

УДК 556.5.01

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА¹

© 2024 г. И. В. Землянов^{a, b}, А. А. Сапожникова^{a, b}, Е. А. Ракчеева^{a, b, *}, А. Е. Павловский^a

^aГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, 119034 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: lizaveta.r86@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 15.04.2024 г.

Рассмотрены методы определения испарения с поверхности воды и почвы. Выполнены расчеты месячных величин испарения в пределах экспериментальных полигонов Крымского п-ова по данным измерений автоматизированных метеорологических комплексов за 2022–2023 гг. Результаты расчета испарения с поверхности водохранилищ сравнивались с величиной испарения, полученной методом наземных испарителей за отдельные месяцы. Расчет по формуле В.И. Мокляка показал наилучшее соответствие результатам, полученным на основе данных натурных наблюдений за испарением. Относительная погрешность определения испарения по рекомендуемому методу составляет 15%. Приведена оценка месячного испарения с почвы, определенного расчетными методами с использованием зависимостей от разных метеорологических факторов.

Ключевые слова: Крымский полуостров, водохранилище, испарение, экспериментальные полигоны, наземный испаритель, автоматическая метеостанция.

DOI: 10.31857/S0321059624060103 **EDN:** VOLBXF

ВВЕДЕНИЕ

Региональные особенности режима водных объектов Крымского п-ова и его уникальные природно-климатические условия представляют научный и практический интерес. Поскольку Крымский регион – самый водоемкий в России, существует необходимость проведения исследований по уточнению элементов водного баланса как отдельных водных объектов, в частности водохранилищ, так и их водосборных территорий и их влияния на безвозвратные потери воды.

Испарение – основная составляющая расходной части водного баланса водоемов и почв. Однако будучи очень важным элементом режима увлажнения в разных регионах ЕТР, особенно в тех, что испытывают дефицит во-

дных ресурсов, испарение остается наименее изученным элементом водного баланса. Это объясняется отсутствием данных натурных наблюдений в разных природных условиях. Стремительное сокращение количества станций водноиспарительной сети не позволяет надежно оценивать пространственное распределение испарения и решать практические задачи, связанные с оценкой обеспеченности водными ресурсами территорий в современных условиях [9]. Без данных натурных наблюдений за испарением невозможна оценка достоверности различных климатических и гидрологических моделей. Кроме того, эти данные необходимы при разработке и совершенствовании методов расчета испарения при отсутствии материалов наблюдений.

На территории Крыма действует только одна станция, проводящая наблюдения за испарением с водной поверхности, и она расположена в степной зоне Северо-Крымского района, который характеризуется засушливым климатом и отсутствием водно-ресурсного потенциала.

¹ Статья подготовлена в рамках работ государственного задания (тема 0126-2021 “Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма”).

С учетом вышесказанного становится ясно, что знание величин и сезонного хода годового испарения с поверхности водоемов и особенно — с поверхности сельскохозяйственных полей и водосборов крайне необходимо для решения многих водохозяйственных проблем.

В 2022–2023 гг. в рамках государственного задания выполнялись специализированные полевые работы по организации и проведению продолжительных непрерывных и периодических наблюдений за метеорологическими параметрами на экспериментальных полигонах региона.

Собранный и обработанный архив материалов наблюдений позволил дать оценку величине испарения с поверхности изучаемых водохранилищ и почв района исследований, полученных разными способами. На основе результатов сопоставления величин, рассчитанных по эмпирическим формулам, с данными натурных наблюдений был выбран расчетный метод определения испарения с водной поверхности. По результатам расчетов была проведена оценка влияния метеорологических факторов на испарение с поверхности почвы в разные сезоны года.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения работ по определению величин испарения с водной поверхности и с поверхности почвы были назначены экспериментальные полигоны в пределах репрезентативных речных бассейнов, отражающих особенности формирования водных ресурсов в разных частях Крымского п-ова. Внимание было уделено бассейнам рек трех гидрографических районов, где сосредоточены основные ресурсы поверхностных вод Крыма: рек восточной части северного макросклона Крымских гор, впадающих в зал. Сиваш Азовского моря; рек западной части северного макросклона Крымских гор, впадающих в Черное море; рек южного макросклона Крымских гор, впадающих в Черное море. Экспериментальные полигоны охватывают территории, занимаемые соответственно Белогорским (р. Биюк-Карасу), Партизанским (р. Альма) и Изобильненским (р. Улу-Узень) водохранилищами. Районы исследования характеризуются

разными природно-климатическими и ландшафтными условиями.

