


Влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки Волги)

С.А. Лавров  

 sergey_lavrov_50@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Влияние климатических изменений на поверхностный и подземный стоки невозможно объяснить без изучения процессов влагопереноса в почвах, являющихся составляющими влагообмена и определяющих механизмы формирования стока и его климатическую взаимообусловленность. В работе исследованы основные связи вертикального влагообмена в почвах с факторами окружающей среды – температурой воздуха, осадками, скоростью ветра и давлением водяного пара. На примере бассейна Волги рассмотрены изменения потоков влаги в почвах за последние десятилетия. **Методы.** Для раскрытия закономерностей влагообмена использована физически обоснованная математическая модель вертикального тепло-влагопереноса в почвах и снежном покрове. Проведены численные эксперименты по оценке влияния всех основных метеофакторов, обуславливающих многолетние изменения вертикальных потоков влаги в почвах за период 1952–2019 гг. **Результаты.** Расчеты показали, что в 1970-е годы произошли значительные изменения почвенных потоков влаги. Наблюдалось преимущественное увеличение нисходящих потоков и уменьшение восходящих, что при определенных метеоусловиях приводило к росту уровня грунтовых вод. В последние десятилетия рост нисходящих потоков почвенной влаги в бассейне Волги и, соответственно, уровня грунтовых вод замедлились.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: влагоперенос, испарение, инфильтрация, уровень грунтовых вод, климатические изменения, математическое моделирование.


Для цитирования: Лавров С.А. Влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки Волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 47–66. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-3.

Дата поступления 25.11.2020.

© Лавров С.А., 2021

THE EFFECT OF CLIMATIC CHANGES ON VERTICAL MOISTURE EXCHANGE IN SOILS (THE VOLGA RIVER BASIN AS AN EXAMPLE)

Sergey A. Lavrov  

 sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Significance. The effect of climatic changes on surface and underground runoff cannot be explained without studying such changes on such processes of moisture transfer in soils as infiltration, evaporation, migration of moisture to the frost front. These processes are components of moisture exchange in soils and almost completely determine the mechanisms of runoff formation and its climatic interconformity. The paper discloses the main links of vertical moisture exchange in soils with environmental factors such as temperature, precipitation, wind speed and water vapor pressure. On the example of the Volga basin, changes in moisture flows in soils over the past decades are considered. **Methods.** To reveal the patterns of moisture exchange, a physically sound mathematical model of vertical heat-moisture transfer in soils and snow cover was used. Numerical experiments were carried out to assess the impact of all the main weather factors that cause long-term changes in vertical moisture flows in soils for the period 1952-2019. **Results.** Calculations showed that in the 1970s there were significant changes in soil moisture flows. There was a preferential increase in downstream flows and a decrease in upstream flows, which under certain weather conditions led to an increase in the level of groundwater. In recent decades, the growth of descending soil moisture flows in the river basin. Volga and, accordingly, groundwater levels have slowed down.

Keywords: moisture transfer, evaporation, infiltration, winter migration of moisture, groundwater level, climatic changes, mathematical modeling, influence of weather factors

For citation: Lavrov S.A. The Effect of Climatic Changes on Vertical Moisture Exchange in Soils. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2021, No. 4. P. 47–66. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-3.

Received November 25, 2020.

ВВЕДЕНИЕ

Водный режим почв и, в частности, вертикальный влагообмен оказывают решающее влияние на гидрологические характеристики речных водосборов. Такие процессы влагопереноса в почвах, как инфильтрация, испарение, миграция влаги к фронту промерзания во многом отвечают за механизмы формирования поверхностного и подземного стоков и их взаимодействие.

В классических работах Г.Н. Высоцкого и А.А. Роде по гидрологии показано, что климат является основным фактором формирования водного режима почв [1, 2]. В этой связи возникает интерес к изучению влияния

наблюдаемых в последние десятилетия климатических изменений на влагообмен в почвенно-грунтовой толще.

В ряде выполненных в последние годы работ даны оценки влияния климатических изменений на испарение и процессы влагообмена в почвах в зимний и весенний периоды [3–6]. Показано, что с конца 1960-х годов начались значительные изменения вышеперечисленных характеристик. Однако эти исследования проводились отдельно для каждой характеристики (испарение, миграция влаги и т. д.), а также без учета взаимообусловленности всех гидрофизических процессов в течение климатического года.

В реальных условиях водный режим почв формируется не только в течение года, а зачастую и многолетнего периода. Это затрудняет исследование водного режима в совокупности определяющих его процессов. Тем не менее, есть показатель, определяющий тенденции и закономерности развития во времени всех процессов влагообмена в почвах. А именно – вертикальный поток почвенной влаги, направление и величина которого характеризуют испарение, инфильтрацию и миграцию влаги в талых и мерзлых почвах. При этом интегральное значение потока вблизи уровня грунтовых вод (УГВ) в значительной степени определяет динамику данной характеристики. В представленной работе основное внимание уделено оценкам влияния климатических изменений на потоки почвенной влаги.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Физико-математическое моделирование вертикального тепло-влажнопереноса в почвах. Упомянутые выше исследования [3–6] по оценке влияния климатических изменений на характеристики водного режима почв проводились на основе натурных наблюдений за испарением и стоком на станциях Росгидромета. При изучении динамики потоков влаги в почвенном покрове основными наблюдаемыми характеристиками являются влажность почвы и уровень грунтовых вод. По данным о влажности почвы можно определить тенденции изменчивости внутрипочвенных потоков. Тем не менее, учитывая, что подобные наблюдения носят отрывочный характер, реализовать данный метод невозможно. Наблюдения за УГВ зачастую более регулярны. Однако данные наблюдений характеризуют не только вертикальный влагообмен, но и динамику горизонтальных потоков грунтовой влаги, которые в значительной степени зависят от рельефа и распределения свойств подстилающей поверхности водосбора. В совокупности это затрудняет исследование влияния климатических факторов на поток внутрипочвенной влаги. Поэтому в данной работе основным методом исследований является физико-математическое моделирование процессов вертикального тепло-влажнопереноса в почвенном покрове на основе

разработанной математической модели, подробно описанной в работе [7]. Обозначим лишь основные уравнения и подходы.

