

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ И ВОДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2019 г. С.А. Лавров

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

Ключевые слова: испарение, поверхность суши, водная поверхность, климатические изменения, математическое моделирование, влияние метеофакторов.



С.А. Лавров

На примере бассейна Волги рассмотрены изменения испарения с поверхности суши и водной поверхности за последние десятилетия, а также изменения сопутствующих гидрометеорологических условий. В рамках проведенной работы выполнена оценка изменений испарения с водной поверхности за 1978–2010 гг. по отношению к предшествующему периоду 1951–1977 гг. Установлено, что на всей территории бассейна Волги отмечается уменьшение испарения, падение составляет примерно 10–20 %. При этом суммарное испарение с поверхности суши выросло с середины 1960-х до конца 1980-х годов в среднем на 2–4 % в год.

Для раскрытия сложных закономерностей формирования процесса испарения использованы физически обоснованные математические модели тепло-влажноперевода в системах «почва–атмосфера–растение» и «вода–атмосфера». Проведены численные оценки основных факторов, влияющих на изменение величин испарения как с поверхности суши, так и с поверхности воды. Анализ изменчивости испарения и основных метеофакторов ее формирования в бассейне Волги, а также результаты моделирования позволили сделать следующие выводы: уменьшение величины испарения с водной поверхности в бассейне Волги в основном вызвано падением средней скорости ветра. Рост испарения с поверхности суши обусловлен ростом температуры и осадков.

Важным звеном гидрологического цикла круговорота воды в природе является испарение. На отдельных территориях или водных объектах в этот процесс вовлекается почти вся поступающая атмосферная влага и более половины поглощаемой солнечной энергии. Отсюда становится понятным интерес к изменчивости величины испарения в процессе климатических изменений. В работе [1] рассмотрены закономерности подобных изменений для водосборов основных рек Европейской части России за последние десятилетия, исследовано влияние осадков и различных ланд-

шафтов на величину испарения. Однако не выполнен подробный анализ причин этих изменений, не выяснено влияние на процессы изменения испарения климатических характеристик, не рассмотрены основные физические механизмы, обуславливающие зависимость испарения от климата.

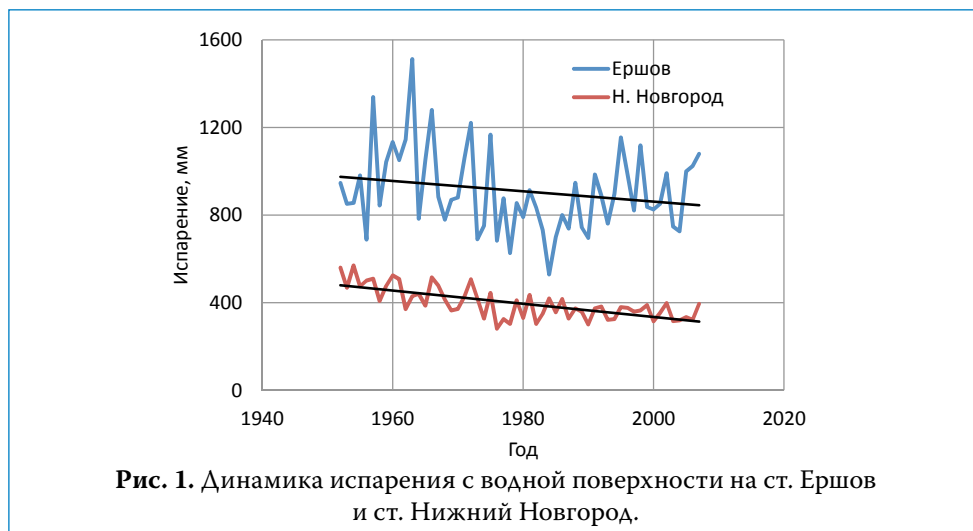
Известно, что величина испарения с поверхности воды и суши зависит от широкого спектра факторов, находящихся в сложной взаимосвязи. Основными факторами, определяющими величину испарения, являются такие гидрометеорологические характеристики окружающей среды, как температура и влажность воздуха, осадки, скорость ветра и поток солнечной радиации [2, 3]. Данные характеристики и определяют климатообусловленность процесса испарения и его изменчивость во времени. Свойства подстилающей поверхности – влажность, физические свойства почвенного и растительного покрова – определяют пространственную изменчивость величины испарения, но при этом в значительной степени воздействуют на характер его изменения от климатических факторов.

Данная статья является попыткой обобщить основные закономерности, связывающие испарение с факторами окружающей среды и подстилающей поверхности, которые определяют его величину и климатообусловленность. На примере бассейна Волги рассмотрены закономерности изменения испарения с поверхности суши и водной поверхности и изменчивость сопутствующих гидрометеорологических условий. Для раскрытия сложных закономерностей формирования процесса испарения использованы физически обоснованные авторские математические модели теплового переноса в системах «почва–атмосфера–растение» и «вода–атмосфера».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИСПАРЕНИЯ И ФАКТОРОВ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

На примере бассейна Волги кратко рассмотрим тенденции изменения испарения за последние десятилетия. При анализе изменений величины испарения с водной поверхности использованы данные 30 водноиспарительных станций, а также результаты работы [1]. Выполнена оценка изменений испарения за теплый период (май–сентябрь) 1978–2010 гг. по отношению к предшествующему периоду 1951–1977 гг. Из данных наблюдений следует, что на всей территории бассейна Волги отмечается падение испарения с водной поверхности. При этом его средние величины подчиняются определенной зональности, закономерно увеличиваясь с севера-запада бассейна Волги к югу-востоку от 350–450 мм до 900–1000 мм и более (на отдельных станциях) в степной зоне. При этом в бассейнах Верхней Волги среднее за анализируемые периоды испарение с водной поверхности уменьшилось с 400 до 335 мм, а бассейнов Нижней Волги с 1000 до 820 мм, т. е. по мере продвижения к устью реки изменения величины испарения становятся более значимыми.