На полигонах были организованы наблюдательные площадки, оснащенные автоматическими метеорологическими станциями (АМС) с комплектом датчиков “Davis Vantage Pro”, установленным на высоте 0.5 и 2.0 м над поверхностью почвы. Основные измеряемые метеорологические параметры следующие: температура и влажность воздуха, скорость ветра и количество осадков. Также на наблюдательных площадках были установлены испарители “ГГИ-3000”.

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Методы

Для оценки испарения с поверхности водоемов есть различные методы. Лучшие результаты дают расчеты, основанные на данных наблюдений за испарением, т. е. метод испарителей [2, 4]. Плавающий испарительный бассейн площадью 20 м² признан Всемирной метеорологической организацией временным эталоном, показания которого характеризуют реальное испарение с водоема в месте его установки [2]. В работах [3, 4, 7] установлено, что, помимо плавучего испарительного бассейна, наиболее близкие к реальному испарению с поверхности водоема — показания плавучих испарителей “ГГИ-3000”, установленных на специальных платформах. Однако наиболее часто используемый прибор на наблюдательной сети — наземный испаритель “ГГИ-3000”, но показания наземного испарителя не дают конечного результата испарения с поверхности водоема из-за погрешностей, связанных с конструкцией прибора и разницей гидрометеорологических условий над испарителем и над водоемом. Для перехода от показаний наземного испарителя к величинам реального испарения с водоема есть несколько методик [1–4]. Метод испарителей позволил в количественной форме исследовать многие важнейшие закономерности испарения с поверхности водоемов, знание которых помогло обосновать эмпирические формулы для расчета испарения.

Эмпирические формулы получили наибольшее распространение при оценке испарения

с поверхности водоемов. В подавляющем большинстве они относительно просты и основаны на использовании данных стандартных наблюдений на сети метеостанций. Однако материалы, используемые при выводе формулы, часто определяют ее региональный характер.

Величина испарения с поверхности водоема может быть определена и методами водного и теплового балансов, по методу турбулентной диффузии. Эти методы имеют достаточно строгую физическую основу, однако из-за недостаточности исходных натурных данных точные решения уравнений часто заменяются упрощенными эмпирическими и полуэмпирическими выражениями, которые применяются для приближенных оценок испарения за длительные периоды времени.

Испарение с поверхности Белогорского, Изобильненского и Партизанского водохранилищ рассчитывалось методом испарителей за отдельные периоды, в течение которых проводились экспедиционные работы. Величины испарения за месяц по испарителям “ГГИ-3000” восстанавливались по измеренным АМС метеоданным в соответствии с [9]. Далее переход от показаний испарителя “ГГИ-3000” к средним месячным величинам испарения с поверхности водохранилищ проводился по формуле В.С. Голубева и А.П. Урываева [4]. Таким образом было рассчитано испарение с поверхности Белогорского водохранилища за июнь, август, ноябрь 2022 г. и май, октябрь 2023 г.; Изобильненского и Партизанского водохранилищ – за август, ноябрь 2022 г. и май, октябрь 2023 г. Полученные результаты расчета испарения с поверхности водохранилищ методом испарителей приняты за основу для дальнейшего выбора наиболее подходящих эмпирических формул.

Эмпирические формулы, которые использовались для расчета испарения с поверхности водохранилищ, можно разделить на три группы.

