепелями или выпадением жидких осадков. Незначительные колебания стока, в пределах 10 % от его величины отмечаются и в холодный период и связаны с колебаниями отрицательной температуры воздуха.

Исходя из того, что процессы промерзания играют значительную роль в формировании зимнего стока, для более подробных исследований и количественных оценок этих процессов была использована разработанная нами физико-математическая модель процессов миграции и инфильтрации влаги в промерзающих и оттаивающих почвах [3].

Рассмотрим совместную динамику стока, температуры и расчетной глубины промерзания за 1972 и 1975 гг., отличающихся по условиям промерзания года (рис. 1).

Наряду с общей тенденцией уменьшения стока с увеличением глубины промерзания на посуточных гидрографах (рис. 1) заметен колебательный процесс, связанный с изменением температуры воздуха. На гидрографе 1971–1972 гг. по мере промерзания почв наблюдается постепенное отставание во времени характерных пиков стока от соответствующих им пиков колебания температуры. Это объясняется тем, что зимний сток, по нашему мнению, непосредственно связан с миграцией влаги от грунтовых вод к фронту промерзания. При этом колебания температуры на глубине, которые формируют поток миграции, всегда запаздывают с подобными колебаниями на поверхности почвы.

Используя математическую модель [3], были рассчитаны суточные потоки влаги от уровня грунтовых вод (УГВ) к фронту промерзания. Из полученных результатов следует, что временные колебания расчётных значений миграционного потока влаги в основном совпадают с тенденциями посуточного хода стока. Величина миграционного потока влаги, с одной стороны, определяется температурным режимом в зимний период, а с другой – уровнем грунтовых вод, т. е. увлажнением почвы. Рост температуры в зимний период может приводить к тому, что меняется направление потока влаги. Вместо восходящего миграционного потока при низком залегании грунтовых вод может наблюдаться нисходящий инфильтрационный поток под действием гравитации. Суммируя вертикальные потоки на глубине залегания грунтовых вод в течение года, мы можем проследить за динамикой запасов подземных вод.

