УДК 556.132.2; 556.132.6; 556.013 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31*

Оригинальная статья / Original paper

Моделирование пространственного распределения среднемноголетнего испарения с водной поверхности в центральной части Европейской территории России

С. А. Лавров ✉, С. А. Иванова

✉ sergey_lavrov_50@mail.ru

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение пространственного распределения испарения с поверхности воды становится все более актуальным направлением исследований при наблюдаемых климатических изменениях. Очевидна необходимость использовать для пространственных обобщений более точные методы, учитывающие все многообразие природных факторов формирования данного процесса. **Методы.** Для расширения базы данных для пространственных обобщений испарения применена методика реанализа, основанная на использовании в расчетах физико-математической модели вертикального тепловлагопереноса в водной среде. Модель откалибрована по данным наблюдений за испарением с помощью ГГИ-3000 на 35 площадках центральной части Европейской территории России. **Результаты.** По данным о среднесуточных значениях метеоэлементов на пространственной сетке в местах расположения 105 метеостанций рассчитаны средние многолетние величины испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Построены карты распределения испарения для центральной части Европейской территории России. Обобщены результаты пространственного моделирования, получен ряд закономерностей, связывающих величину среднемноголетнего испарения с поверхности воды с температурой воздуха и скоростью ветра теплого периода. Проанализирована изменчивость коэффициентов перехода от величины испарения, измеренного с помощью ГГИ-3000, к испарению с поверхности малых водоемов и установлено, что они подвержены климатическим изменениям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водная поверхность, испарение, математическое моделирование, реанализ, пространственная изменчивость, картирование, влияние метеофакторов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лавров С. А., Иванова С. А. Моделирование пространственного распределения среднемноголетнего испарения с водной поверхности в центральной части Европейской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 5–31. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31; EDN: GIYUGR

© Лавров С. А., Иванова С. А., 2026

Modelling of the spatial distribution of average many-year evaporation from water surface in the central part of the European territory of Russia

Sergey A. Lavrov ✉, **Svetlana A. Ivanova**
✉ sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Studying of spatial distribution of evaporation from water surface is becoming a rather topical thing in the conditions of the observed clime changes. In this connection it is quite evident that the use of more precise methods taking into account all diversity of natural factors of the above process formation is necessary **Methods.** We used the re-analysis methods to extend the database for the evaporation spatial generalization. These methods are based on the use of physical/mathematical model of vertical hydrothermal transfer in water medium. The model was calibrated according the data of observations of evaporation with GGI-3000 at 35 plots of the central part of the European territory of Russia. **Results.** We have calculate average ay-year values of evaporation from water period over the 2000–2020 period according to data on average daily values of meteorological elements on a spatial network at the plots of 105 meteorological stations. The maps of evaporation distribution for the central part of the European territory of Russia have been plotted. Results of spatial modelling were generalized and we obtained a number of regularities connecting the value of average many-year evaporation from water surface with air temperature and wind speed of the warm season. We have analyzed the variability of the transition coefficients from the evaporation value gauged with GGI-3000 to the evaporation from the small water bodies surfaces and have stated that they are subjected to climatic changes.

KEYWORDS: water surface, evaporation, mathematical modelling, re-analysis, spatial variability, mapping, meteorological factors impact

FOR CITATION: Lavrov S. A., Ivanova S. A. Modelling of the spatial distribution of average many-year evaporation from water surface in the central part of the European territory of Russia. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 2. P. 5–31. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31; EDN: GIYUGR

ВВЕДЕНИЕ

Точные пространственные оценки испарения с поверхности воды имеют большую практическую значимость. Картированием информации об испарении занимаются довольно давно. Еще в 1944 г. в Государственном гидрологическом институте В. К. Давыдовым, под редакцией Б. Д. Зайкова, была подготовлена карта «Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР» [1]. Наиболее известной и широко используемой является карта о средней многолетней величине испарения с водной по-

верхности испарительного бассейна площадью 20 м^2, приведенная в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов[1]. В последнее время А. Н. Постниковым была подготовлена карта о среднем многолетнем испарении с поверхности природных водоемов за безледоставный период на территории России [2]. Необходимо отметить, что построение всех этих карт осуществлялось на основе упрощенных расчетных методов. В Указаниях испарение рассчитано по формуле Государственного гидрологического института (ГГИ), а А. Н. Постниковым – по формуле, полученной на основе использования метода теплового баланса.

В зарубежной практике при исследованиях пространственного распределения испарения наиболее популярными являются методы расчета, основанные на подходе Пенмана и использовании соотношения Боуэна для определения энергетического баланса водных объектов [3, 4]. В некоторых исследованиях применяются регрессионные модели и искусственные нейронные сети для оценки испарения на основе климатических данных [3]. Перечисленные выше методы расчета отражают лишь отдельные стороны многофакторного процесса испарения и носят приближенный характер. Ввиду этого становится весьма актуальной разработка для пространственных обобщений более точных методов, учитывающих все многообразие природных факторов формирования данного процесса.

В настоящей работе предпринята попытка применить для расчета испарения с водной поверхности разработанную авторами физически обоснованную математическую модель процессов формирования стока – «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» (свидетельство о государственной регистрации № 2025697103), подробно представленную в работах [5, 6]. Модель описывает практически все физические процессы формирования испарения за многолетний период, что позволяет учесть в т. ч. и произошедшие за последние десятилетия факторы влияния климатических изменений.

В последние годы растет роль новых источников информации о современном состоянии водных объектов и тенденциях изменения их характеристик как в пространстве, так и во времени. Это прежде всего связано с сокращением сети наблюдений и с серьезными проблемами заполнения пропусков при обобщении наблюдений за многими гидрологическими характеристиками. В полной мере это относится и к наблюдениям за испарением с водной поверхности. Ввиду данных обстоятельств весьма популярными становятся методы реанализа, позволяющие по метеонаблюдениям восстановить информацию об испарении при отсутствии системы измерения данной составляющей водного и теплового баланса. При этом используются математические модели различной сложности. Впервые для этой цели применена модель «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА».

1 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

Успешное использование математических моделей невозможно без их тестирования по данным наблюдений, т. е. решение задач, связанных с расширением знаний о пространственных закономерностях испарения, носит комплексный характер, основанный как на результатах измерений на сети наблюдений, так и на теоретических обобщениях, полученных различными расчетными методами. При этом необходимо учитывать тот факт, что в случае испарения с водной поверхности практически единственным массовым способом измерения является применение испарителей ГГИ-3000. Информация, полученная на основе данного прибора, не может напрямую использоваться для определения испарения с реальных водных объектов. Для этих целей применяются коэффициенты перехода. Однако методы их определения разработаны около пятидесяти лет назад на основе имевшейся в ту пору экспериментальной информации [7]. Поэтому для правильной интерпретации полученных результатов оценки испарения, базирующейся на наблюдениях с помощью испарителей ГГИ-3000, актуально уточнение коэффициентов перехода с учетом данных, полученных в последующий период.

В качестве объекта исследований выбрана центральная часть Европейской территории России (ЕТР) в пределах от 45 до 61,5° с. ш. и 31,5–61° в. д. Выбор данной территории в основном обусловлен расположением на ней бассейна р. Волги – важнейшего водохозяйственного и гидрологического объекта России. Проведен расчет среднемноголетних значений испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Обобщения за данный период не столь многочисленны из-за резкого сокращения наблюдательной базы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показывают многолетние исследования, процессы испарения, их изменчивость в пространстве и времени в первую очередь обусловлены метеорологическими условиями. При этом сеть метеонаблюдений намного плотнее, чем сеть наблюдений за различными составляющими испарения. Метеонаблюдения на исследуемой территории проводились на 104 метеостанциях, а измерение испарения только на 35. Данное обстоятельство дает возможность получать дополнительную пространственную информацию об этой гидрологической характеристике, используя методологию реанализа, основанную на математическом моделировании вышеназванных процессов по данным о метеоэлементах.

Метод реанализа представляет собой двухшаговый процесс. На первом, называемом ассимиляцией данных, математическая модель изучаемой системы калибруется по всей имеющейся наблюдаемой информации за вход-

ными и выходными параметрами и характеристиками модели. Как правило, круг подобных наблюдений немногочислен, что накладывает некоторые ограничения на точность калибровки. В нашем случае это совокупность метеорологической и гидрологической информации в точках наблюдения. При этом необходимо добиться максимальной сходимости расчетных и измеренных характеристик.