Для описания процессов вертикального переноса влаги и тепла в почвах в течение климатического года применяли следующие уравнения:

$$\left(c + \rho_B L \frac{\partial W_{H3}(T)}{\partial T} \vartheta + L_w \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_B L \frac{\partial W}{\partial t} \vartheta \alpha = \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda_s + L_w K_V^T) \frac{\partial T}{\partial z} + L_w K_V^\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_W^T + K_V^T) \frac{\partial T}{\partial z} + (K_W^\Psi + K_V^\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) \right] + S_R, \quad (2)$$

$$c = \rho_B c_B + \rho_A c_A + \rho_{II} c_{II} (1-P), \quad (3)$$

$$\vartheta = \begin{cases} 0; & \text{при } T \geq 0 \\ 0; & \text{при } T < 0 \text{ и } W \leq W_{H3}(T), \\ 1; & \text{при } T < 0 \text{ и } W > W_{H3}(T) \end{cases} \quad (4)$$

где L – теплота фазового превращения вода–лед;

L_w – теплота фазового превращения вода–пар;

T – температура почвы;

W – влажность почвы;

W_{H3} – содержание незамерзшей влаги в мерзлой почве;

Ψ – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;

λ – коэффициент теплопроводности почв;

K_W^Ψ, K_V^Ψ – изотермические коэффициенты переноса жидкой воды и пара;

K_W^T, K_V^T – коэффициенты термопереноса жидкой влаги и пара;

c_B, c_A, c_{II} – удельные теплоемкости воды, льда и скелета почвы;

$\rho_B, \rho_A, \rho_{II}$ – их плотности соответственно;

ρ_v – плотность пара;

t, z – время и вертикальная координата.

В зимний период уравнения тепло-влажноперееноса в почвах состыкованы с уравнениями, описывающими динамику тепла и влаги в снежном покрове. Используются следующие уравнения сохранения массы и энергии:

$$\frac{\partial \lambda_c}{\partial t} = \frac{P_N}{\eta_c} + \frac{\partial W_c}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_c \frac{\partial P_c}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial W_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial \Psi_c}{\partial z} - K_c \right), \quad (6)$$

$$c_c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial z} + R_c \right) + c_c \left(K_c \frac{\partial \Psi_c}{\partial z} - K_c \right) \frac{\partial T}{\partial z} - L_B \frac{\partial W_c}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

$$c_c = \rho_A \Lambda_c c_A + \rho_B W_c c_B, \quad (8)$$

где Λ_c , W_c – объемное содержание твердой и жидкой фаз воды в снеге;

P_c – концентрация насыщенного пара в снеге;

M_{BL} – масса фазового превращения воды в лед в единице объема;

M_{PL} – масса фазового превращения пара в лед в единице объема;

P_N – давление вышележащих слоев снега;

Ψ_c – потенциал талой влаги в снежном покрове;

K_c – коэффициент влагопроводности снега;

λ_c – эффективная теплопроводность снега.

Уравнение (5) описывает изменения плотности твердой фазы воды в снеге в процессе замерзания-таяния, конденсации-испарения и оседания. Уравнение (6) – поток жидкой влаги в талом снеге. Уравнение сохранения энергии (7) записано в универсальном виде, пригодном для расчета потоков тепла в сухом, талом и слоистом снеге. В разработанной математической модели основными уравнениями для расчета суммарного испарения, включающего транспирацию и физическое испарение с почвы и снежного покрова, являются уравнения теплового баланса и турбулентной диффузии [7]. Комплекс параметров, входящих в уравнения (1) – (8) подробно описан и определен в работах [7, 8].

Для численной реализации исходной системы уравнений использован метод конечных разностей. Разностные уравнения решали методом прогонки. Для оптимизации решения системы разностных уравнений, разработаны алгоритмы с переменными значениями шагов по координате и времени.

В качестве исходной информации для математического моделирования использованы суточные значения метеоэлементов (температура воздуха, осадки, скорость ветра, влажность воздуха). Для задания радиационных характеристик применялись расчетные методы и данные об облачности. Однако такой важный показатель, как интенсивность выпадения осадков, оставался неопределенным. Варьируя этим параметром, а именно длительностью выпадения осадков, моделировали различные условия формирования инфильтрационной составляющей стока.

В качестве выходной информации при моделировании рассчитывали следующие характеристики, относящиеся к точке водосбора. В холодный период определялись глубина промерзания почвы, плотность снега и его высота, запас воды в снеге, испарение и величина водоотдачи со снежного покрова, объем инфильтрационной составляющей талого стока и коэффи-

циент талого стока. В теплый период рассчитывали испарение с поверхности почвы и транспирацию, инфильтрационную составляющую и коэффициент дождевого стока. При этом выводилась информация о влажности и температуре почвы и снега с шагом 1 см по вертикали, уровне грунтовых вод и потоках влаги вблизи УГВ. Расчетный шаг составлял 1 ч.

Основные расчеты выполнены для супесчано-суглинистых почв: плотность почвы 1,4–1,5 г/см³, величина наименьшей влагоемкости (НВ) 0,15–0,22 долей объема, влажности завядания (ВЗ) 0,05–0,10 долей объема. Для исследования использовали метеоданные за период с 1952 по 2019 гг. для станций, расположенных в бассейне р. Волги.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потоки влаги в почвах формируются под действием инфильтрации дождевых осадков и испарения почвенной влаги в летне-осенний период, а также процессов миграции влаги к фронту промерзания и инфильтрации талых вод в зимне-весенний период. На рис. 1 показаны типичные результаты расчетов внутригодовой динамики вертикальных потоков влаги на глубине залегания грунтовых вод. Приведены результаты математического моделирования для климатических условий Подмосковной воднобалансовой станции в 1956 и 1991 гг. при постоянном уровне грунтовых вод 150 см. Положительные величины потоков соответствуют направлению вглубь почвенного покрова, отрицательные – к поверхности почвы.