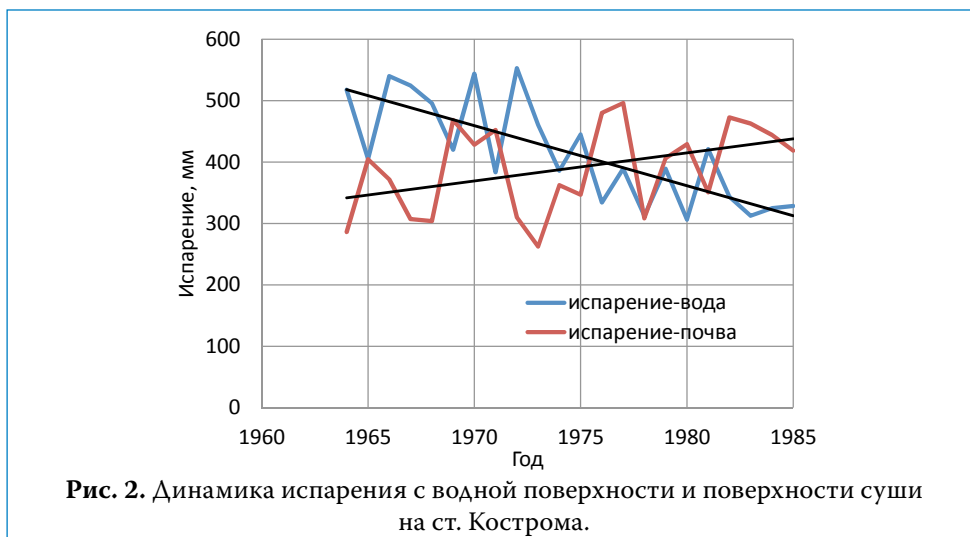
На рис. 1 представлен пример изменения испарения с водной поверхности для станций (ст.) Нижний Новгород и Ершов, расположенных в различных зонах бассейна Волги.



Анализ тенденций изменения испарения с суши затруднен из-за ограниченности длины рядов наблюдений за данной характеристикой: регулярные наблюдения начинаются только в 1960-е годы. При этом количество почвенно-испарительных станций в бассейне Волги сократилось с 29 в конце 1980-х до 5 в настоящее время. К тому же, резко уменьшилась доступность информации о наблюдениях за испарением с почвы. Поэтому авторами работы [4] сделана попытка продлить эти данные до современного периода. Для этого была использована идея, что между испарением с водной поверхности и поверхностью суши существует взаимодополняющее соотношение [5]. Результаты исследований [4] показали, что применение этого предположения довольно надежно позволяет восстановить величину испарения с поверхности суши в разных природных зонах. Корректность данного подхода иллюстрирует рис. 2, на котором приведена динамика изменения величин испарения с воды и суши для ст. Кострома. При этом тенденции изменения испарения с суши зачастую находятся в противофазе с изменениями испарения с водной поверхности.

В отличие от испарения с водной поверхности ярко выраженная зональность величин испарения с поверхности суши отсутствует. Для бассейнов Верхней и Средней Волги его величина в основном колеблется в пределах 350–400 мм. Для Нижней Волги, в зоне сухих степей, испарение уменьшается до 240–280 мм. Однако почти на всех водосборах бассейна Волги на-

блюдается рост величины испарения с начала наблюдений до конца 1980-х годов в среднем на 2–4 мм в год. Затем этот рост практически прекратился. Однако достоверно судить о величине данного роста невозможно по причине прекращения наблюдений за испарением с поверхности суши.



Для анализа изменений, произошедших с величиной испарения в течение наблюдаемого периода, необходимо рассмотреть общую динамику основных метеозаэлемента в бассейне Волги, определяющих испарение с поверхности суши и воды. Как следует из классических исследований процесса испарения [2, 3], рост температуры приводит к увеличению испарения, а рост влажности воздуха – к его падению. Из анализа метеоданных следует, что средние температуры воздуха за теплый сезон в последние десятилетия в бассейне Волги выросли. Потепление за период 1978–2010 гг. по сравнению с периодом 1951–1977 гг. составило 0,5 – 1,0 °С, относительно небольшое, если сравнивать его с изменением в зимний период 1,5 – 2,0 °С и более.

Комплексным параметром, учитывающим как температуру, так и давление пара, является относительная влажность воздуха, т. к. при ее расчете учитывается температура воздуха и парциальное давление водяного пара. Анализ данных относительной влажности по разным частям бассейна Волги свидетельствует об отсутствии каких-либо явных закономерностей в ее изменении. Однако следует отметить, что в определяющий величину испарения теплый период в среднем по бассейну Волги заметен небольшой положительный тренд относительной влажности воздуха. Рост относительной влажности за 1978–2010 гг. по сравнению с периодом 1951–1977 гг. составил 1–2 % при средних значениях 70–80 %.

Еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на величину испарения, является скорость ветра, от величины которого зависит скорость потоков тепла и пара с поверхности суши и водоемов в атмосферу. Скорость ветра за последние 30 лет на всей территории Волжского бассейна и во все сезоны имеет явно выраженную тенденцию к снижению. При средних скоростях ветра за теплый сезон 2,1–2,8 м/с падение составило 0,7–1,0 м/с, т. е. довольно значительное.

Атмосферные осадки воздействуют на увлажненность почв и тем самым на испарение с поверхности суши. Анализ данных об осадках в бассейне Волги свидетельствует о том, что за последние 30 лет их количество увеличилось во все сезоны года (кроме весеннего), наиболее значительно – зимой и летом. В летнее время увеличение осадков на 5–10 мм/мес. и более отмечается практически на всей территории бассейна, при средних показателях их величины 50–75 мм/мес. За весь теплый период рост осадков существенно меньше. Наблюдения на агрометеостанциях также показали некоторый рост влажности почв в бассейне Волги, но, согласно работе [1], с начала 2000-х годов отмечено формирование тенденции к уменьшению осадков.