Далее проводится реанализ, т. е. по откалиброванной модели рассчитываются величины испарения в узлах задания исходной информации. Расчеты могут проводиться как на регулярной, так и на нерегулярной пространственной сетке. Например, на неравномерной сетке расположения метеостанций, густота которых заметно превышает сеть наблюдений за испарением. Широко используется вариант реанализа на регулярной пространственной сетке. В этом случае в узлах данной сетки должна быть представлена вся необходимая для моделирования метеорологическая информация. Но, как правило, она отсутствует или получена также на основе реанализа результатов метеонаблюдений. Ввиду этого возникают вопросы к точности такого двойного реанализа. В каком случае точность расчета испарения в узлах сетки будет выше – при модельных расчетах, на основе восстановленных метеоданных или полученных методами пространственной интерполяции модельных данных об испарении в местах расположения метеостанций? Данный вопрос требует специального изучения.

Ключевую роль в реанализе играет моделирование. Основными уравнениями для расчета испарения с поверхности воды являются уравнения теплового баланса и турбулентной диффузии, дополненные системой дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепловлагопереноса в водной толще. Подробное описание всех уравнений математической модели дано в работах [5, 6].

Моделирование вертикального тепловлагопереноса осуществляется на водной колонке глубиной 10 м. Расчетный шаг по вертикали составляет 1 см. Расчеты испарения за многолетний период проводятся с шагом по времени 1 ч. В качестве исходной информации для математического моделирования используются суточные значения метеоэлементов на высоте 2 м (температура воздуха, осадки, скорость ветра, упругость водяного пара), а также данные о нижней и верхней облачности. Набор параметров для расчета характеристик солнечной радиации включает солнечное склонение, широту в расчетной точке, общую и нижнюю облачность, альбедо водной поверхности.

На первом шаге реанализа (ассимиляции данных) используемая математическая модель испарения калибруется по всем имеющимся для территории наблюдениям. В случае реанализа испарения с поверхности воды

стоит проблема выбора наиболее пригодных для калибровки модели рядов наблюдения как за величиной испарения, так и за сопутствующими метеорологическими параметрами. Для достижения максимальной точности сопоставления измеренных и расчетных значений необходимо, чтобы получаемые данные о метеорологических характеристиках были максимально приближены к площадкам, где проводятся измерения испарения. На практике существует больший или меньший пространственный разрыв между локациями этих двух видов наблюдения.

Второй проблемой калибровки является выбор вида инструментальных наблюдений за испарением с водной поверхности – с помощью испарительного бассейна площадью 20 м^2 или испарителя ГГИ-3000. Известно, что испарительный бассейн площадью 20 м^2 признан Всемирной метеорологической организацией (ВМО) международным эталонным прибором, характеризующим испарение с небольших озер и водохранилищ, которому практически не присущи искажения в измерениях, вызванные процессами в окружающих испаритель почвогрунтах. Данный факт по своей физической сути сближает процессы измерения в бассейне и расчетов по используемой пространственно-одномерной модели. Однако, несмотря на достоинства данной методики измерений, у нее имеется существенный недостаток, который не позволяет в полной мере использовать бассейн площадью 20 м^2 для целей калибровки математической модели. Этот недостаток связан с относительной малочисленностью рядов наблюдения в различных природных зонах, особенно в последнее время. Наблюдения за испарением с водной поверхности с использованием испарительного бассейна 20 м^2 в настоящее время производятся всего на четырех станциях ЕТР.

Исходя из вышесказанного для тестирования и калибровки математической модели были использованы наблюдения на испарителе ГГИ-3000 как наиболее многочисленные и тесно связанные с метеонаблюдениями. На Европейской территории России наблюдения производились на 54 станциях.

Необходимо также подчеркнуть, что процесс тестирования и калибровки математической модели проводился на трех уровнях. На первом и втором сопоставлялись данные расчета и измерения внутригодового и многолетнего хода испарения. Результаты сопоставлений подробно описаны в работе [6]. Коэффициенты корреляции между расчетными и измеренными величинами испарения лежат в пределах 0,7÷0,9. Стандартные ошибки расчета составляют менее 10 %, т. е. сходимость результатов довольно высокая. Динамика испарения с водной поверхности имеет сложный характер, и математическая модель правильно ее описывает [6].

Третий уровень сопоставлений включает в себя сравнение среднемноголетних значений испарения. Для центральной части ЕТР было отобрано 35 пунктов наблюдения за испарением и сопутствующими метеоданными. В процессе калибровки получены оптимальные значения параметров математической модели, которые потом использовались без изменений во всей расчетной области. К таким параметрам относятся, прежде всего, шероховатость подстилающей поверхности, альбедо, коэффициенты поглощения радиации и характеристики теплообмена в водной среде. В результате при переходе от одной точки к другой в расчетах изменялись лишь среднесуточные ряды наблюдений за метеоэлементами (температура воздуха, давление пара, скорость ветра, а также общая и нижняя облачность). Изменялось также значение широты местности, которое использовалось при определении радиационных характеристик.

На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая итоговый результат сопоставления расчетных ($E_р$) и измеренных ($E_и$) среднемноголетних значений испарения после выполнения процедуры калибровки.

Уравнение связи между расчетными и измеренными значениями следующее:

$$E_р = 0{,}999E_и\,, \qquad R^2 = 0{,}97. \tag{1}$$

Средняя стандартная ошибка расчета составляет 6 %.

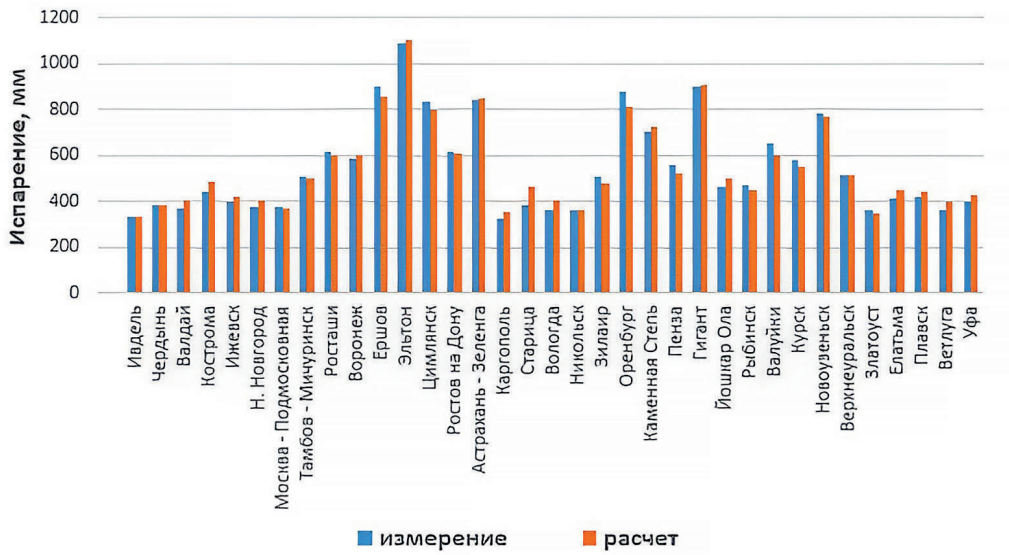


Рис. 1. Сопоставление измеренных и расчетных среднемноголетних значений испарения с поверхности воды для периода 2000–2020 гг. на ряде станций Европейской территории России

Fig. 1. Comparison of the calculated and pre-designed average many-year values of evaporation rom water surface for the 2000–2020 period at a number of stations of the European territory of Russia

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Несмотря на некоторые погрешности расчета, довольно высокая степень схождения модельных и измеренных среднемноголетних величин испарения позволяет восстановить значения данной характеристики в местах проведения метеорологических измерений. На рис. 2 приведена карта с пространственным распределением расчетных среднемноголетних значений испарения в исследуемой области. Карта построена в среде QGIS по данным расчета испарения в узлах расположения метеостанций.