Рис. 1. Внутригодовая динамика вертикальных потоков влаги в почвах.

Fig. 1. Inter-year dynamics of the moisture vertical streams in soils.

Несмотря на различие в данных расчета, прослеживаются общие закономерности. Наблюдается явный рост величины потоков к поверхности грунтовых вод в весенний и осенний периоды, что обусловлено таянием снежного покрова и ростом осадков. Однако абсолютные значения потоков зависят от конкретных климатических условий, в данном случае, нас интересует влияние климатических условий на многолетнюю динамику потоков в почвах, формирующих ее влагосодержание и уровень залегания грунтовых вод.

Для оценки изменчивости потоков влаги в почвенном покрове в проведенном исследовании использовались данные расчета интегральных нарастающих потоков влаги на глубине вблизи УГВ. Суммирование проводилось с шагом 1 ч. Информация о нарастающих значениях потоков выводилась в конце каждого года. Расчеты проводили для условий постоянного УГВ и переменного, вызванного притоком и оттоком почвенной влаги. При преимущественном оттоке влаги от поверхности грунтовых вод, вызванном испарением и миграцией влаги к фронту промерзания, над потоками сформированными инфильтрацией талых и дождевых вод наблюдается рост отрицательных значений интегрального потока, а при обратных условиях – положительных значений. Данный показатель тесно связан с динамикой УГВ.

Интегральный поток формируется под действием испарения и миграции влаги, уменьшающих его величину, а также инфильтрации дождевых и талых вод, ведущих к его росту. При определенных условиях данный показатель может поменять знак, т. е. понижение уровня грунтовых вод может смениться повышением. Такая динамика УГВ характерна для периодически промывного типа водного режима. Подобные условия могут быть реализованы для климатических условий некоторых районов бассейна р. Волги.

Как отмечено выше, при моделировании использовались среднесуточные значения метеоэлементов. Однако неопределенным был такой важный показатель, как интенсивность выпадения осадков, в значительной степени определяющий величину инфильтрации. Варьируя таким параметром, как длительность выпадения осадков (задавалась постоянной на весь период расчета), мы смоделировали условия, при которых баланс вертикальных потоков влаги в почвах мог смещаться как в сторону преимущественного понижения УГВ, так и его повышения. На рис. 2 приведена динамика интегральных потоков влаги для метеоусловий на метеостанциях бассейна р. Волги, включая ст. Ивдель (бассейн р. Обь, граничащий с северо-восточной частью Волжского бассейна).



Очевидно, что климатические изменения, произошедшие в период 1970–1980 гг. на станциях (ст.) Москва, Кострома и Ивдель, привели к ситуации, когда понижение УГВ может смениться его повышением. При этом для ст. Москва и ст. Ивдель повышение нисходящих почвенных потоков наблюдается до настоящего времени, для ст. Кострома в 1990-е годы повышение потоков и УГВ сменилось понижением. Для метеословий Тамбова с начала 1970-х годов прекратилось падение уровня грунтовых вод, но их заметного повышения не произошло, а в начале 2000-х вновь началось падение УГВ. Результаты расчетов, проиллюстрированные на рис. 2, соответствуют полученным ранее данным о заметном изменении величины испарения, а также зимнего и минимального стока в эти же периоды [3, 5].

Расчеты проводились для условий с постоянным и переменным УГВ, а также при различных интенсивностях выпадения осадков. На рис. 3 отражены результаты моделирования динамики интегральных потоков влаги и уровня грунтовых вод для метеословий Москвы. Рассмотрены варианты для постоянного значения УГВ равного 150 см и переменного, вызванного притоком и оттоком влаги к поверхности. Интенсивность задавалась длительностью выпадения осадков (t_{oc}).

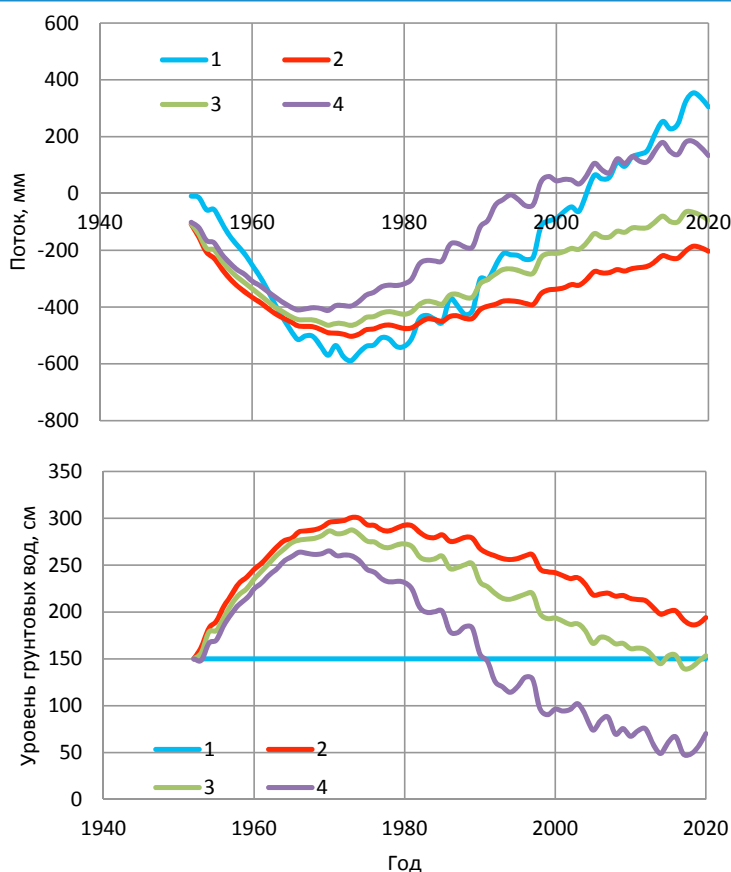


Рис. 3. Многолетняя динамика интегральных потоков влаги и уровня грунтовых вод в почвах: 1 – УГВ постоянный, длительность выпадения осадков $t_{OC} = 2$ ч; 2 – УГВ переменный, $t_{OC} = 1$ ч; 3 – УГВ переменный, $t_{OC} = 2$ ч; 4 – УГВ переменный, $t_{OC} = 4$ ч.