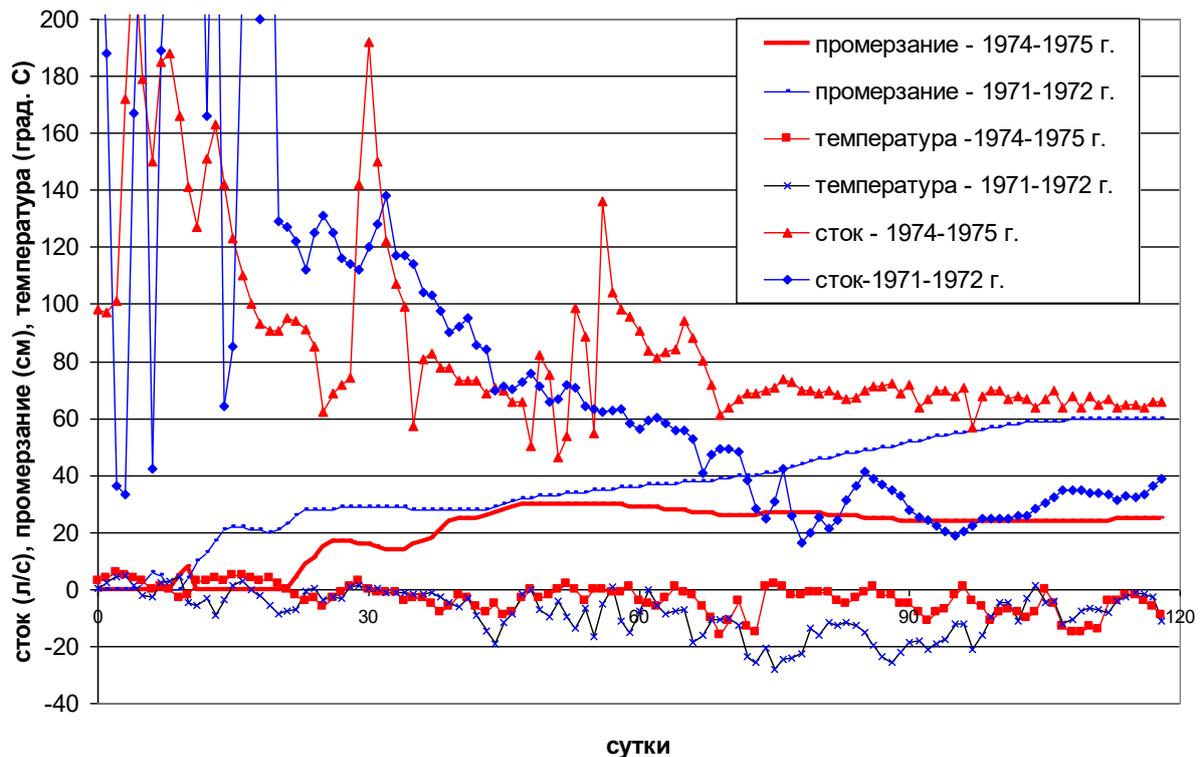


Рис. 1. Динамика среднесуточных значений расхода воды р. Медвенки – выше устья р. Закзы, температуры воздуха и глубины промерзания почв в ноябре-феврале 1971–1972 и 1974–1975 гг.

На рис. 2 приведен график связи расчетной глубины промерзания с величиной зимнего стока р. Медвенки выше устья р. Закзы, она носит нелинейный характер.

Наиболее значительное изменение стока происходит в период промерзания почвы, до глубины порядка 30 см, далее процесс замедляется. Данную тенденцию можно объяснить тем, что формирование зимнего стока на водосборе р. Медвенки в значительной степени обусловлено увлажненностью верхних горизонтов почвы, включая верховодку.

На реках северо-западной части бассейна Волги глубина промерзания почв значительно выше, чем на Подмосковной воднобалансовой станции. Этот фактор обуславливает более слабую зависимость зимнего стока от зимней температуры. Свободная влага из верхних горизонтов почвенного покрова (верховодка) в этом случае практически всегда замерзает, несмотря на процессы глобального потепления климата. Поэтому рост стока за счет данного фактора наблюдается гораздо реже. К тому же в более северных районах гораздо меньше количество оттепелей в зимний период.

В табл. 2 приведены данные о вкладе уменьшения промерзания водосбора в рост зимнего стока.

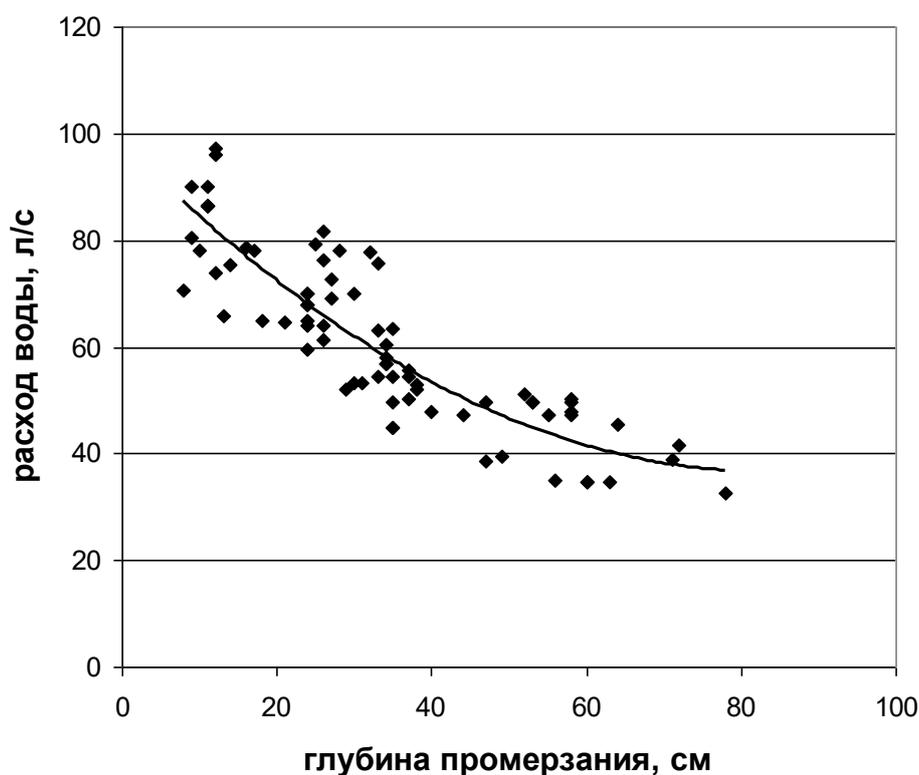


Рис. 2. Зависимость зимнего расхода воды р. Медвенки – выше устья р. Закзы от расчетных глубин промерзания.