Как показал дополнительный анализ результатов моделирования, величина испарения в первую очередь зависит от метеоусловий и широтного

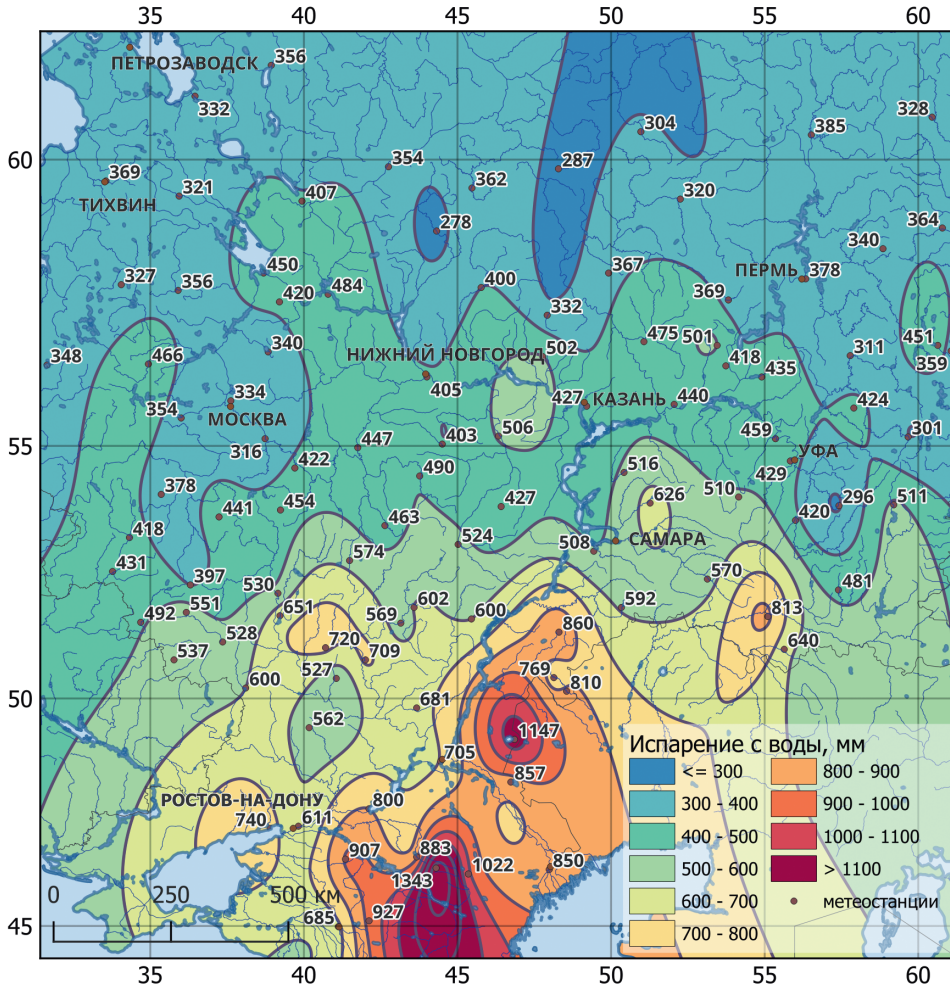


Рис. 2. Пространственное распределение расчетных среднемноголетних значений испарения за период с 2000 по 2020 г.

Fig. 2. Spatial distribution of designed average many-year evaporation values over the period from 2000 to 2020

расположения местности. Наиболее сходными являются пространственные поля испарения и температуры. В рамках проведенной работы исследованы корреляционные зависимости между расчетными среднемноголетними величинами испарения ($E_р$) и основными метеорологическими переменными за теплый период года, температурой воздуха, давлением водяного пара и скоростью ветра, а также общей и нижней облачностью. Как показал статистический анализ наиболее тесная зависимость наблюдается между испарением и температурой теплого периода ($T_{тп}$), с коэффициентом корреляции $R = 0{,}9$ (рис. 3).

Уравнение данной связи (2) носит экспоненциальный характер, что обусловлено подобным видом зависимости давления насыщенного пара испаряющей водной поверхности от ее температуры:

$$E_р = 40{,}4 \exp(0{,}2T_{тп}). \quad (2)$$

При проведении расчетов по формуле (2) стандартная ошибка составила 15 %.

Из статистического анализа также следует, что коэффициент корреляции между среднемноголетними значениями $E_р$ и скоростью ветра ($v_{тп}$) равен 0,74, а между испарением и давлением пара в атмосфере подобная связь практически не выявлена. Наблюдается также довольно высокая обратная

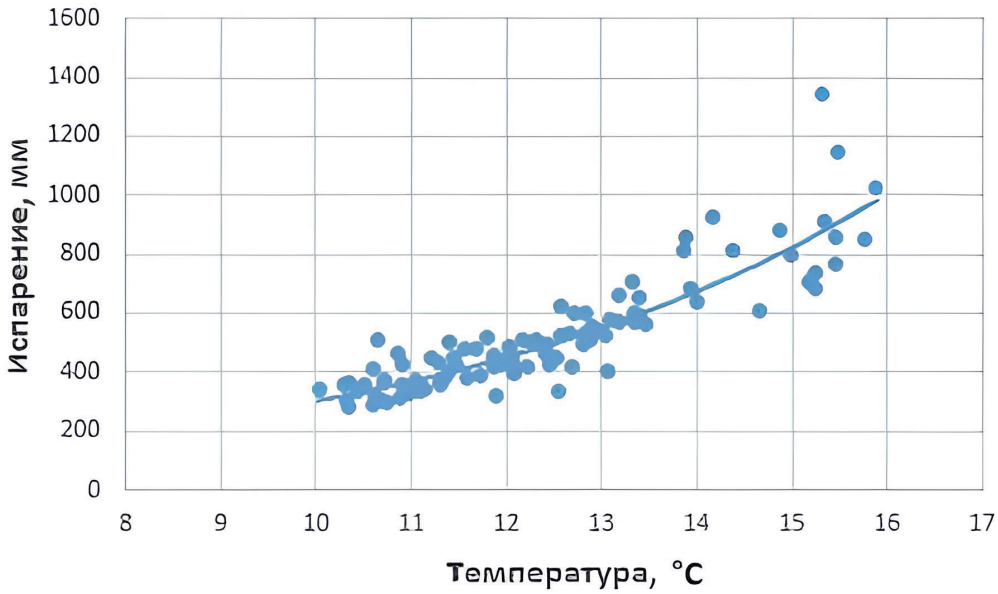


Рис. 3. Зависимость между расчетными среднемноголетними величинами испарения с воды и температурой воздуха теплого периода года

Fig. 3. Dependence between pre-designed average many-year evaporation values from water surface and air temperature of a warm season

корреляционная связь между испарением и показателями общей и нижней облачности (R = 0,75 и 0,7). Однако данные характеристики находятся в сильной обратной зависимости от температуры воздуха с коэффициентом корреляции больше 0,8, поэтому выявить индивидуальное влияние данных факторов довольно трудно.

Однако, как следует из полученных результатов, температура не является единственным фактором формирования пространственного распределения испарения. Поэтому по методу множественной линейной регрессии было построено уравнение связи между среднемноголетними значениями испарения, температуры воздуха и скорости ветра ($v_{ТП}$) теплого периода, еще одной из важнейших переменных, используемых при расчетах испарения.

Учитывая экспоненциальный характер зависимости $E_р$ от температуры, в качестве переменной вместо испарения в регрессионном анализе использовался логарифм его величины. В этом случае получено следующее расчетное уравнение:

$$E_р = \exp(0{,}16T_{ТП} + 0{,}22\ v_{ТП} + 3{,}7). \quad (3)$$

Коэффициент корреляции подобной связи равен 0,97, а стандартная ошибка составляет 8 %.

Использование в качестве переменных метеоданных средней температуры и скорости ветра теплого периода вносит некоторую неопределенность в метод расчета данных характеристик. В модели «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» под теплым периодом понимается период с отсутствием снежного покрова, а в работе А. Н. Постникова [2] к теплому периоду относятся те месяцы, средние значения температуры для которых больше нуля. Чтобы исключить трудности с определением данных характеристик, в проведенном нами исследовании в качестве переменных использованы средние метеоданные за пять самых теплых месяцев года, с мая по сентябрь ($T_{5М}$ и $v_{5М}$). Получены следующие уравнения связи, аналогичные (2) и (3):

$$E_р = 61{,}3\ \exp(0{,}12T_{5М}), \quad (4)$$

$$E_р = \exp(0{,}1T_{5М} + 0{,}22\ v_{5М} + 4). \quad (5)$$

Коэффициенты корреляции данных связей, соответственно, равны 0,93 и 0,99, а стандартная ошибка расчета составляет 13 % и 7 %. Таким образом, использование в качестве переменных метеоданных их средних значений за пять месяцев увеличивает точность расчетов и упрощает подготовку исходной информации.

Кроме анализа многолетних характеристик испарения с водной поверхности также были рассмотрены и ежегодные данные об испарении и их

связь со средней температурой воздуха и скоростью ветра теплого периода. Коэффициент корреляции в этом случае составляет 0,76, а стандартная ошибка расчетов по уравнению регрессии – 85 %, т. е. использование подобной информации в расчетах нецелесообразно.

Однако применение метода множественной линейной регрессии для анализа ежегодных средних данных за пять самых теплых месяцев года об испарении, температуре и скорости ветра ($T_{Г5м}$ и $v_{Г5м}$) позволяет значительно повысить точность расчета. В этом случае уравнение, аналогичное (5), имеет вид:

$$E_р = \exp(0{,}07T\text{Г5М} + 0{,}22\, v_{Г5м} + 4). \quad (6)$$

Коэффициент корреляции данной связи равен 0,92, а стандартная ошибка расчета составляет 12 %: точность расчетов значительно повысилась по сравнению с использованием только одной переменной – температуры.