Важнейшим фактором, определяющим величину испарения с поверхности суши и воды, является поток солнечной радиации. Подробно проанализировать динамику актинометрической информации по бассейну Волги не удалось, тем не менее, была изучена информация о таком показателе уровня радиации, как продолжительность солнечного сияния. В результате выявлено, что длительность солнечного сияния за последние 30 лет, по сравнению с предыдущим периодом, практически не изменилась. При средних показателях 250–350 ч/мес. изменения составляют около 5–8 ч как в положительную, так и в отрицательную сторону. На рис. 3 приведены изменения основных метеоэлементов на ст. Кострома, типичные для всего бассейна Волги.

Для раскрытия механизмов влияния климатических изменений на испарение необходимо провести совместный анализ изменчивости данного элемента водного баланса с динамикой основных метеоэлементов окружающей среды и факторов подстилающей поверхности. Традиционно для этой цели используются корреляционные связи величины испарения с отдельными факторами. Однако сложная взаимообусловленность процесса испарения с факторами его формирования, особенно для поверхности суши, затрудняет этот подход. К тому же, имеющиеся ряды наблюдений за испарением ограничены во времени и тем самым ограничены возможные вариации природных факторов, что не позволяет проводить полноценный статистический анализ их влияния на испарение.

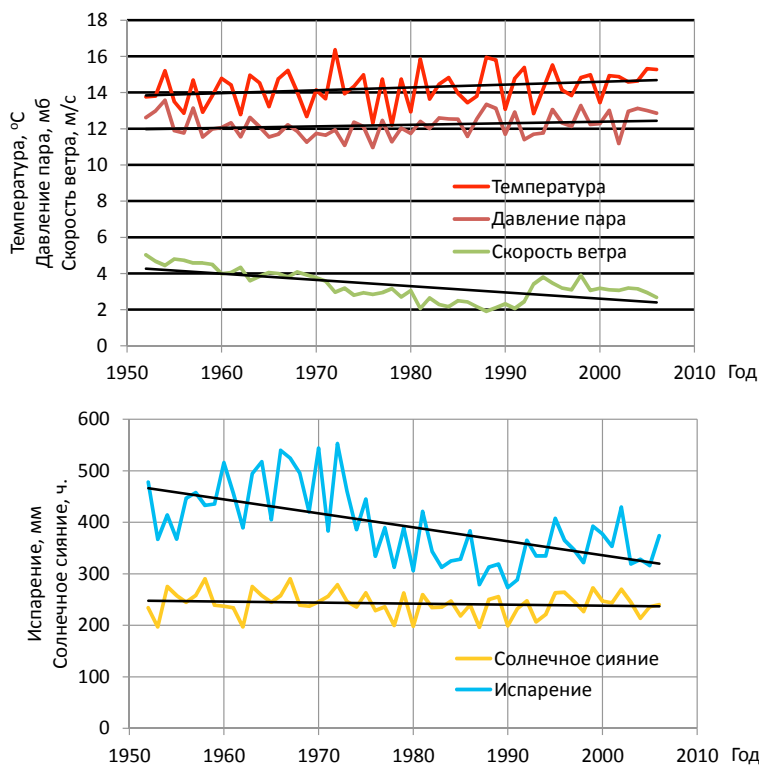


Рис. 3. Динамика метеоэлементов и испарения с водной поверхности на ст. Кострома.

В этой связи понятен интерес к математическому моделированию данного процесса. Физически обоснованная математическая модель, адекватно описывающая процесс испарения, позволяет учесть при его расчетах весь спектр природных факторов и их взаимозависимость, а детальные численные эксперименты – оценить влияние каждого отдельного фактора на величину испарения.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ И ВОДЫ

Поверхность суши

В разработанной математической модели основными уравнениями для расчета суммарного испарения, включающего транспирацию и физическое испарение с почвы, являются уравнения теплового баланса растительного покрова и поверхности почвы, а также уравнения турбулентной диффузии [6, 7].

Расчет транспирации и физического испарения с поверхности почвы проводился по следующим уравнениям:

$$E_T = \rho_A \frac{q_L(T_L) - q_{AL}}{r_L + r_{AL}}, \quad (1)$$

$$E_T = \int_0^{z_K} S_K(W, z) dz, \quad (2)$$

$$L_W E_T = R_L - \rho_A c_A \frac{T_L - T_A}{r_{AL}}, \quad (3)$$

$$E_F = \rho_A \frac{q_S(T_S) - q_{AL}}{r_{AL}}, \quad (4)$$

$$L_W E_F = R_S - \rho_A c_A \frac{T_S - T_A}{r_{AS}} - Q_S, \quad (5)$$

где E_T – транспирация;

E_F – физическое испарение;

ρ_A – плотность воздуха;

$q_L(T_L)$ – удельная влажность воздуха в устьичных отверстиях при температуре листа T_L ;

q_{AL} – удельная влажность воздуха в межлистном пространстве;

r_L – сопротивление переносу пара листовой поверхностью растительного покрова;

r_{AL} – аэродинамические сопротивления переносу пара и тепла системы «лист – межлистное пространство»;

r_{AS} – аэродинамическое сопротивление переносу пара и тепла системы «почва – межлистное пространство»;

L_W – удельная теплота испарения;

c_A – удельная теплоемкость воздуха;

T_A – температура межлистного пространства;

$q_S(T_S)$ – удельная влажность насыщенного воздуха при температуре поверхности суши T_S ;

Q_S – кондуктивный поток тепла в почву;

R_L, R_S – радиационные балансы листьев и поверхности почвы;

$S_K(W, z)$ – интенсивность поглощения влаги корнями растений, зависящая от влажности почвы W на глубине z ;

z_K – глубина распространения корневой системы.

Для описания процессов тепловлагопереноса в почвах при моделировании испарения использована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left(c_s + L_w \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + L_w \frac{\partial \rho_v}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda_s + L_w K_w^T) \frac{\partial T}{\partial z} + L_w K_w^\psi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right], \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_v}{\partial W} \right) \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_w^T + K_v^T) \frac{\partial T}{\partial z} + (K_w^\psi + K_v^\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] + S_R, \quad (7)$$

где T – температура почвы; W – влажность почвы;

ψ – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;

λ_s – коэффициент теплопроводности почвы;

c_s – удельная теплоемкость почвы;

ρ_w – плотность воды; ρ_v – плотность пара;

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;

t, z – время и вертикальная координата.