Fig. 3. Many-year dynamics of the moisture integral flows and the ground water level in soils: 1 – the ground water level is stable, the precipitation duration $t_{OC} = 2$ hours; 2 – the ground water level is variable, $t_{OC} = 1$ hour; 3 – the ground water level is variable, $t_{OC} = 2$ hour; 4 – the ground water level is variable, $t_{OC} = 4$ hour.

Из результатов моделирования следует, что при переменном УГВ тренды изменения потоков влаги меньше, чем при постоянном. Это объясняется тем, что при оттоке влаги от поверхности грунтовых вод вертикальный градиент почвенной влаги уменьшается, а при притоке – увеличивается. Данный тренд приводит к изменениям потока зимней миграции влаги, испарения и, в конечном итоге, уровня грунтовых вод, т. е. глубина залегания УГВ является регулирующим фактором динамики потоков почвенной влаги.

Рост интенсивности выпадения осадков (рис. 3) приводит к заметному уменьшению фильтрационной составляющей почвенных потоков, но общая картина их динамики не меняется и в период 1970–1980 гг. происходит смена направления изменения уровня УГВ. На рис. 4 приведены графики динамики уровня грунтовых вод, рассчитанной по разработанной модели и наблюдаемой на Подмосковной воднобалансовой станции в скважине № 133. Общий характер изменчивости обоих вариантов практически идентичен.

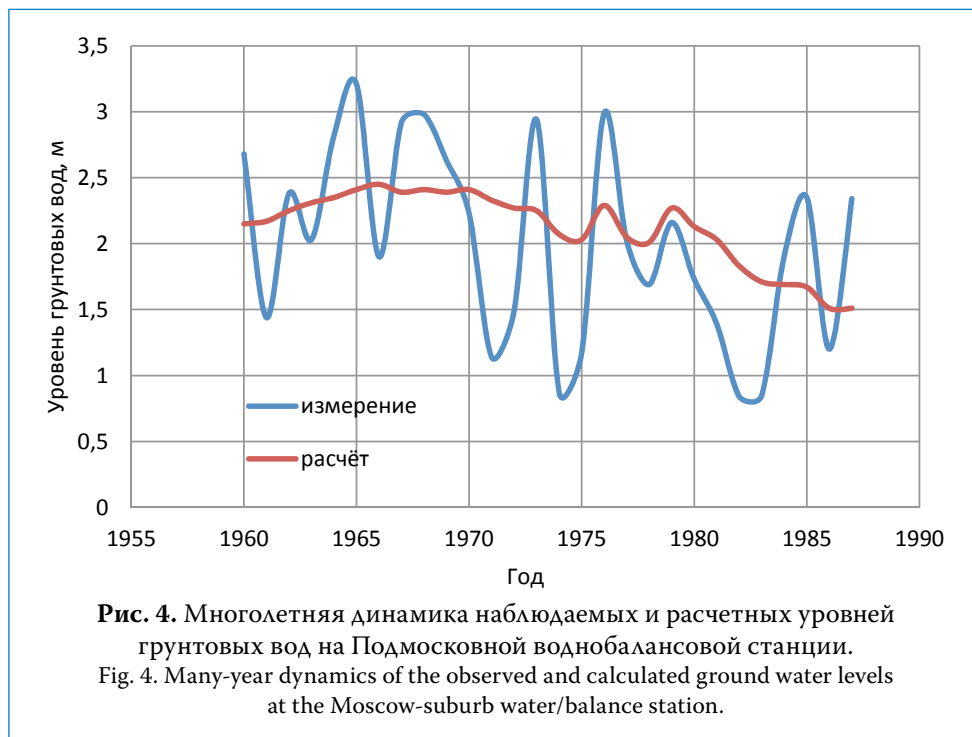
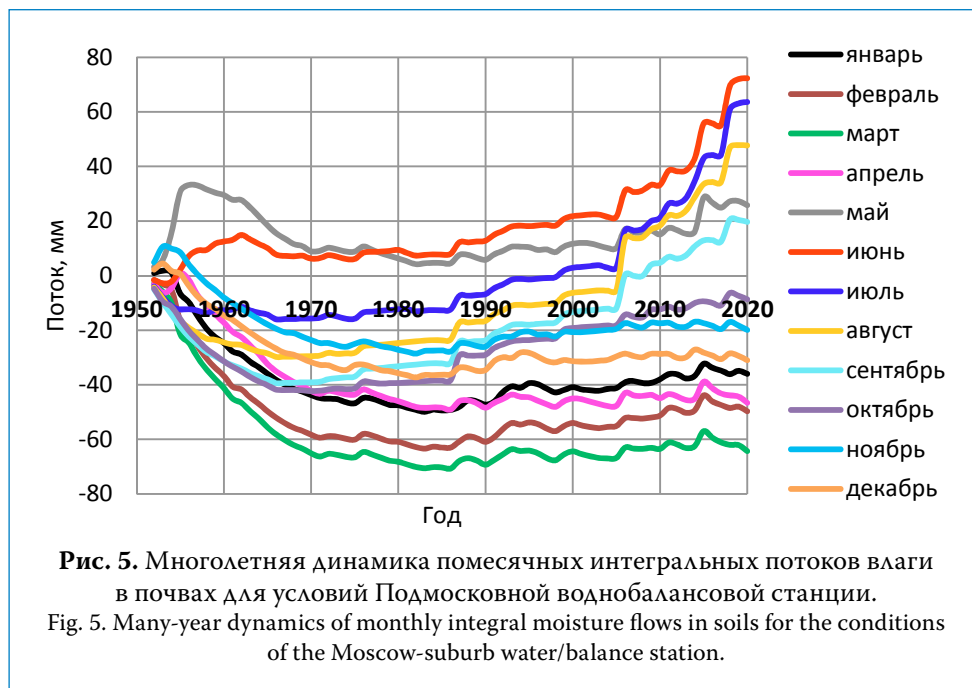


Рис. 4. Многолетняя динамика наблюдаемых и расчетных уровней грунтовых вод на Подмосковной воднобалансовой станции.