Известно, что климатические характеристики, такие как потоки солнечной радиации и температура воздуха, имеют сильную широтную зависимость и, соответственно, величина испарения также зависит от значений северной широты местности (φ). Коэффициент корреляции полученной связи (7) равен 0,85, а стандартная ошибка расчета составляет 17 %:

$$E_р = 22974 \exp(-0{,}07\varphi). \quad (7)$$

Формулы (2) – (7) не являются универсальными, т. к. получены только для исследованной в рамках данной работы территории. Несмотря на то, что их вид отражает физические закономерности формирования испарения с поверхности воды под действием таких основных метеоэлементов, как температура воздуха и скорость ветра, полученные формулы в некоторой степени обусловлены и пространственными закономерностями распределения метеофакторов на Европейской территории России. При этом математическая модель была откалибрована лишь по экспериментальным данным, полученным на этой территории.

Использование полученных выше расчетных формул для определения испарения с поверхности воды позволяет применять упрощенную методику реанализа на регулярной пространственной сетке. Для этой цели необходима соответствующая информация в ее узлах. Для расчетов испарения за период 2000–2020 гг. использовались данные о температуре воздуха из глобального архива метеоданных Уиллмотта и Мацууры с сайта[2]. Среднемесячные значения температуры воздуха на метеостанциях были интерполированы в пространственную сетку 0,5° широты × 0,5° долготы. При реанализе использована формула (4), связывающая величину среднемно-

2 Электронный ресурс. URL: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/archive.html

голетнего испарения с температурой воздуха, усредненной за пять теплых месяцев. К сожалению, мы не располагаем базой данных о сеточных значениях скорости ветра на ЕТР, поэтому нет возможности использовать для реанализа более точную формулу (5) при расчетах испарения с водной поверхности.

На рис. 4 приведена полученная при использовании подобной методики реанализа на регулярной пространственной сетке карта среднемноголет-

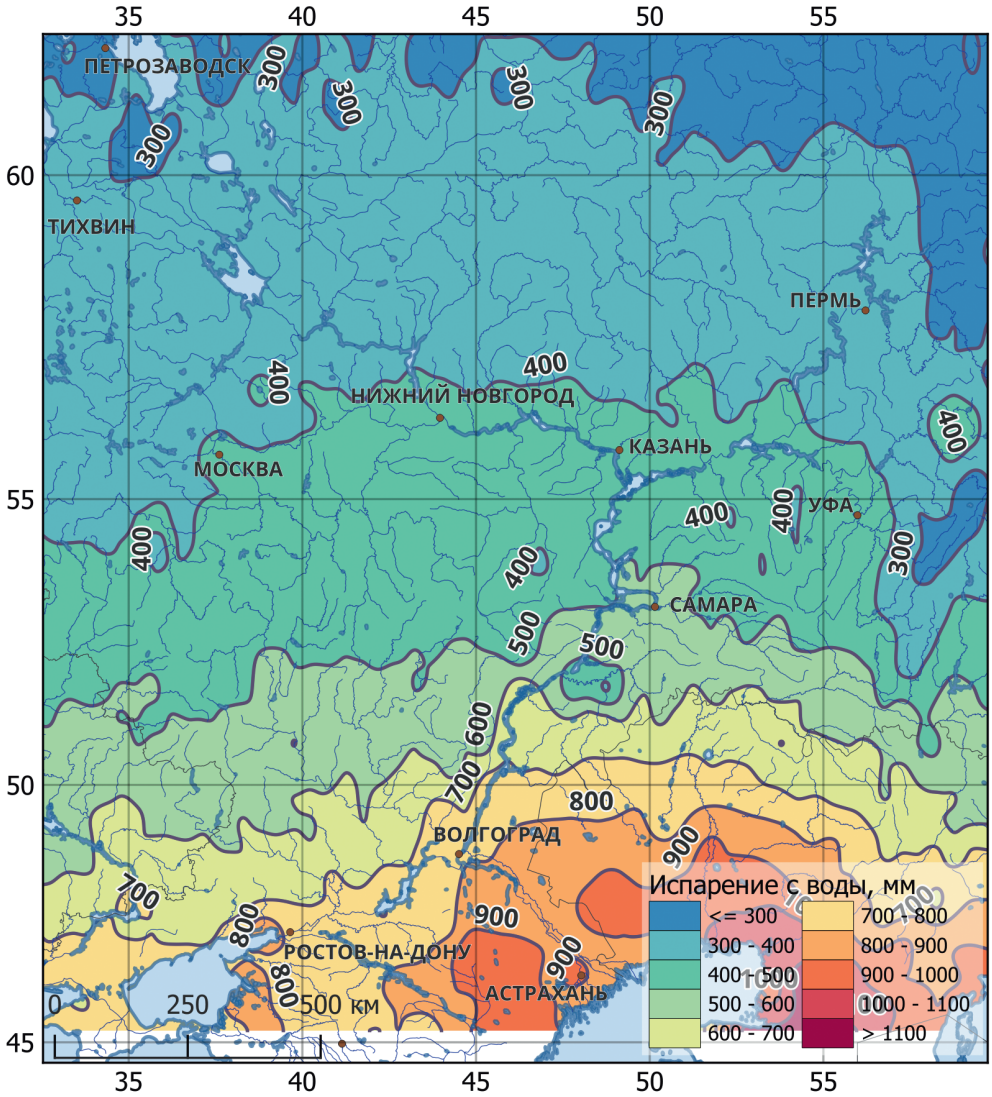


Рис. 4. Пространственное распределением расчетных среднемноголетних значений испарения с поверхности воды

Fig. 4. Spatial distribution of pre-designed average many-year values of evaporation from water surface

них значений испарения. При сопоставлении карты на рис. 4 с картой на рис. 2 выявляются заметные различия, что обусловлено как отсутствием учета скорости ветра в расчетах, так и отличием в методиках реанализа. В первом случае (рис. 2) расчеты испарения проводили по данным измерения метеоэлементов в узлах расположения метеостанций, а во втором (рис. 4) – по данным их предварительного реанализа в узлах регулярной сетки. Учитывая нелинейность связи испарения с температурой воздуха, методы аппроксимации данной характеристики на неохваченных наблюдениями территориях могут заметно повлиять на расчетную величину испарения. К тому же, как показали сопоставления среднемесячных температур, измеренных и полученных в результате предварительного реанализа, заметные расхождения между ними иногда достигают 1 °С. Таким образом, проблема выбора метода реанализа связана с точностью расчета пространственных характеристик испарения и требует дополнительных исследований.

Выполнена оценка средней величины испарения с водной поверхности на исследованной территории, лежащей в пределах от 45 до 61,5° с. ш. и 31,5–61° в. д. По данным реанализа на регулярной сетке (рис. 4) эта величина составляет 524 мм/год, при коэффициенте вариации, равном 40 %. Средняя величина расчетных значений в узлах расположения метеостанций – 514 мм/год, т. е. отклонение менее 2 %. При этом среднее измеренное испарение на 35 пунктах наблюдения, используемых при калибровке математической модели, равно 544 мм/год. Это всего на 4 % превышает сеточное среднее значение. Полученные выше данные указывают на достаточно высокую степень точности примененной для оценки среднемноголетних пространственных характеристик испарения с водной поверхности методики реанализа.

Проблемы использования результатов расчета. Переходные коэффициенты

Представленные выше модельные расчеты испарения относятся, по существу, к реанализу результатов наблюдений на испарителе ГГИ-3000. Данные, полученные наземными испарителями, не могут напрямую использоваться для описания испарения с естественных водоемов. Уже с начала использования метода испарителей небольшого размера, в т. ч. ГГИ-3000, стало ясно, что из-за разницы тепловых режимов водной среды в испарителе и в более крупных водоемах в измеряемую величину вносятся определенные искажения. Для испарительного бассейна площадью 20 м^2 данные искажения минимальны, поэтому он признан эталонным прибором для измерения испарения. Исходя из этих обстоятельств существует проблема перехода от испарения, измеренного в испарителе (в нашем случае

откалиброванного по данным испарителя), к наблюдаемому с поверхности бассейна. Для этой цели широко используются так называемые коэффициенты перехода. Основы методики их расчетов были разработаны В. И. Кузнецовым [8, 9], дополнены А. Р. Константиновым [10], П. П. Кузьминым [7] и В. С. Голубевым [11]. Следует также упомянуть более позднюю работу В. С. Вуглинского [12], где данная методика получила свое дальнейшее развитие.