К первой группе можно отнести формулы, в которых использовались только стандартные метеорологические данные, получаемые на метеостанциях. К ним относятся формулы А. Мейера, Мейера–Тихомирова, Б.В. Полякова, В.К. Да-

выдова (как для суточного, так и для месячного испарения), В.И. Мокляка [8, 10, 11]. В этих формулах испарение связано с дефицитом влажности воздуха и скоростью ветра. Также к этой группе относятся и формулы Н.И. Иванова и Иванова–Молчанова, где для расчета испарения использовались температура воздуха и относительная влажность воздуха.

Вторая группа формул основана на величинах, которые получены с помощью специальных наблюдений или путем расчета. В эту группу входят формулы Б.Д. Зайкова, Браславского–Викулиной [8] и полученная на их основе формула ГГИ, приведенная в [16]. Здесь использовались максимальная упругость водяного пара, вычисленная по температуре поверхности воды в водохранилищах, средние значения абсолютной влажности воздуха и скорости ветра над водохранилищами. Для Белогорского водохранилища испарение по формуле ГГИ определено двумя способами: традиционным, когда входящие в формулу величины рассчитывались по [16] по данным Белогорской селестоксовой станции, и по измеренным параметрам с допущением, что они могут быть распространены на все водохранилище.

Расчет испарения по формулам третьей группы основан одновременно и на стандартных данных, и на данных специальных наблюдений. К этой группе можно отнести формулы Крицкого–Менкеля–Россинского, Пенмана [8].

С помощью наиболее простых и нетребовательных к наличию специфических исходных данных эмпирических формул первой группы рассчитаны величины испарения за наибольшее количество месяцев. Расчеты по формулам второй и третьей групп (Пенмана и ГГИ) затруднены отсутствием продолжительного ряда наблюдений за температурой воды в водохранилищах.

Результаты

Вычисленные по всем перечисленным выше формулам величины испарения с поверхности исследуемых водохранилищ сравнивались с результатами расчетов по методу испарителей (табл. 1). Худшие результаты показали формулы

Таблица 1. Рассчитанное различными методами испарение с поверхности Белогорского водохранилища (мм) в 2022 г.

Формула	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Метод испарителей			110		110			41	
Мейера	78	81	95	124	92	89	47	31	19
Мейера–Тихомирова	61	64	75	97	72	70	37	24	15
Полякова	61	60	66	79	64	64	42	31	23
Давыдова для суточного испарения (полная)	59	63	67	90	71	67	42	28	20
Давыдова для суточного испарения (сокращенная)	66	81	89	120	97	86	53	36	24
Давыдова для месячного испарения (полная)	52	55	63	78	62	59	36	26	17
Давыдова для месячного испарения (сокращенная)	69	79	93	116	94	86	52	37	24
Мокляка	67	81	96	117	97	90	58	43	27
Иванова	74	92	104	136	102	98	58	36	21
Иванова–Молчанова	59	73	83	109	81	79	46	29	17
ГГИ по измерениям				57	60	42	50	28	
ГГИ по расчетам			124	151	132	153	100	60	
Пенмана				95	104	96	82	42	

Б.В. Полякова, Мейера–Тихомирова, Иванова–Молчанова, полные формулы В.К. Давыдова (как для суточного, так и для месячного испарения) и формула ГГИ. Они значительно занижают месячные величины испарения, расхождения доходят до 50%. Формула А. Мейера лучше зарекомендовала себя для Изобильненского водохранилища (расхождения 1–23%), в отличие от Белогорского и Партизанского водохранилищ (8–38%).

Величины испарения для всех водохранилищ, рассчитанные по формулам Пенмана, В.И. Мокляка и Н.И. Иванова, имеют расхождение с методом испарителей на 1–14%. Для Изобильненского водохранилища также дают хорошие результаты сокращенные формулы В.К. Давыдова (как для суточного, так и для месячного испарения) – расхождение ≤12%.

Для дальнейшего анализа были выбраны результаты расчетов по формуле В.И. Мокляка как по наиболее подходящей для всех исследуемых водохранилищ, чаще используемой в данной области и не требующей специфических исходных данных (как, например, формула Пенмана).