Fig. 4. Many-year dynamics of the observed and calculated ground water levels at the Moscow-suburb water/balance station.

Результаты расчетов (рис. 2, рис. 3) отражают интегральный характер изменения потоков в течение года. Однако в различные климатические периоды потоки формируются под воздействием метеоусловий в основном только данного периода. Поэтому были рассчитаны нарастающие интегральные величины потоков влаги в почвах для каждого месяца (рис. 5). Изменение направления потоков влаги произошло не только в зимние месяцы, как указывалось в работах [3, 4], но и в другие климатические сезоны (рис. 5). Уменьшение потоков миграции влаги к фронту промерзания в холодный период объясняется ростом зимней температуры воздуха в конце 1970-х годов. При этом рост нисходящих потоков в теплый сезон в

1970–1980 гг. можно объяснить преобладающим ростом инфильтрации над испарением, т. е. ростом осадков. Однако в связи с полученными результатами необходимо более подробно изучить влияние изменчивости всех метеофакторов в различные климатические сезоны на вертикальные потоки влаги в почвах.



Для исследования влияния климатических факторов на величину почвенных потоков влаги проведены численные эксперименты на основе описанной выше математической модели. Выполнены оценки чувствительности расчетной величины интегральных потоков к изменению температуры воздуха, интенсивности осадков, давления пара и скорости ветра на высоте 2 м, а также радиационного баланса поверхности почвы.

Не останавливаясь подробно на основных тенденциях изменения климата, отметим, что многочисленные исследования констатируют следующее: в последние десятилетия для Европейской территории России наблюдаются положительные тренды у таких метеоэлементов, как температура воздуха, осадки, облачность и давление пара [9–11]. Значительный отрицательный тренд выявлен у скорости ветра [5, 6] и небольшой отрицательный – у потока солнечной радиации [5]. С учетом вышеуказанных тенденций в исследовательских целях естественные тренды метеоэлементов были изменены:

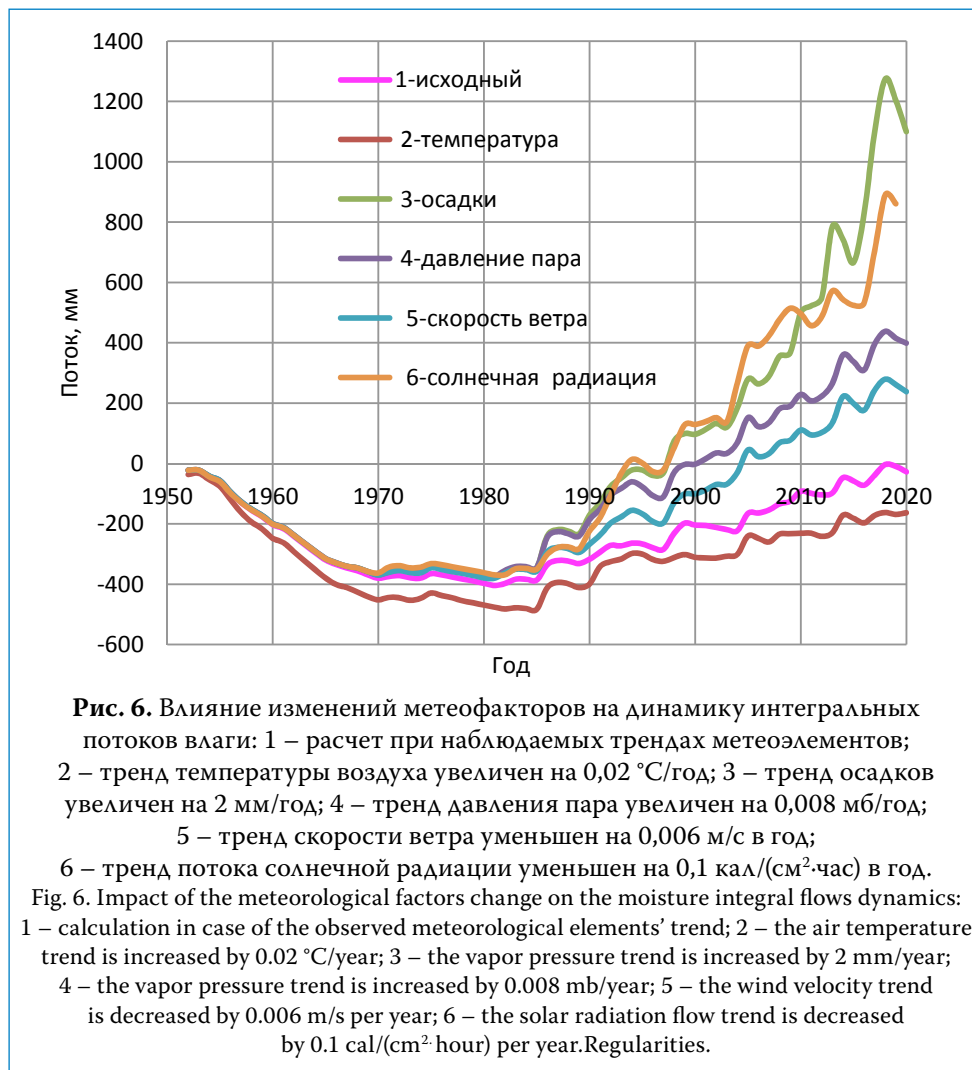
тренд температуры воздуха увеличен на $0,02$ °C/год; осадков – на 2 мм/год; тренд давления пара увеличен на $0,008$ мб/год; скорости ветра уменьшен на $0,006$ м/с в год; поток солнечной радиации уменьшен на $0,1$ кал/(см²·час) за год, т. е. естественные тренды были немного усилены.