В общем виде формула перехода от величины испарения ($E_{0,3}$) с испарителя ГГИ-3000 к испарению с поверхности бассейна (E_{20}) выглядит следующим образом:

$$E_{20} = \alpha E_{0,3}. \quad (8)$$

В работе [7] отмечено, что следует различать три вида переходного коэффициента α: фактический (вычисленный за отдельные месяцы), региональный (осредненный за все годы наблюдений в данном пункте) и глобальный (осредненный по всем пунктам наблюдения региональный коэффициент).

Для целей данного исследования наибольший интерес представляют региональные коэффициенты перехода от одних среднемноголетних данных к другим. В работе В. И. Кузнецова [8] представлена формула для перехода показаний испарения, полученных на ГТИ-3000, на показания с бассейна в виде:

$$\alpha = rK_t, \quad (9)$$

где r – инструментальный коэффициент испарителя;

K_t – коэффициент, зависящий от теплового режима водной среды и учитывающий разницу в температурах поверхности воды в бассейне и испарителе.

$$K_t = (e_{20} - e_2) / (e_{0,3} - e_2), \quad (10)$$

где e_{20}, $e_{0,3}$ – упругость насыщенного водяного пара, вычисленная по температуре поверхности воды в бассейне и испарителе;

e_2 – упругость водяного пара на высоте 2 м.

В. И. Кузнецов [8] полагал, что инструментальный коэффициент испарителя зависит от турбулизирующего влияния бортиков, потерь на испарение со смоченных стенок и адвективного относа пара с испаряющей поверхности. Средняя величина коэффициента r для континентальных испарителей определена им равной 0,75, но в каждом конкретном случае наблюдаются отклонения, зависящие от метеорологических условий. По мнению П. П. Кузьмина подход В. И. Кузнецова излишне сложен и приводит к заметным ошибкам вычисления. Поэтому для расчета региональных коэффициентов ($\alpha_{ср}$) П. П. Кузьмин [6] предлагает формулу (11), опираясь только на средние пока-

зания испарителя ГГИ-3000 и полагая, что переходный коэффициент слабо зависит от метеоусловий, изменчивость которых уже проявляется при формировании среднемесячной величины испарения $E_{0,3ср}$:

$$\alpha_{ср} = 0,98 - 0,0007E_{0,3ср}. \quad (11)$$

Из работы П. П. Кузьмина следует, что коэффициент корреляции данной связи равен 0,79, а стандартная ошибка составляет 6,5 %.

Формула (11) привлекательна тем, что отражает линейный характер зависимости от среднего значения испарения, которое определяется в единицах мм/мес, т. е. она пригодна для использования в любом диапазоне осреднения по времени.

В работе [10] представлена методика расчета переходных коэффициентов, основанная на их зависимости от температуры и влажности воздуха. Там же приведены номограммы для определения средних величин коэффициентов перехода за теплый сезон по данным о среднегодовой температуре и упругости водяного пара. Использование номограмм усложняет применение данной методики в пространственных обобщениях.

В. С. Голубев [11], так же как и П. П. Кузьмин, предложил использовать для расчета α средние скорости испарения за конкретный месяц (мм/сут):

$$\alpha_{ср} = 1 - 0,063E_{0,3ср}^{0,6}. \quad (12)$$

Однако данное уравнение нелинейно относительно $E_{0,3ср}$, поэтому имеются трудности с усреднением коэффициента перехода за длительные интервалы времени.

В исследовании [13] В. С. Голубев предложил свою формулу для перехода сезонных величин испарения с ГГИ-3000 к испарению в бассейне, используя дополнительно информацию о широте пункта наблюдений (φ) в градусах и продолжительности сезона наблюдений (τ) в сутках:

$$E_{20} = 0,47E_{0,3} + 1,6\tau - 1,2\varphi + 54. \quad (13)$$

Учитывая, что продолжительность сезона наблюдений и широта связаны с величиной испарения $E_{0,3}$, формула (13) отражает зависимость переходных коэффициентов от величины испарения с ГГИ-3000, только в более сложном виде.

Анализируя изложенное выше, делаем вывод, что для поставленной в данной работе задачи могут быть использованы методики определения региональных коэффициентов перехода, предложенные П. П. Кузьминым и В. С. Голубевым.

Формула (11) была получена на основе данных сравнительных измерений испарения на 15 станциях по программе ВМО, в т. ч. на двух отечественных станциях (Валдай и Дубовка). Работа [7] опубликована в 1979 г., когда проблемы климатических изменений и их влияния на гидрологические процессы еще не стояли. Анализ наблюдений за испарением с поверхности воды в 1960–1990 гг. показал, что, несмотря на потепление климата, зафиксирован отрицательный тренд данной характеристики почти повсеместно на Европейской территории России и в других странах мира [14–16]. Эффект получил название «парадокс испарения». Детальное изучение динамики метеоданных в районах исследования и математическое моделирование показало, что эффект повышения температуры воздуха в значительной степени скомпенсирован существенным снижением скорости ветра в ряде регионов России, Австралии, Китая, США [6, 17–21].

С целью определения влияния климатических изменений на коэффициент перехода, авторами статьи проанализированы совместные многолетние тренды испарения, измеренного с помощью ГГИ-3000, бассейна и коэффициента α. Для этого использовали все доступные в настоящее время данные наблюдений на станциях Салехард, Валдай, Ершов, Цимлянск, Чердынь, Нижнедевицк, Рыбинск и Вязовые. Относительные месячные величины испарения и коэффициентов перехода рассчитаны по формуле:

$$K_i = X_i / X_{ср}, \qquad (14)$$

где X_i – значение исследуемого ряда в i-м году наблюдений;

$X_{ср}$ – среднее многолетнее значение за весь период наблюдений.

Выполненные сопоставления показали, что тренды относительных величин месячного испарения и коэффициентов перехода находятся в противофазе (рис. 5).

Данные закономерности отмечены для всех исследованных станций с мая по сентябрь. При этом зачастую в противофазе находятся даже сезонные изменения испарения и коэффициента α. Как видно из рис. 5, в период, когда почти повсеместно в бассейне Волги наблюдалось падение испарения с поверхности воды, переходные коэффициенты росли, что зачастую не учитывалось в практических расчетах. Наиболее ярко эта тенденция проявляется для Цимлянска. Коэффициент корреляции между месячными значениями испарения и коэффициентом перехода для этой станции лежит в пределах от −0,75 до −0,8.

В табл. 1 приведены данные расчета коэффициентов перехода за различные периоды наблюдений. При этом значения коэффициентов первого периода, относящиеся к 1950–1960 гг., взяты из работы В. И. Кузнецова [9]. В последующий период, до 1990 г., повсеместно наблюдается рост пере-

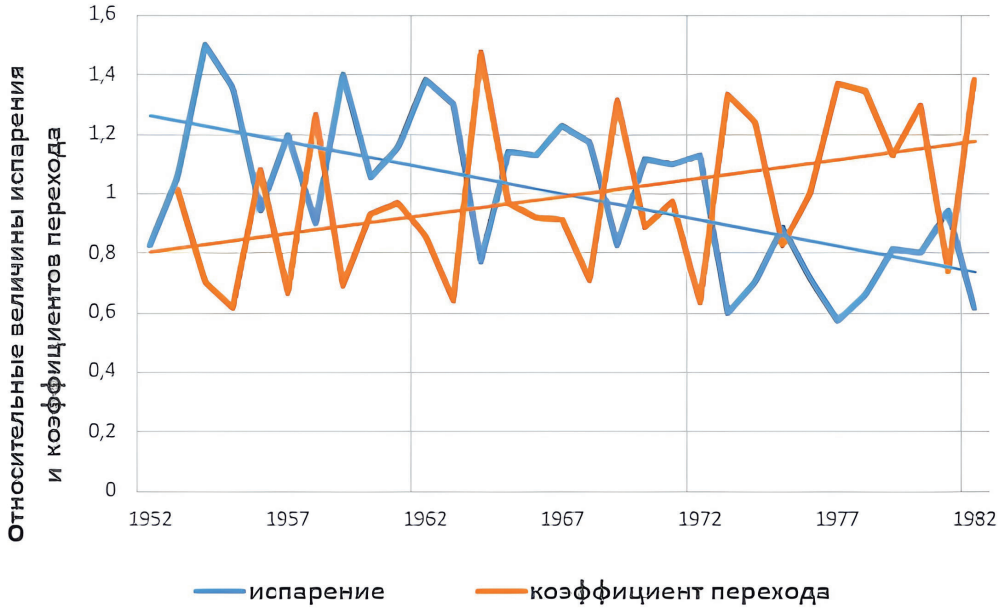


Рис. 5. Динамика относительных величин месячного испарения и коэффициентов перехода для станции Цимлянск (июль)

Fig. 5. Dynamics of relative values of monthly evaporation and transition coefficients for Tsimlyansk station (July)

ходных коэффициентов. Совместные наблюдения за испарением из бассейна и ГГИ-3000 после 1990-х годов проводились лишь на трех площадках – Ершов, Нижнедевицк и Вязовые. Причем в Ершове при росте испарения отмечалось падение переходных коэффициентов.