Комплекс параметров, входящих в уравнения (1)–(7), можно разбить на четыре группы: параметры, определяющие радиационный баланс растительного покрова и поверхности почвы; параметры турбулентного тепло- и массообмена; параметры растительного покрова; параметры почвенного покрова. Подробное описание всех параметров модели и формулы для их расчета представлены в работах [6, 7].

Краткий алгоритм численной реализации данной модели на каждом временном шаге следующий.

1. Проводится расчет влагопереноса в почве с использованием дифференциального уравнения (7), которое аппроксимируется системой линейных разностных уравнений и решается методом прогонки. В результате на выходе имеем профили влажности (W) и количество воды, поглощенной корневой системой (S_R).

2. Рассчитываются составляющие теплового баланса почвы и растительного покрова, транспирации (E_r), температуры растительности и водного потенциала листа, который входит в формулу для расчета сопротивления устьиц (r_l).

3. Методом прогонки решается дифференциальное уравнение теплопереноса (6). В результате решения уравнения теплопереноса получаем информацию о температуре поверхности почвы (T_s) и физическом испарении (E_f), которая используется во внешнем итерационном цикле, включающем решение уравнения влагопереноса и расчет транспирации. Внешние итерации продолжают до тех пор, пока с заданной точностью не будет достигнуто равенство значений составляющих суммарного испарения, рассчитанных методами турбулентной диффузии, теплового и водного баланса. Затем осуществляется переход на следующий временной слой.

Для комплексного тестирования модели использованы результаты экспериментальных исследований потока водяного пара, а также сопутствующих метеорологических параметров атмосферы, которые были получены с помощью пульсационных измерений на верховом болоте, расположенном на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника в Тверской области [6] и на лесном водосборе Валдайского филиала ГГИ в Новгородской области.

Аппаратура для проведения данных измерений установлена на градиентных мачтах, с помощью приборов Eddy Covariance измерялось более 60 параметров. В данных расчетах использованы следующие основные параметры: потоки солнечной радиации, турбулентный поток тепла, поток водяного пара, скорость ветра, влажность воздуха, температура воздуха, температура почвы, атмосферное давление.

Метеорологические параметры фиксировались каждые 10 с, с последующим осреднением. Потоки влаги в процессе обработки и анализа усреднялись до 0,5- часовых значений. На рис. 4 приведен пример сопоставления результатов измерения и расчета суточной динамики потока пара с болотного массива в атмосферу за 24–25 июля 1998 г. (Тверская область). Как видно, общий характер динамики потока пара воды описывается моделью адекватно. Пики в графиках, характеризующие изменение потоков во времени, присутствуют как в экспериментальных, так и в расчетных зависимостях.



Рис. 4. Сопоставление результатов измерения и расчета динамики потока пара в атмосферу (24–25 июля 1998 г., Тверская область).

Наряду с сопоставлениями измеренного и рассчитанного испарения с почвы за короткие интервалы времени (час, сутки) проведено сравнение этих величин на многолетнем уровне. При этом в расчетах использованы среднесуточные значения метеорологических элементов. На рис. 5 приведено сопоставление результатов расчета испарения и измерений на ст. Ершов за теплый период.

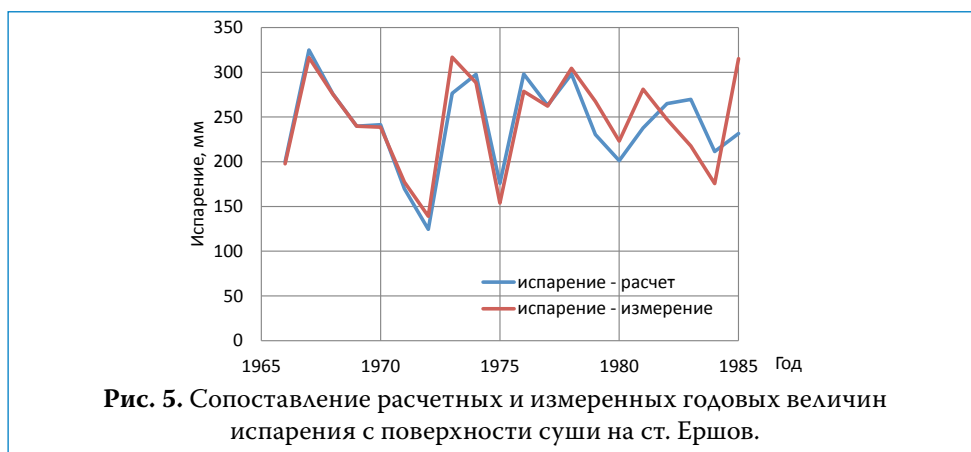


Рис. 5. Сопоставление расчетных и измеренных годовых величин испарения с поверхности суши на ст. Ершов.

Коэффициент корреляции связи экспериментальных и расчетных данных для ст. Ершов равен 0,84. Но, главное, математическая модель правильно описывает многолетнюю динамику испарения с поверхности суши, которая имеет довольно сложный характер. Учитывая высокую степень адекватности описания процесса испарения с помощью математической модели, в дальнейшем были проведены численные эксперименты по оценке влияния различных метеорологических факторов и физических свойств почвы и растительности на испарение.

Водная поверхность

Основными уравнениями математической модели испарения с водной поверхности являются уравнения теплового баланса поверхности воды, а также уравнения турбулентной диффузии и теплопереноса в водной толще.

$$E_w = \rho_A \frac{q_w - q_A}{r_{Aw}}, \quad (8)$$

$$L_w E_w = R_w - \rho_A c_A \frac{T_w - T_A}{r_{Aw}} - Q_w, \quad (9)$$

$$c_w \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} + R_w(z) \right), \quad (10)$$

где E_w – испарение с поверхности воды;

r_{Aw} – аэродинамическое сопротивление переносу пара и тепла системы «атмосфера – поверхность воды»;

c_w – удельная теплоемкость воды;

T_A – температура атмосферы;

q_A – удельная влажность атмосферы;

q_w – удельная влажность насыщенного воздуха при температуре поверхности воды T_w ;

R_w – радиационный баланс поверхности воды;
 $R_w(z)$ – поглощенный радиационный поток тепла в воде;
 λ_w – эффективная теплопроводность воды.