На рис. 6 представлены результаты влияния изменений вышеуказанных метеофакторов на динамику интегральных потоков влаги для метеоусловий, характерных для ст. Москва. Как следует из полученных данных, рост осадков и парциального давления водяного пара, а также уменьшение скорости ветра и потока солнечной радиации приводят к росту величины нисходящих потоков влаги и, соответственно, увеличению запасов грунтовых вод. Повышение температуры, наоборот, к уменьшению УГВ.

Рассмотрим подробнее физические механизмы влияния каждого метеофактора на потоки почвенной влаги. Температура воздуха оказывает решающее влияние на направленность многих гидрофизических и теплофизических процессов в почвах. В результате повышение температуры в одних случаях приводит к пополнению запасов грунтовых вод, в других – к их расходу. В зимний период рост температуры уменьшает глубину промерзания, и, соответственно, отток влаги от поверхности грунтовых вод в процессе морозной миграции влаги. Уменьшение глубины промерзания приводит к повышению инфильтрационной способности почв и более интенсивному пополнению запасов грунтовых вод в весенний период. Однако рост температуры повышает интенсивность испарения снега, уменьшая его высоту, что ведет к понижению объема талой влаги и ее доли, поглощенной почвой в весенний период. Таким образом, инфильтрационный приток талых вод в нижние горизонты почвы также понижается. Дополнительным фактором понижения инфильтрационной составляющей является рост интенсивности снеготаяния, вызванный повышением температуры. К тому же, более низкие восходящие потоки миграции влаги в мерзлую зону в итоге приводят и к более низким нисходящим потокам при ее протаивании.

Как показывают модельные расчеты, в сумме повышение температуры приводит к замедлению процесса понижения уровня грунтовых вод в зимний период и к более высоким уровням по окончанию снеготаяния. На рис. 7 представлены результаты оценки влияния повышения температуры воздуха на динамику интегрального потока влаги в зимне-весенний период. Тренд температуры воздуха увеличен на $0,02$ °C/год. При этом в летне-осенний сезон температура оставалась исходной. Как видно, влияние носит обратный характер по сравнению с суммарным эффектом изменения температуры в течение года, результаты которого представлены на рис. 6. Объяснение данному несоответствию можно найти, рассмотрев процессы формирования почвенных потоков влаги в летне-осенний период. Основ-

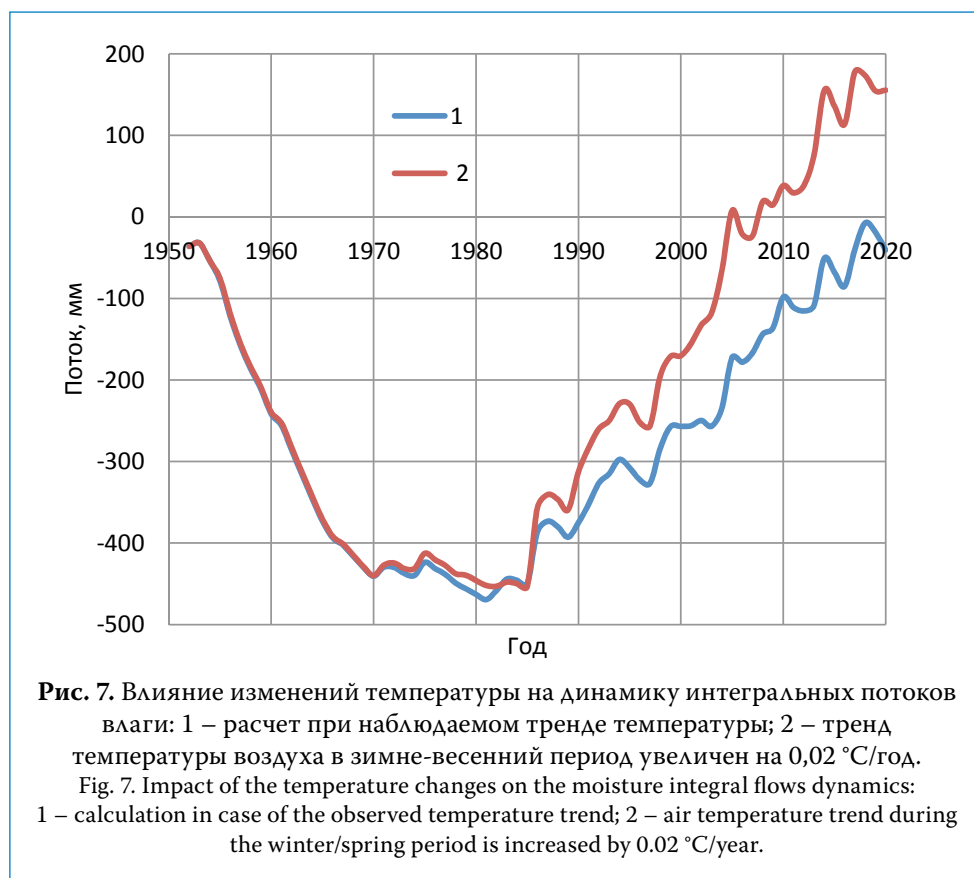
ным процессом, подверженным изменениям температуры в этот период, является испарение с поверхности почвы, которое существенно возрастает при повышении температуры воздуха [5], что в итоге приводит к преимущественному падению величины интегральных потоков в течение всего климатического года.



Кроме прямого влияния температуры на гидрофизические процессы и водный баланс почвенной влаги, есть и косвенное влияние: повышение температуры сокращает холодный период и увеличивает теплый. Соответ-

ственно, происходит перераспределение осадков между этими периодами. В результате данный фактор может увеличить величину нисходящих потоков влаги, но в большей степени это зависит от реального перераспределения осадков под воздействием климатических изменений.