Талый сток

Анализ динамики коэффициента талого стока за многолетний период наблюдений 1947–1987 гг. свидетельствует о его постоянном снижении за рассматриваемый период времени. При этом потери на инфильтрацию, наоборот, растут.

В процессе формирования талого стока определяющее значение имеет дефицит или избыток влаги в рассматриваемом слое по отношению к НВ (наименьшая влагоёмкость). Анализ изменения влагозапасов в метровом слое почвы в бассейне р. Медвенки за многолетний период 1955–1987 гг. в ноябре месяце показывает, что, в целом, осеннее увлажнение почвы увеличивается. Если в начальный период 1955–1975 гг. за 21 год в 10 случаях наблюдался дефицит почвенной влаги, от –8 до –92 мм, то за последующие 12 лет только в одном случае –1 мм. То есть дефицит влаги по отношению к НВ был практически полностью ликвидирован. Избытки запасов влаги в метровом слое почвы за этот период, изменяются в широких пределах: от +7 до +74 мм. Значительная их часть консервируется в мерзлом слое, способствует увеличению зимней миграции и во всех случаях участвует в формировании зимнего и весеннего стока.

В зависимости от слоя мигрирующей влаги происходят изменения структуры стока весеннего половодья. Суть этого явления заключается в том, что при увлажнении почвы до 0,7–0,8 НВ, а это происходит при объемах мигрирующей влаги в 35–40 мм и более, а также низких температурах приземного слоя воздуха, вероятность образования водонепроницаемого слоя в период весеннего половодья достаточно большая. Как следствие, потери талого стока становятся минимальными, преобладает поверхностная составляющая талого стока. Коэффициент талого стока приближается к 0,8–0,85. В этих условиях аккумулированная в мерзлом слое влага расходуется только в период половодья.

Зависимость коэффициента талого стока k от зимних приращений влаги (ΔW) в верхних горизонтах почвы бассейна р. Медвенки имеет вид:

$$k = 0,18\Delta W - 0,096 \quad R^2 = 0,76, \quad (5)$$

Выводы

Вполне определенно можно сказать, что на изменчивость зимнего стока в бассейне Волги влияют два основных фактора: осенние осадки (осенний сток) и температура воздуха в зимний период (промерзание, оттепели). Для районов бассейна с относительно низкой глубиной промерзания почв (менее 40 см) и относительно высоким залеганием грунтовых вод (менее 2 м) превалирующим фактом роста зимнего стока является рост зимних температур воздуха. И, наоборот, для районов со значительной глубиной промерзания (более 60 см) и глубиной залегания грунтовых вод (более 3 м) основную роль в повышении зимнего стока играют предшествующие зимнему периоду процессы, в частности, рост величины осадков и осеннего стока. В основном же для оценки изменчивости зимнего стока необходимо учитывать сочетание обоих факторов.

Суммируя полученные данные, для всех исследуемых водосборов можно сделать приближенный вывод о том, что в целом для бассейна Волги вклад каждого из трех рассмотренных факторов в рост зимнего стока составляет примерно треть.

Необходимо также иметь в виду, что оттепели и промерзание водосбора являются текущими, для конкретной зимы, факторами формирования зимнего стока. Увлажнение же во многом определяется предысторией, иногда многолетней, водного и температурного режима на водосборе. Поэтому увлажнение водосбора зачастую является комплексной характеристикой формирования зимнего стока, зависящей, как от многолетних осадков, так и от температуры в предыдущие зимние периоды. То есть, говоря о степени влияния увлажнения на сток текущего года, мы подразумеваем, прежде всего, степень влияния гидрометеорологических условий формирования стока за предыдущий период времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование /под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
2. Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 92–99.
3. Зарецкий Ю.А., Лавров С.А. Физико-математическое моделирование процессов теплогапопереноса в талых и мерзлых почвах // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 82–88.

4. Калюжный И.Л., Павлова К.К., Лавров С.А. Гидрофизические исследования при мелиорации переувлажненных земель. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 261 с.
5. Кучмент Л.С. Модели процесса формирования речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 143 с.

Данные об авторах:

Лавров Сергей Алексеевич, д. т. н., старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт», 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; e-mail: lavrov@ecopro.spb.ru

Калюжный Игорь Леонидович, к. т. н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Федеральное Государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт», 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; e-mail: hfl@mail.ru