Более детальный анализ результатов наблюдений на площадках ВБС Нижнедевицкая и Вязовые в последние десятилетия показывает, что переходные коэффициенты в этот период претерпевают значительные колебания. До 1973 г. для станции Вязовые средняя величина коэффициента перехода была равна 0,9, а в период 1973–2003 гг. $\alpha = 1{,}1$. При этом коэффициент вариации данной характеристики увеличился с 0,2 до 0,4. Однако значительный рост испарения в июне, который наблюдался с 2000 по 2015 г., привел к явному падению коэффициента перехода в этот же период. На Нижнедевицкой станции также отмечаются значительные колебания коэффициента α, причем в 2006–2007 гг. он становится меньше, чем в период 1956–1967 гг. Затем вновь наблюдается скачок до значений больше 1.

Следует также рассмотреть еще один важный аспект, вытекающий из анализа полученной информации. В работе [9] при обобщениях не использовались данные для станций Нижнедевицкая и Рыбинск в том случае, когда коэффициент α превышал 1, они были отнесены к «сомнительным» в период наблюдений 1950–1960 гг. При анализе информации, полученной в последующие годы, как было показано выше, на станциях Нижнедевиц-

Таблица 1. Среднемноголетние месячные значения переходных коэффициентов за различные периоды наблюдений

Table 1. Average many-year values of transitional coefficients over the different observation periods

Станция	Период наблюдений, гг.,	Месяц						
		май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	средний
Цимлянск	1954–1967	0,87	0,76	0,75	0,75	0,84	0,97	0,81
	1968–1987	0,81	0,94	0,89	0,91	0,97	1,04	0,93
Ершов	1952–1967	0,79	0,74	0,75	0,76	0,77	0,79	0,77
	1968–1990	0,85	0,82	0,84	0,87	0,88	0,94	0,87
	1991–2020	0,77	0,79	0,8	0,78	0,84	0,88	0,81
Чердынь	1952–1967	0,83	0,87	0,86	0,9	0,88	–	0,87
	1968–1989	0,83	0,87	0,92	0,99	0,97	1,07	0,94
Валдай	1948–1968	0,96	0,97	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95
	1969–1989	0,99	1,03	1,03	0,95	0,88	–	0,98
Рыбинск	1965–1968	0,93	0,92	0,96	0,91	1,1	1,19	1,00
	1969–1987	0,92	0,97	1,03	1,02	1,05	1,1	1,02
Нижнедевицк	1956–1967	0,83	0,96	0,95	0,93	0,95	0,96	0,93
	1968–1990	1,01	1,03	1,1	1,07	1,04	1,02	1,05
	1991–2012	1,01	1,02	1,04	1,1	1,07	1,1	1,06
Вязовые	1952–1966	0,86	0,87	0,91	0,94	0,98	0,97	0,92
	1967–1990	0,95	1,00	1,04	1,04	1,01	1,01	1,01
	1991–2020	1,04	1,07	1,07	1,02	1,04	1,04	1,05
Салехард	1961–1966	–	1,03	1,06	1,06	1,09	–	1,06
	1967–1987	–	1,2	1,06	1,03	1,11	–	1,11

кая, Рыбинск и Вязовые к такой «сомнительной» информации можно отнести больше половины месячных данных о коэффициенте перехода. Заметим, что в табл. 1 для названных стаций даже среднемноголетние значения превышают 1, т. е. испарение с бассейна больше, чем с ГГИ-3000. Основными причинами данного явления могут быть климатические изменения, факторы взаимного расположения данных приборов на местности и особенности их установки в почвенном покрове, погрешности измерений, а также неисправность оборудования.

В соответствии с формулой (9) коэффициент перехода представляет произведение инструментального коэффициента r, значения которого по В. И. Кузнецову [8, 9] меньше 1, и коэффициента K_t, зависящего от среднемесячной разности температур поверхности воды в испарителе ($t_{0,3}$) и бассейне (t_{20}). Судя по данным наблюдений, температура в бассейне выше, чем

в испарителе, из-за меньшего воздействия теплового режима окружающего бассейн грунта. Поэтому коэффициент K_t больше 1. В. И. Кузнецов установил [9], что зависимость между среднемесячной температурой воды в бассейне и испарителе является прямолинейной и выражается уравнением:

$$t_{20} = \gamma t_{0,3} + \lambda. \quad (15)$$

Для континентальных испарительных станций λ равно единице, а γ меняется в пределах 0,94–1. Значения этой характеристики картированы.

Авторами статьи по методике В. И. Кузнецова построена зависимость t_{20} от $t_{0,3}$ для Нижнедевицкой станции за период 1998–2012 гг. Оказалось, что параметры зависимости (15) имеют значения λ = 1,1 и γ = 1,01, т. е. выходят за рамки обозначенных в работе [9] значений. По полученным авторами статьи данным об α и K_t по формуле (9) были рассчитаны инструментальные коэффициенты испарителя *r*, которые в большинстве своем превышали 1, что также расходится с результатами работы [9], в рамках которой при анализе инструментальной составляющей привлекалась метеоинформация о скорости ветра, давлении пара и температуре в месте расположения испарителя и бассейна. Полученные при этом коэффициенты всегда были меньше 1. Не исключено, что специфика взаимного расположения бассейна и испарителя может изменить воздушные потоки пара таким образом, что инструментальный коэффициент будет превышать единицу. Слишком много совместных измерений испарения приводят к подобным результатам. В противном случае подобные результаты являются погрешностями измерений или методическими ошибками организации наблюдений.

В настоящее время можно констатировать лишь тот факт, что методические основы перехода от испарения с испарителя к бассейну, разработанные более 50 лет назад, требуют корректировки с учетом климатических изменений. При этом необходима тщательная ревизия результатов наблюдений за тот же период с целью определения надежности экспериментальной информации. Целесообразно провести дополнительные, более детальные исследования данного аспекта проблемы перехода от испарения с ГГИ-3000 к бассейну 20 м^2 и далее к более крупным водоемам. Пока что наблюдения с испарителя ГГИ-3000 остаются практически единственным источником информации о реальном испарении с водоемов.

Рассмотрев сложные аспекты перевода данных с испарителей на небольшие водоемы, аналогом которых является бассейн площадью 20 м^2, авторы данной статьи пришли к выводу о целесообразности использования подхода П. П. Кузьмина [7] и его формулы (11). Во-первых, как уже упоминалось выше, она носит линейный характер зависимости переходных коэффициентов от испарения, что позволяет использовать ее для любых

многолетних интервалов времени. Во-вторых, в некотором роде эта формула отслеживает влияние климатических изменений испарения на коэффициент α. В соответствии с ней при падении испарения наблюдается рост переходных коэффициентов, и наоборот. Однако данная формула была получена до 1979 г. по наблюдениям тех лет, поэтому ее необходимо проверить с учетом последующей информации. В ходе проведенного исследования авторами статьи для восьми станций рассчитаны среднемноголетние месячные значения испарения и переходных коэффициентов для всего периода наблюдений. Общие периоды наблюдений отражены в табл. 1. В табл. 2 представлены среднемноголетние месячные значения испарения (ГГИ-3000), переходного коэффициента и коэффициента корреляции между ними.

Таблица 2. Среднемноголетние месячные значения испарения ($E_{0,3ср}$) (ГГИ-3000), переходного коэффициента ($\alpha_{ср}$) и квадрата коэффициента корреляции между ними для ежегодных значений

Table 2. Average many –year values of evaporation ($E_{0,3ср}$) and (ГГИ-3000), transition coefficient ($\alpha_{ср}$) and squared coefficient of correlation between them for early values

Станция	Месяц								
	май			июнь			июль		
	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2
Цимлянск	135	0,81	0,6	175	0,88	0,6	207	0,8	0,66
Ершов	147	0,8	0,2	191	0,79	0,2	208	0,8	0,44
Чердынь	96	0,84	0,2	107	0,85	0,2	105	0,9	0,4
Валдай	73	0,97	0,2	88	1	0,1	90	1	0,17
Рыбинск	98	0,94	0	122	0,97	0	108	1	0
Нижнедевицк	95	0,99	0,14	113	1,01	0,14	116	1,05	0,53
Вязовые	106	0,97	0,35	117	1	0,39	117	1,03	0,31
Салехард	–	–	–	83	1,15	0,31	93	1,4	0,42
Цимлянск	192	0,9	0,62	125	0,91	0,57	62	1	0,44
Ершов	182	0,8	0,44	122	0,83	0,42	60	0,88	0,17
Чердынь	78	1	0,35	39	0,94	0,02	25	1,03	0,27
Валдай	77	0,9	0,14	44	0,9	0,16	–	–	–
Рыбинск	108	1	0,08	69	1,06	0,13	39	1,1	0
Нижнедевицк	106	1,06	0,48	71	1,05	0,38	37	1,05	0,23
Вязовые	102	1,01	0,23	65	1	0,24	37	1,03	0,3
Салехард	56	1,06	0,35	27	1,09	0,54	–	–	–

Как следует из табл. 2, для большинства станций степень связи данных характеристик довольно низкая. По результатам расчета по методике П. П. Кузьмина построена аналогичная связь (11), коэффициенты которой

отличаются от полученной в работе [7]. Причем коэффициент корреляции новой связи *(R* = 0,62) ниже, чем у (11) (*R* = 0,79). Однако, если исключить из анализа данные станций Нижнедевицкая, Рыбинск и Вязовые, то параметры новой связи будут почти такие же, как у формулы П. П. Кузьмина, т. е. полученная на этих станциях информация не вписывается в разработанные ранее схемы В. И. Кузнецова и П. П. Кузьмина. По-видимому, данные схемы требуют корректировки.