В последние десятилетия наблюдается рост осадков в течение всего климатического года [9, 10], который приводит к росту инфильтрационной составляющей потока влаги как в зимне-весенний, так и летне-осенний периоды. Как показывают модельные расчеты, с ростом осадков увеличивается уровень грунтовых вод (рис. 6).



Повышение давления пара и уменьшение скорости ветра понижают величины испарения с почвы в теплый период года. Это уменьшает восходящие потоки влаги. В холодный период понижается испарение и за счет этого повышается запас воды в снеге и инфильтрационная составляющая, что

обуславливает положительную тенденцию повышения уровня грунтовых вод. Влияние понижения потока солнечной радиации во многом аналогично влиянию понижения температуры воздуха.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что современные тенденции изменения климатических характеристик приводят к преимущественному росту нисходящих потоков влаги в почвах и в итоге к росту УГВ.

В проведенных численных экспериментах при изменении одного из метеорологических факторов другие оставались неизменными. В реальных природных условиях изменение, например, температуры воздуха влечет за собой и изменение осадков, давления пара и др. Поэтому, говоря только о влиянии потепления на гидрофизические процессы, мы должны понимать, что за этим кроется изменчивость и влияние всего комплекса метеословий на данные процессы.

Как следует из результатов расчетов (рис. 2–6), многолетние тренды интегральных потоков в последние десятилетия невелики и составляют порядка 10–20 мм в год. Интересно сравнить данный показатель с изменчивостью основных характеристик, обуславливающих влагообмен в почвах. В таблице приведены типичные результаты модельных расчетов для метеословий некоторых станций бассейна Волги. В качестве анализируемого показателя используется разница среднемноголетних характеристик за 1979–2019 гг. по сравнению с 1952–1978 гг. Выбор данных периодов обусловлен предыдущими исследованиями в области влияния климатических изменений на гидрологические характеристики [3–6].

Как следует из результатов моделирования, в последние десятилетия наблюдается рост основных характеристик, определяющих баланс интегральных потоков влаги в почвах, – инфильтрации талой воды и дождевых осадков, испарения в летне-осенний период. При этом рост инфильтрации способствует росту УГВ, а испарения – уменьшению запасов грунтовых вод. Однако общий баланс потоков влаги способствует росту УГВ. Часть этого положительного баланса расходуется на повышение влажности почвы, которое также наблюдается при моделировании многолетней динамики влагопереноса.

Расчеты показывают, что для метеословий Костромы и Москвы вклад инфильтрационной составляющей талой влаги в рост интегральных потоков превышает аналогичную составляющую дождевых осадков (таблица). Повышению инфильтрации талой воды в весенний период способствуют три основных фактора: рост осадков за холодный период, уменьшение испарения с поверхности снежного покрова и уменьшение коэффициента талого стока, обусловленные снижением глубины промерзания.

Таблица. Изменчивость некоторых гидрофизических характеристик за период 1979–2019 гг. по сравнению с 1952–1978 гг.
Table. Variability of some hydrophysical characteristics over the 1979–2018 period in comparison with the 1952–1978 period

Зимне-весенние характеристики	Разность между средними значениями за периоды 1979–2019 гг. и 1952–1978 гг.	Летне-осенние характеристики	Разность между средними значениями за периоды 1979–2019 гг. и 1952–1978 гг.
Ивдель			
Осадки за холодный период, мм	6	Осадки за теплый период, мм	55
Инфильтрация талой воды, мм	2	Инфильтрация дождевых осадков, мм	46
Испарение со снега, мм	-6	Испарение с почвы, мм	35
Глубина промерзания, см	-12	Влажность почвы, доли объема	0,01
Кострома			
Осадки за холодный период, мм	37	Осадки за теплый период, мм	25
Инфильтрация талой воды, мм	14	Инфильтрация дождевых осадков, мм	20
Испарение со снега, мм	-6	Испарение с почвы, мм	14
Глубина промерзания, см	-21	Влажность почвы, доли объема	0,02
Москва			
Осадки за холодный период, мм	27	Осадки за теплый период, мм	36
Инфильтрация талой воды, мм	27	Инфильтрация дождевых осадков, мм	17
Испарение со снега, мм	-18	Испарение с почвы, мм	20
Глубина промерзания, см	-17	Влажность почвы, доли объема	0,03

Неожиданно большой вклад в рост уровня грунтовых вод дает испарение с поверхности снежного покрова. Расчеты показали, что в начале 1970-х годов резко упало испарение, зачастую этот процесс сменился конденсацией. В результате объем водоотдачи со снежного покрова вырос на величину большую, чем рост осадков. Согласно расчетам, в теплый период года также наблюдается повышение инфильтрационной составляющей дождевых осадков. В первую очередь, это обусловлено ростом осадков, однако испарение также растет. При этом баланс (разница между величинами роста инфильтрации и испарения) для ст. Ивдель составляет 11 мм, для ст. Кострома – 6 мм, а для ст. Москва – 3 мм. Соответственно, рост инфильтрационной составляющей талой влаги в весенний период составил 2 мм, 14 мм и 27 мм. Из этого следует, что вклад процессов, формирующих рост потоков влаги в зимне-весенний период, для метеоусловий Костромы и Москвы за последние годы превалирует над вкладом аналогичных процессов в теплый период года. Для ст. Ивдель, наоборот, превалируют процессы, увеличивающие УГВ в летне-осенний период. Последнее объясняется преимущественным ростом осадков в теплый период над аналогичным ростом зимних осадков.

ВЫВОДЫ

На основе физически обоснованной математической модели проведены детальные численные расчеты многолетней динамики вертикальных потоков влаги в почвах. Исследовано влияние на величину потоков основных климатических факторов – температуры воздуха, осадков, влажности, скорости ветра и солнечной радиации. По результатам математического моделирования получены следующие оценки изменений вертикальных потоков влаги в почвах за период 1952–2019 гг.:

На территории бассейна р. Волги с начала 1970-х годов отмечается преимущественное увеличение нисходящих потоков влаги и уменьшение восходящих, а при определенных метеоусловиях – рост уровня грунтовых вод.