Алгоритм реализации представленной выше математической модели сходен с алгоритмом реализации модели испарения с поверхности почвы. Уравнение теплопереноса (10) аппроксимируется системой линейных разностных уравнений и решается методом прогонки. В результате вычисляются профили температуры и расчетное значение температуры поверхности воды. Это значение используется в итерациях при расчетах теплоточков. Итерации проводятся до тех пор, пока следующее расчетное значение поверхности воды не будет отличаться от предыдущего не более чем на 0,001 °С. Для проверки модели была использована многолетняя экспериментальная информация на суточном уровне о следующих метеорологических характеристиках: температура воздуха, влажность воздуха, облачность и скорость ветра. Полную информацию обо всех радиационных характеристиках, используемых в математической модели, получить не удалось. Потому для задания теплового баланса применены расчетные методы, описанные в [7]. На рис. 6. представлено сопоставление результатов расчета испарения и измерений, проведенных на ст. Кострома.

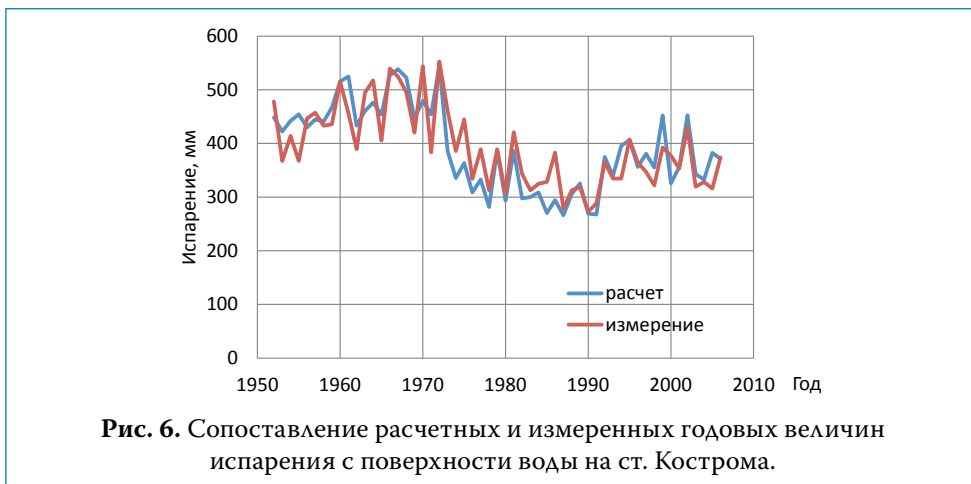


Рис. 6. Сопоставление расчетных и измеренных годовых величин испарения с поверхности воды на ст. Кострома.

Коэффициент корреляции связи экспериментальных и расчетных данных для ст. Кострома равен 0,86. Динамика испарения с водной поверхности имеет сложный характер и математическая модель ее правильно описывает. Так, для ст. Кострома в 1970-е годы отмечено резкое падение величины испарения, далее наблюдается стабилизация и даже некоторый рост его величины, что довольно точно воспроизводится в модельных расчетах.

АНАЛИЗ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ И ВОДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА

Поверхность суши

Для оценки влияния климатических факторов на величину испарения с поверхности суши были проведены с помощью описанной выше математической модели численные эксперименты по оценке чувствительности расчетной величины испарения к изменению таких метеорологических характеристик, как температура воздуха, давление пара и скорость ветра на высоте 2 м, а также радиационного баланса поверхности почвы. В табл. 1 представлены результаты численных экспериментов по оценке влияния на испарение с поверхности почвы данных факторов, а также ряда почвенных характеристик.

Таблица 1. Относительное изменение величины суточного испарения с поверхности суши (δ , %) при росте численных значений метеоэлементов на 1 %

Характеристика	u_2 , м/с	e_2 , мбар	T_2 , °C	R_s , Вт/(см ₂ ·°C)	λ_s , Вт/(см·°C)		K_w , см/ч		K_v , см/ч	
W, долей объема	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
δ , %	0,02	-0,1	0,2	0,43	-0,04	-0,02	0,03	0,3	0,15	0,001

Примечание: u_2 – скорость ветра; e_2 – давление пара; T_2 – температура воздуха на высоте 2 м от поверхности почвы; R_s – радиационный баланс поверхности почвы; λ – коэффициент теплопроводности; K_w – коэффициент влагопроводности жидкой фазы воды; K_v – коэффициент паропереноса; W – влажность почвы.

Из анализа полученных результатов следует, что наиболее тесная связь испарения существует с температурой воздуха и радиационным балансом: численные эксперименты показывают, что при изменении R_s на 1 %, величина испарения может меняться на 0,4–1 %. При расчетах испарения необходимо уделять особое внимание точности задания характеристик, определяющих тепловой баланс поверхности почв.

Скорость ветра, напротив, влияет на величину испарения почвы слабо. Это объясняется тем, что при росте скорости ветра растет коэффициент турбулентного влагопереноса в приземном слое воздуха, тем самым увеличивая величину испарения. При этом рост скорости ветра приводит к охлаждению поверхности почвы и уменьшению упругости водяного пара испаряющейся поверхности, что, в свою очередь, обуславливает падение величины испарения. Таким образом, общее влияние ветра на величину испарения снижается.

Результаты анализа численных экспериментов по оценке влияния метеофакторов на величину испарения полностью согласуются с анализом экспериментальной информации, полученной при пульсационных измерениях величины испарения и сопутствующих метеорологических элементов. Наиболее тесная корреляционная связь испарения за короткие интервалы времени наблюдается с радиационным балансом ($R = 0,9$) и температурой воздуха ($R = 0,72$). Зависимость испарения от скорости ветра ($R = 0,33$) и влажности воздуха ($R = -0,45$) менее очевидна.