В нашей работе мы опирались на информацию о сезонных величинах испарения. Поэтому была построена корреляционная зависимость между сезонными значениями испарения с бассейна (E^c_{20}) и с ГГИ-3000 ($E^c_{0,3}$) для всех лет наблюдений на восьми станциях (рис. 6). Данная зависимость хорошо описывается уравнением:

$$E^c_{20} = E^c_{0,3}(1,15 - 0,0004E^c_{0,3}). \quad (16)$$

Коэффициент корреляции данной связи равен 0,9, т. е. довольно высокий. При этом стандартная ошибка расчета тоже высокая – 13 %. При расчетах по формуле П. П. Кузьмина (15) ошибка в два раза меньше. Однако при ее выводе использовались данные, полученные только до 1972 г., и, как указывалось выше, только два пункта наблюдений расположены на территории России.

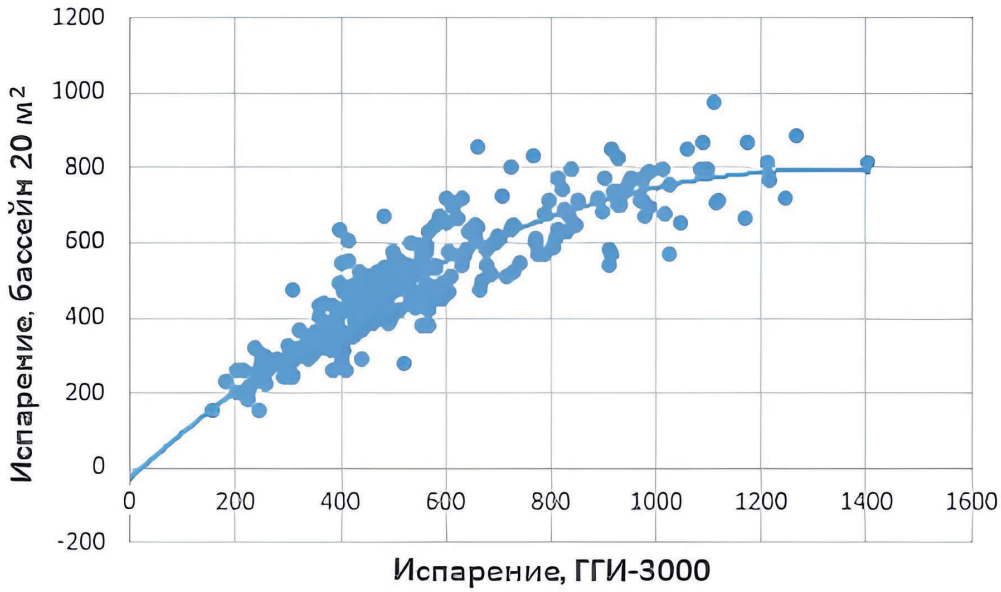


Рис. 6. Зависимость между сезонными значениями испарения с бассейна и с ГГИ-3000

Fig. 6. Dependence between season values of evaporation from the pool and from GTI -3000

В скобках формулы (16) находится выражение для расчета α^c сезонных значений испарения, которая имеет тот же вид, что и (11), но с другими коэффициентами:

$$\alpha^c = 1{,}15 - 0{,}0004E^c_{03}. \quad (17)$$

Это связано с тем, что для расчета коэффициентов перехода по формуле (11) необходима информация о многолетних среднемесячных значениях, а по формуле (17) – о сезонных.

Проведены также расчеты сезонных величин испарения с бассейна для всех лет наблюдений и станций по формуле В. С. Голубева (13) [22]. Коэффициент корреляции с наблюденными данными составил 0,88, т. е. немного ниже, чем по формуле (16). Стандартная ошибка расчета при этом равна 17 % – более высокая, чем при расчетах по (16). Формула В. С. Голубева уступает по точности полученному авторами уравнению. Сопоставлены и средние значения сезонных коэффициентов перехода для восьми вышеназванных пунктов наблюдения. При этом коэффициент перехода для метода В. С. Голубева рассчитывался путем деления испарения с бассейна, полученного по формуле (13), на величину испарения с ГГИ-3000. В табл. 3 приведены результаты сопоставления средних сезонных величин коэффициентов перехода, полученных на основе результатов наблюдения по методике В. С. Голубева и по формуле (17). В подавляющем большинстве случаев результаты расчета по формуле (17) ближе к экспериментальным данным.

Таблица 3. Среднемноголетние сезонные величины коэффициентов перехода α с испарения, измеренного на ГГИ-3000 на испарение с бассейна площадью 20 м² и стандартные ошибки их определения δ, полученные на основе расчетов по методике В. С. Голубева [13] и формуле (17)

Table 3. Average many-year values of coefficients of transition from α evaporation, gauged at GTI-3000 to δ evaporation from a 200 m² pool and standard errors of their definition, obtained according V. S. Golubev calculation methods [13] and according formula (17)

Пункт наблюдения	Данные наблюдений	Расчет по методике В. С. Голубева		По формуле (17)	
	α	α	δ, %	α	δ, %
Цимлянск	0,82	0,77	15	0,81	13
Ершов	0,79	0,75	12	0,79	10
Чердынь	0,96	1,15	21	0,99	15
Валдай	0,94	1,09	19	1,00	10
Рыбинск	0,99	0,93	9	0,95	7
Нижнедевицк	0,99	0,96	15	0,95	15
Вязовые	1,02	0,95	19	0,95	19
Салехард	1,03	1,40	34	1,05	15
Среднее	**0,94**	**1**	**18**	**0,94**	**13**

Коэффициент корреляции между измеренными и расчетными данными для авторской формулы равен 0,85, для уравнения В. С. Голубева – 0,7. Этот факт можно объяснить тем, что формула (13) была разработана более 40 лет назад и в ней не учтены новые данные наблюдений. Однако модернизировать ее довольно сложно. В работе [13], где она приведена, нет информации о пунктах наблюдения и рядах данных, на основе которых формула выведена. Ничего не сказано и о методике ее получения, поэтому в расчетах рекомендуется использовать формулу (17).

Отметим также, что средние значения коэффициентов перехода для всех анализируемых станций, которые являются глобальными для изучаемой территории, совпадают для данных наблюдений и расчетов по формуле (17) и равны 0,94. Близость глобальных коэффициентов к единице приводит к выводу, что в современных условиях средняя величина испарения с небольших водоемов на анализируемой территории близка измеренной с помощью испарителей ГГИ-3000.

Можно сравнить данные нашего реанализа (рис. 2, рис. 4) с результатами картирования, представленного в Указаниях[1]. Сравнительный анализ показывает, что среднемноголетнее испарение в период 2000–2020 гг. примерно такое же или немногим ниже, чем в 1960-х годах. Данное обстоятельство объясняется тем, что в 1970–1980-е годы зафиксировано довольно заметное падение испарения с водной поверхности на Европейской территории России [6, 14, 16, 17]. В 1990-е годы спад испарения в основном прекратился, а на некоторых испарительных площадках был зафиксирован его рост. Однако, несмотря на рост испарения в последние десятилетия, в среднем в период 2000–2020 гг. величина испарения не достигла тех значений, которые были использованы при создании карты в конце 1960-х годов.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы для расширения баз данных и пространственных обобщений об испарении с водной поверхности впервые реализован метод реанализа, основанный на использовании физически обоснованной математической модели «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА».