Численные эксперименты показали, что современные тренды климатических факторов, а именно – рост осадков и парциального давления водяного пара, уменьшение скорости ветра и потока солнечной радиации – приводят к росту величины нисходящих потоков влаги и, соответственно, увеличению запасов грунтовых вод. Повышение температуры, наоборот, уменьшает уровень грунтовых вод.

Рост уровня грунтовых вод в зимний период с начала 1970-х годов обусловлен падением потоков миграции влаги к фронту промерзания, в весенний период – ростом инфильтрационной составляющей талой воды. В летний период положительный тренд уровня грунтовых вод можно объ-

яснить, прежде всего, превалярованием инфильтрации над испарением. Расчеты показывают, что при одних метеоусловиях наблюдается преимущественный рост потоков влаги в зимне-весенний период, при других – в теплый период года.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что многолетние тренды интегральных потоков почвенной влаги невелики и составляют 10–20 мм в год. Ввиду этого, даже незначительные климатические изменения могут поменять знак этих трендов и существенно повлиять, например, на динамику уровня грунтовых вод.

Результаты математического моделирования показали, что рост нисходящих потоков почвенной влаги в бассейне р. Волги и, соответственно, уровня грунтовых вод в последние десятилетия замедлились, а в некоторых случаях приобрели обратный тренд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоцкий Г. Н. Избранные труды. М.: Сельхозгиз, 1960, 435 с.
2. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 663 с.
3. Калюжный 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.
4. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
5. Лавров С.А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 1. С. 4–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.
6. Сперанская Н.А., Цыценко К.В. Изменения основных элементов влагооборота суши на Европейской части России. Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 3. С. 103–121.
7. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. 2012, СПб.: Нестор-История. 615 с.
8. Лавров С.А., Курбатова Ю.А. Математическое моделирование тепловлагообмена и потоков CO₂ на поверхности верхового болота. Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 631–642.
9. Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Жильцова Е.А., Захарова О.К., Кокорев В.А., Ренева С.А., Стрельченко Ю.Г. Гидрометеорологические условия волжского региона и современные изменения климата. Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 33–42.
10. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М. Атмосферные осадки // Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 39–64.

11. Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надеждина Е.Д., Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л., Салль И.А. Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 65–91.

REFERENCES

1. Vysotskiy G.N. Izbranniye Trudy [Selected works], M., Selkhozgiz, 1960. 435 p. (in Russ).
2. Rode A.A. Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage [Basic teaching of soil moisture] Vol. 1, Gidrometeizdat, 1965. 663 p.
3. Kalyuzhniy I.L., Lavrov S.A. Osnovniye fizicheskiye protsessy i zakonomernosti formirovaniya zimnego i vesennego stoka rek v usloviyakh potepleniya klimata [The main physical processes and regularities of the winter and spring river runoff formation in the climate warming conditions]. *Meteorologiya i gidrologiya*. [Meteorology and hydrology] 2012. No. 1. P. 68–81 (in Russ).
4. Lavrov S.A., Kalyuzhniy I.L. Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na stok vesennego polovodya i factory yego formirovaniya v bassejne Volgi [Climatic change impact upon the spring flood runoff and its formation factors in the Volga River basin]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2016, No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4 (in Russ).
5. Lavrov S.A. Zakonomernosti formirovaniya ispareniya s poverkhnosti sushy i vody pod vliyaniem klimaticheskikh izmeneniy [Regularities of formation of the evaporation from the ground and water surfaces under the impact of the climate change]. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2019, No. 1, p. 4-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.
6. Speranskaya N.A., Tsytzenko K.V. Izmeneniya osnovnykh elementov vlagooborota sushy na Yevropeyskoy chasti Rossioyi [Changes of the ground moisture turnover main elements in the European part of Russia]. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and applied climatology. 2017. Vol. 3. P. 103–121.
7. Kalyuzhniy I.L., Lavrov S.A. Gidrofizicheskiye protsessy na vodosbore [Hydro/physical processes on the catchment territory]. 2012, SPb.: Nestor-Istoriya. 615 p.
8. Lavrov S.A., Kurbatova Y.A. Matematicheskoye modelirovaniye teplovлагообмена i potokov CO₂ na poverkhnosti verkhovogo bolota [Mathematical modeling of heat/moisture/exchange on a high bog surface]. *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2005. Vol. 41. No. 5. P. 631–642.
9. Anisimov O.A., Borzenkova I.I., Zhiltsova E.L., Zakharova O.K., Kokorev O.K., Reneva S.A., Strelchenko Y.G. Gidrometeorologicheskiye usloviya volzhskogo regiona i sovremenniye izmeneniya klimata [Hydro/meteorological conditions of the Volga region and current climate changes]. *Meteorologiya i gidrologiya*. [Meteorology and hydrology]. 2011. No. 5. P. 33–42.
10. Bogdanova E.G., GavriloVA S.Y., Ilyin B.M. Atmosferniye osadki [Atmospheric precipitations]. *Trudy GGO*, vyp. 573. 2014, p. 39–64.
11. Shkolnik I.M., Meleshko V.P., Karol I.L., Kiselev A.A., Nadezhdina E.D., Khlebnikova E.I. Makhotkina E.L., Sall I.A. Oblachnost i radiatsionniy rezhim na territoriyi Rossii: nablyudaemiye klimaticheskiye izmeneniya [Cloudiness and radiation regime on the territory of Russia: the observed climatic changes]. *Trudy GGO*, vyp. 573, 2014, p. 65–91.

Сведения об авторе:

Лавров Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; ORCID: 0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

About the author

Sergey A. Lavrov, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia, ORCID: 0000-0002-8140-5346; e-mail: lavrov@ecopro.spb.ru