Следует отметить следующий важный факт. Экспериментальные и теоретические связи испарения с метеоэлементами получены на основе анализа усредненных за короткие интервалы времени данных. Как правило, такая физическая характеристика почвы, как влажность или биологические параметры растительности за эти интервалы времени меняется мало. Поэтому при рассмотрении месячных или сезонных величин испарения на изменчивость метеофакторов накладываются изменения, связанные, в основном, с влажностью почвы и параметрами растительности.

Полученные выше закономерности становятся менее заметными или совсем иными для длительных отрезков времени. Данное утверждение подтверждается примером связи величин сезонного испарения с значениями среднесезонных метеоэлементов, полученных на ст. Ершов. Как следует из статистического анализа, величина сезонного испарения в данном случае падает с ростом среднесезонной температуры ($R = -0,72$), т. е. закономерность имеет обратный характер по сравнению с аналогичной зависимостью для малых периодов времени. Этот факт можно объяснить ролью влажности почвы в процессе формирования испарения. Для данного региона бассейна Волги рост температуры в теплый сезон сопровождается уменьшением влажности почвы и тем самым падением испарения. Косвенно связь испарения с влажностью почвы иллюстрируется графиком связи испарения с осадками ($R = 0,82$), представленным на рис. 7, т. е. испарение в зоне недостаточного увлажнения практически полностью определяется величиной выпавших осадков. А осадки для ст. Ершов находятся в обратной зависимости от температуры воздуха ($R = -0,57$).

Для регионов с достаточным увлажнением почвы, т. е. высоким уровнем осадков, зависимости сезонного испарения от сезонных значений метеоэлементов становятся схожими с зависимостями, полученными за короткие интервалы времени. Так, для Валдая наблюдается небольшой, но заметный рост испарения с ростом температуры. Для Костромы величина испарения практически не зависит от данной характеристики. Соответственно, для этих регионов не наблюдается и связи испарения с величиной осадков. В этом случае испарение зависит от внутрисезонной изменчивости всей сово-

купности метеофакторов, т. е. изменением их за более короткие интервалы времени. Поэтому необходимо оценить влияние факторов подстилающей поверхности, таких как влажность почвы, физические свойства почвенного и растительного покрова.

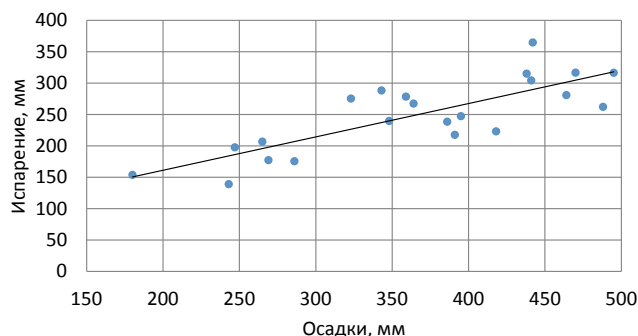


Рис. 7. Зависимость испарения с поверхности суши за теплый сезон от суммы годовых осадков, ст. Ершов.

От влажности почвы зависят многие характеристики теплообмена. Изменение влажности приводит к изменению водно-физических и тепловых свойств почв. Влажность почвы, также как и температура, определяет давление водяного пара в почве. В свою очередь, упомянутые водно-теплофизические характеристики заметно влияют на процесс испарения. Кроме того, от влажности почвы зависит альbedo и тем самым радиационный баланс поверхности. Из вышесказанного очевидно, насколько сложно исследовать влияние влажности почвы на величину испарения, особенно в природных условиях. Разработанная в рамках представленной работы математическая модель позволяет учесть весь комплекс факторов, связанных с влажностью почвы, и исследовать их влияние на испарение как в совокупности, так и отдельно. В табл. 2 приведены данные моделирования, демонстрирующие влияние влажности почвы на величину испарения с ее поверхности, из которых следует, что влияние влажности при неизменности метеоэлементов становится решающим фактором.

Таблица 2. Зависимость физического испарения (E_F) с поверхности почвы от ее влажности (W)

W , долей объема	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
E_F , мм/сут	1,1	1,7	2,3	3,2	4,3	5,8	5,9

При неограниченном подтоке влаги к поверхности почвы испарение зависит от влажности посредством упругости водяного пара и тепловых свойств

почв. С ростом влажности давление водяного пара в почве возрастает и, в соответствии с законом Дальтона, растет величина испарения. Одновременно при увеличении влажности возрастает теплоемкость и теплопроводность почвы. С увеличением теплопроводности растет отток тепла в глубину почвы, в результате чего падает температура поверхности и величина испарения. Рост же теплоемкости приводит к тому, что на этапе повышения температуры воздуха высокая теплоемкость препятствует быстрому росту температуры почвы и тем самым снижает величину испарения. При понижении температуры воздуха высокая теплоемкость повышает величину испарения.

Однако численные эксперименты показывают, что решающее влияние влажности заключается в том, что она является основным фактором, лимитирующим подток влаги к фронту испарения. Высокая влажность способствует подтягиванию к поверхности почвы влаги из нижних горизонтов почвенной толщи. При низкой влажности влага поступает к поверхности лишь в процессе внутрпочвенного испарения, что в значительной степени снижает величину испарения с поверхности. Численные оценки влияния коэффициентов теплопроводности, влагопроводности и паропереноса на испарение приведены в табл. 1.

При изучении влияния влажности на испарение необходимо также обратить внимание на наличие множества обратных связей. Рассмотрим наиболее явные из них. Рост величины испарения, вызванный ростом влажности, приводит к понижению температуры поверхности почвы, а это, в свою очередь, уменьшает давление водяного пара и изменяет составляющие теплового баланса поверхности почвы. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что с ростом влажности растут радиационный баланс поверхности почвы и затрачиваемый на испарение поток тепла. При этом величина турбулентного теплопереноса уменьшается, а поток тепла в почву меняется незначительно. Таким образом, понижение температуры поверхности почвы вследствие повышения влажности некоторым образом компенсируется ростом радиационного баланса. Существуют как положительные, так и отрицательные обратные связи в причинно-следственной цепочке влажность почвы–температура поверхности почвы–испарение.