По данным о среднесуточных значениях температуры воздуха, скорости ветра, давления водяного пара, нижней и общей облачности на пространственной сетке в местах расположения 105 метеостанций Европейской территории России рассчитаны средние многолетние величины испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Предварительно была выполнена калибровка модели по данным наблюдений на 35 площадках за испарением с водной поверхности и построены соответствующие карты для данного участка территории России.

Результаты пространственного моделирования обобщены, получен ряд новых закономерностей, связывающих величину среднемноголетнего испарения с поверхности воды со среднемноголетними значениями температуры воздуха и скорости ветра за период 2000–2020 гг. Коэффициенты корреляции отдельных связей составляют 0,99, а стандартная ошибка расчета – 7 %. Полученная авторами статьи формула для расчета испарения по данным о температуре воздуха использована при реанализе величин испарения на регулярной пространственной сетке 0,5° широты × 0,5° долготы.

При реанализе на регулярной сетке средняя величина испарения с воды за период 2000–2020 гг. на исследуемой территории составила 524 мм/год. По данным расчета в узлах расположения метеостанций – 514 мм/год, а среднее измеренное испарение на 35 пунктах наблюдения, используемых при калибровке математической модели, равно 544 мм/год.

Математическая модель испарения с водной поверхности была откалибрована по данным наблюдения с испарителя ГГИ-3000. В исследовании впервые показано, что коэффициенты перехода результатов наблюдения, полученных методом испарителей, к испарению с малых и средних водоемов подвержены климатическим изменениям, произошедшим за последние десятилетия. При этом рост испарения приводит к падению переходных коэффициентов, и наоборот. Впервые выполнена корректировка основных расчетных формул для определения коэффициентов перехода, которые были получены более 50 лет назад и используются до сих пор. Статистический анализ данных наблюдений показал, что среднее значение коэффициента перехода для исследуемой территории с испарения, измеренного испарителями ГГИ-3000, к испарению с бассейна 20 м^2 составляет 0,94.

Полученные в ходе исследования результаты среднемноголетних значений испарения за период 2000–2020 гг. сопоставлены с данными картирования, представленными в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов для периода 1960-х годов. Сравнения показали, что величины испарения в 2000-е годы зачастую не превышают наблюдавшиеся в 1960-е годы. Это объясняется тем, что на Европейской территории России в период 1970–1980 гг. произошло значительное уменьшение испарения по сравнению с 1960-ми годами, и последующий его рост в 2000-е годы не смог в среднем компенсировать данное падение.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов В. К. Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1944. 120 с.
2. Постников А. Н. О распределении испарения с водной поверхности на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 22–28.
3. Uliana E. M. et al. Estimated evaporation of lakes by climate reanalysis data and artificial neural networks // Journal of South American Earth Sciences. 2024. Vol. 136. P. 104811.
4. Andreasen M. et al. Estimating daily lake evaporation from biweekly energy-budget data // Hydrological Processes. 2017. Vol. 31. No. 25. P. 4530–4539.
5. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.
6. Лавров С. А. Влияние климатических изменений на процессы формирования стока на водосборах. СПб: Свое издательство, 2024. 294 с.
7. Кузьмин П. П. О соотношении между показаниями водных испарителей и испарительного бассейна площадью 20 м^2 // Труды ГГИ. 1979. Вып. 258. С. 111–121.
8. Кузнецов В. И. О переходных коэффициентах наземных испарителей ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1954. Вып. 45 (99). С. 142–156.
9. Кузнецов В. И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м^2 по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3–32.
10. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.
11. Голубев В. С. Экспериментальное определение составляющих водного баланса: в кн. Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 8–21.
12. Вуглинский В. С., Албул И. П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземного испарителя ГГИ-3000 // Вестник СПбГУ. 2016. Сер. 7. Вып. 3. С. 118–128.
13. Голубев В. С., Урываев А. П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Труды ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.
14. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети: научно-прикладной справочник под редакцией В. С. Вуглинского. 2021. 64 с.
15. Peterson A. T., Golubev V. S., Groisman P. Y. Evaporation losing its strength // Nature. 1995. No. 377. P. 687–688.
16. Сперанская Н. А. Испарение с поверхности почвы с травяным покровом: доступные наблюдения и восстановленные данные // Известия РАН. Сер. Географическая. 2016. № 2. С. 49–60.
17. 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. https://doi.org10.35567/1999-4508-2019-1-1
18. Mc Vicar T. R. et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output // Geophysical Research Letters. 2008. No. 35. P. 1–13.
19. Han S. and Tian F. A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. No. 24. P. 2269–2285.
20. Rayner D. P. Wind run changes are the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia // Journal of Climate. 2007. No. 20. P. 3379–3394.
21. Roderick M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance II. Energy Balance and Interpretation // Geography Compass. 2009. No. 3/2. P. 761–780.
22. Многолетние изменения испарения с открытой водной поверхности по данным испарительной сети: научно-прикладной справочник под редакцией В. Ю. Георгиевского. СПб, 2019. 112 с.

REFERENCES

1. Davydov V. K. Evaporation from water surface in the European part of Russia. M.: Gidrometeoizdat, 1944. 120 p.
2. Postnikov A. N. About distribution of evaporation from water surface on the territory of Russia. *Proceedings of RGGMU*. 2014. No. 36. P. 22–28.
3. Uliana E. M. et al. Estimated evaporation of lakes by climate reanalysis data and artificial neural networks. *Journal of South American Earth Sciences*. 2024. Vol. 136. P. 104811.
4. Andreasen M. et al. Estimating daily lake evaporation from biweekly energy-budget data. *Hydrological Processes*. 2017. Vol. 31. No. 25. P. 4530–4539.
5. Kalyuzhniy I. L., Lavrov S. A. Hydro/physical processes on a catchment. SPb.: Nestor-Istoria, 2012. 615 p.
6. Lavrov S. A. Climatic changes impact on the processes of the runoff formation at the catchment. SPb: Svoye izdatelstvo, 2024. 294 p.
7. Kusmin P. P. About correlation between indications of water evaporators and evaporation poll of 20 m^2 area. *Proceedings of GGI*. 1979. Вып. 258. P. 111–121.
8. Kuznetsov V. I. About transition natural coefficients of ground-based evaporators GGI-3000. *Proceedings of GGI*. 1954. Issue 45 (99). P. 142–156.
9. Kuznetsov V. I. Methods of calculation of evaporation from pool of 20 m^2 area according observations at evaporators GG-3000. *Proceedings of GGI*. 1970. Issue 181. P. 3–32.
10. Konstantinov A. R. Evaporation in nature. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 532 p.
11. Golubev V. S. Experimental identification of the water balance components: in *Experimental research of hydrological processes and phenomena*. M.: MGU Publishing House, 1979. P. 8–21.
12. Vuglinskiy V. S., Albul I. P. Methods of calculation of evaporation from water surface according to ground-based evaporator GG-3000 data. *SPbGU newsletters*. 2016. Iss. 7. Iss. 3. P. 118–128.
13. Golubev V. S., Uryvaev A. P. A method of water evaporators and its application for calculating of evaporation from water bodies' surfaces. *Proceedings of GGI*. 1983. Iss. 289. P. 69–76.
14. Many-year changes of evaporation on the European territory of Russia according the data of water/evaporation network: scientific/applied reference book edited by V. S. Vuglinskiy. 2021. 64 p.
15. Peterson A. T., Golubev V. S., Groisman P. Y. Evaporation losing its strength. *Nature*. 1995. No. 377. P. 687–688.
16. Speranskaya N. A. Evaporation from grass-covered soil surface: available observations and restored data. *Newsletters of RAN*. Series: Geography. 2016. No. 2. P. 49–60.
17. Lavrov S. A. Laws of formation of evaporation from the ground and water surfaces under the influence of climatic changes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2019. No. 1. P. 4–23. https://doi.org10.35567/1999-4508-2019-1-1
18. Mc Vicar T. R. et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*. 2008. No. 35. P. 1–13.
19. Han S. and Tian F. A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions. *Hydrological Earth Systems Science*. 2020. No. 24. P. 2269–2285.
20. Rayner D. P. Wind run changes are the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia. *Journal of Climate*. 2007. No. 20. P. 3379–3394.
21. Roderick M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance II. Energy Balance and Interpretation. *Geography Compass*. 2009. No. 3/2. P. 761–780.
22. Many-year measurements of evaporation from open water surface according to the evaporation network data: scientific/applied reference book edited by V. Y. Georgievsky. SPb, 2019. 112 p.

Сведения об авторах:

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

Иванова Светлана Александровна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; https://orcid.org/0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

About the authors:

Sergey A. Lavrov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

Svetlana A. Ivanova, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; https://orcid.org/0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

Поступила в редакцию / Received 22.01.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 09.02.2026.
Принята к публикации / Accepted 16.03.2026.