Наряду с почвенными и гидрометеорологическими характеристиками, которые в значительной степени определяют величину испарения с поверхности почвы, параметры растительного покрова являются основными при расчете транспирации. Листовой индекс, устьичное сопротивление, параметры корневой системы представлены в разработанной модели в виде интегральных характеристик, что является объективным отражением реального процесса переноса влаги от корневой системы до поверхности листа. В модели устьичная регуляция осуществляется посредством изменения по-

тенциала листа. Например, при уменьшении влажности почвы потенциал листа возрастает, что приводит к изменению устьичного сопротивления. Увеличение же, например, потока радиации приводит, напротив, к уменьшению потенциала листа и, соответственно, к увеличению устьичного сопротивления. Оценка влияния такого индивидуального свойства растительного покрова, как устьичное сопротивление при их полном раскрытии (r_{y0}), показывает, что величина транспирации довольно существенно зависит от этого параметра. Так, в диапазоне изменения r_{y0} от 0,5 до 2 с/см, т. е. для большинства сельскохозяйственных культур, транспирация изменяется примерно на 20 %. Физическое испарение при этом меняется мало.

Как следует из полученных результатов, рост листового индекса (LAI) приводит не только к увеличению транспирации, но и к росту суммарного испарения. Необходимо подчеркнуть тот факт, что изменение LAI в два раза, при среднем значении равном 4, приводит к изменению суммарного испарения лишь на 5 %, т. е. на фазе развития растения со стабильным листовым покровом точность задания LAI может быть невысокой. Данная ситуация объясняется тем, что изменение LAI ведет, в основном, к перераспределению долей транспирации и физического испарения в суммарном испарении.

При анализе влияния параметров корневой системы на составляющие суммарного испарения наблюдается несколько иная картина – плотность корневой системы практически не оказывает воздействия на величину физического испарения, а величина транспирации имеет слабую зависимость от этого параметра. Дополнительный факторный анализ показывает, что изменение параметров корневой системы влечет за собой обратные по направленности изменения устьичного сопротивления. В соответствии с результатами численных экспериментов, величина устьичного сопротивления зависит практически от всех почвенных, гидрометеорологических и растительных факторов. Модель наглядно демонстрирует роль устьичной регуляции в процессе испарения.

Водная поверхность

С помощью математической модели в рамках данной работы проведены численные эксперименты по оценке влияния различных метеорологических факторов и физических свойств водной среды на испарение.

Варьируя значениями метеоэлементов относительно наблюдаемых, в процессе расчетов по математической модели были получены оценки, отражающие численный вклад каждой метеорологической характеристики в изменчивость величины испарения с водной поверхности (табл. 3). Эти данные могут быть использованы для оценки изменений величины испарения при изменении значений метеоэлементов.

Таблица 3. Относительное изменение величины суточного испарения с поверхности воды (δ , %) при росте численных значений метеозаэментов на 1 %

Характеристика	u_2 , м/с	e_2 , мбар	T_2 , °С	R_w , Вт/ (м ² ·°С)
δ , %	0,53	-1,9	1,86	0,93

Примечание: u_2 – скорость ветра; e_2 – давление пара; T_2 – температура воздуха на высоте 2 м от поверхности почвы; R_{π} – радиационный баланс поверхности почвы; λ – коэффициент теплопроводности; K_w – коэффициент влагопроводности жидкой фазы воды; K_v – коэффициент паропереноса; W – влажность почвы.

Как отражено в табл. 3, рост температуры, потока солнечной радиации, скорости ветра приводят к росту величины испарения с водной поверхности, а увеличение давления пара в атмосфере – к его уменьшению. Закономерности те же, что и при описании испарения с поверхности почвы. Однако в случае испарения с водной поверхности нет лимитирующего влияния почвы на передвижение влаги к поверхности, влияние метеофакторов выражено более ярко из-за отсутствия описанных выше обратных отрицательных связей. Анализировали также влияние на величину испарения таких физических свойств воды, как прозрачность и коэффициент теплопроводности. Как показали расчеты, рост определяющего прозрачность воды коэффициента экстинкции в 10 раз приводит к росту испарения за теплый период всего на 2 %. А изменение коэффициента теплопроводности в 1000 раз – к изменениям испарения менее чем на 10 %. Основной вклад в формирование динамики испарения с водной поверхности при климатических изменениях оказывает динамика величины метеозаэментов.

Для анализа изменений, произошедших с величиной испарения в течение наблюдаемого периода в бассейне Волги, необходимо изучить динамику основных метеозаэментов, определяющих испарение с водной поверхности. Начнем с температуры воздуха и давления водяного пара. Как следует из вышеприведенных расчетов, рост температуры приводит к росту испарения, а рост давления пара – к его падению. Увеличение температуры воздуха, как и потока солнечной радиации, приводит к росту температуры воды и, соответственно, к повышению перепада давления пара между водной поверхностью и воздухом, что и вызывает рост испарения. Повышение давления пара в атмосферном воздухе, наоборот, уменьшает градиент давления пара у поверхности водоема и вызывает падение величины испарения.

На рис. 3 приведены тренды температуры и давления пара в летний период в районе ст. Кострома. Изменение этих метеозаэментов происходит почти синхронно. Наблюдается их рост, а это означает взаимную компенсацию их влияния на величину испарения.

Следует отметить, что в летний период, определяющий величину испарения, заметен положительный тренд относительной влажности воздуха,

что, несомненно, в некоторой степени и приводит к снижению величины испарения в последние десятилетия. Однако существенной корреляционной связи между испарением и давлением пара установить не удалось. По-видимому, эта связь завуалирована влиянием других метеофакторов.

Еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на величину испарения, является скорость ветра, от которой зависит скорость турбулентных потоков тепла и пара с поверхности водоема в атмосферу. Рост потока тепла приводит к охлаждению поверхности воды и падению величины испарения. Однако в водоемах, в условиях быстрого теплообмена поверхностного слоя воды со всей толщей, этот фактор не столь значителен, как для поверхности суши. Поэтому рост скорости ветра приводит однозначно к росту величины испарения и наоборот. Скорость ветра за последние десятилетия имеет тенденцию к уменьшению для всех частей Волжского бассейна и во все сезоны года. Значительный тренд скорости ветра обуславливает довольно высокую степень корреляционной связи величины испарения с этим фактором. На рис. 8 показана подобная связь для ст. Кострома, ее коэффициент корреляции равен 0,62.

Как отмечалось выше, результаты численных экспериментов подтверждают факт значительного влияния величины потока солнечной радиации на испарение (табл. 2). К сожалению, нет полной информации обо всех характеристиках радиационного баланса поверхности воды на исследуемых водно-испарительных станциях. Но совместный анализ данных о величине испарения и отдельных радиационных характеристик, например, длительности солнечного сияния, указывает на заметную связь между ними ($R = 0,63$).

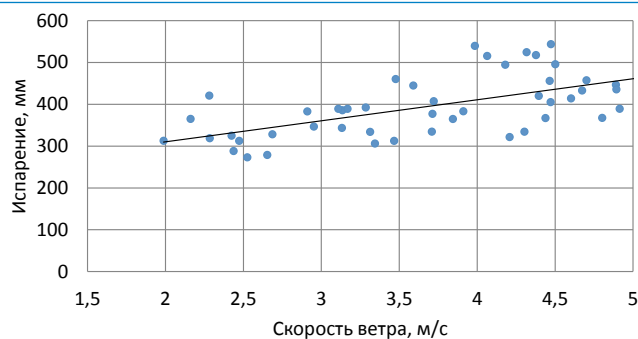


Рис. 8. Зависимость испарения с поверхности воды на ст. Кострома от средних значений скорости ветра за теплый сезон.

Использование при проведенном анализе преимущественно данных, полученных на ст. Кострома, объясняется тем, что для этого пункта наблюдений имеется наиболее полная информация по всем метеопараметрам на суточном уровне за весь период наблюдений за испарением.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы выполнена оценка изменений испарения с водной поверхности за 1978–2010 гг. по отношению к предшествующему периоду 1951–1977 гг. Из данных наблюдений следует, что на всей территории бассейна Волги отмечается уменьшение испарения: падение составляет примерно 10–20 %. При этом суммарное испарение с поверхности суши выросло с середины 1960-х до конца 1980-х годов приблизительно на 2–4 % в год.

Анализ трендов метеорологической информации показал, что практически во всех районах бассейна Волги наблюдался рост средней температуры и осадков за последние десятилетия по сравнению с предыдущими. Но при этом средняя скорость ветра резко упала на 40–70 %. Относительная влажность воздуха и поток солнечной радиации практически не менялись.

С помощью разработанной физически обоснованной математической модели были проведены детальные численные расчеты испарения как с поверхности суши, так и с водной поверхности. При этом исследовалось влияние на величину испарения таких основных факторов ее формирования, как температура и влажность воздуха, скорость ветра, поток солнечной радиации, влажность почвы, коэффициенты теплопроводности и влагопроводности почвы, параметры растительного покрова. Расчеты позволили численно оценить влияние каждого отдельного фактора на испарение.

Анализ изменчивости испарения и основных метеофакторов ее формирования в бассейне Волги, а также результаты моделирования позволили сделать следующие выводы. Уменьшение величины испарения с водной поверхности в бассейне Волги в основном вызвано падением средней скорости ветра и в некоторой степени ростом относительной влажности воздуха. Рост испарения с поверхности суши обусловлен ростом температуры и осадков: в зоне недостаточного увлажнения – в основном ростом осадков, в зоне избыточного увлажнения – температуры воздуха.

В период значительных климатических изменений возникает проблема долгосрочного прогноза изменений испарения как с поверхности суши, так и воды. Естественно, что данный прогноз невозможен без надежных оценок изменения климатических характеристик. Современные климатические модели, по мнению климатологов, могут наиболее достоверно предсказать тренд температуры воздуха, осадков – уже хуже. У других климатических характеристик точность предвычисления еще ниже. Поэтому в долгосрочных прогнозах мы можем реально использовать лишь температуру воздуха и осадки. Исходя из этого, можно с достаточной долей вероятности предположить, что при сохранившихся положительных трендах температуры и осадков в будущем будет наблюдаться некоторый рост величины испаре-

ния с суши. Что касается испарения с водной поверхности, то прогноз данной составляющей водного баланса затруднен. Как было показано выше, решающим фактором, повлиявшим на изменение испарения в последние десятилетия, оказалась скорость ветра. Но прогноз его величины имеет довольно низкую достоверность.

В представленной работе впервые на основе натуральных наблюдений и математического моделирования проведено комплексное исследование влияния основных факторов окружающей среды, определяющих климатические изменения испарения с поверхности суши и воды. Получены общие закономерности, объясняющие тенденции изменения испарения, наблюдающиеся в последние десятилетия. В будущем необходимо уделить больше внимания региональным особенностям формирования испарения и свойствам подстилающей поверхности, которые в некотором роде количественно трансформируют влияние климатических факторов и, в конечном итоге, формируют закономерности пространственной изменчивости испарения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сперанская Н.А., Цыценко К.В.* Изменения основных элементов влагооборота суши на Европейской части России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 3. 2017. С. 103–121.
2. *Братсерт У.Х.* Испарение в атмосферу. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
3. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 532 с.
4. *Голубев В.С., Сперанская Н.А., Цыценко К.В.* Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость // *Метеорология и гидрология*. № 7. 2003. С. 89–99.
5. *Bouchet R.J.* Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. In: *Symposium on Surface Waters*. IAHS Publication, 1963. No. 62. P. 134–142.
6. *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.
7. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.

Сведения об авторе:

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: sergey_lavrov_50@mail.ru