Анализ результатов расчетов по формуле В.И. Мокляка показал, что величины испаре-

ния с поверхности исследуемых водохранилищ различаются (рис. 1). В основном испарение с поверхности Изобильненского водохранилища значительно превосходит величину испарения с других водохранилищ, так как для него характерны более высокая температура воздуха, меньшая относительная влажность и, как следствие, наибольший дефицит влажности. Особенно заметна разница в летние месяцы, когда испарение максимально. В весенний период разница между месячными величинами испарения с поверхностей исследуемых водохранилищ не столь велика.

Суммарное испарение с июля по ноябрь 2022 г. (период, когда наблюдения проводились одновременно на всех трех полигонах) составило 504 мм с поверхности Изобильненского водохранилища, 405 мм и 379 мм с поверхностями Белогорского и Партизанского водохранилищ соответственно. В 2023 г. суммарное испарение за февраль–май и июль–сентябрь составило 613 мм с поверхности Изобильненского водохранилища, 529 мм с поверхности Белогорского и 533 мм с поверхности Партизанского.

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

Испарение с поверхности почвы, как и испарение с поверхности воды, представляет собой

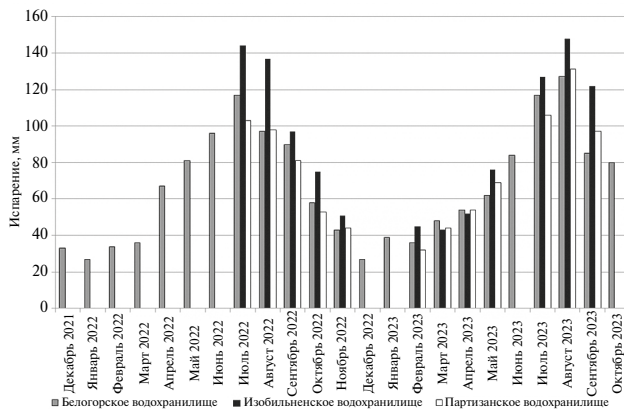


Рис. 1. Месячные суммы испарения с поверхности водохранилищ, вычисленные по формуле В.И. Мокляка.

одно из звеньев влагооборота. Влагооборот деятельной поверхности (верхнего слоя почвы) вместе с потоками тепла, проходящими через нее, — главный фактор, определяющий климатические особенности приземного слоя воздуха и верхних слоев почвы, так как вертикальные градиенты температуры и влажности в этих слоях прямо пропорциональны притоку тепла и парообразной влаги от деятельной поверхности в воздух или обратно [15].

Методы

Определение интенсивности испарения прямыми методами с помощью специальных приборов в регионе не проводится, а организация почвенно-испарительной площадки в рамках работ по государственному заданию нецелесообразна и, кроме того, технически неосуществима. Поэтому в настоящем исследовании применены некоторые доступные расчетные методы определения испарения с почвы, основанные на данных метеорологических наблюдений.

Испарение с поверхности почвы — более сложный процесс, чем испарение с водной поверхности, и зависит от многих факторов, главнейшие из которых — увлажненность почвенной поверхности и метеорологические условия над нею: интенсивность солнечной радиации, влажность и температура воздуха, скорость ветра [6].

Последнее определяет интенсивность турбулентного перемешивания, которое играет ве-

душую роль в формировании микроклимата и посредством которого осуществляется передача водяного пара в воздухе. Вертикальный градиент влажности при заданных увлажненности и температуре подстилающей поверхности и вертикальный градиент температуры воздуха под влиянием солнечной радиации также, в свою очередь, воздействуют на интенсивность турбулентного перемешивания и тем самым на испарение.

Схема расчета испарения по данным наблюдений на разных высотах в температурно-неоднородной среде — основа метода турбулентной диффузии, предложенной А.Р. Константиновым [6, 8].

Для расчетов по этой схеме использовались данные наблюдений за температурой, влажностью и плотностью воздуха, скоростью ветра по шести срокам (1, 7, 10, 13, 16 и 19 ч) в период 2022–2023 гг. Градиенты температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра рассчитаны по измеренным АМС элементам на высотах 0.5 и 2.0 м. Кроме того, при расчете влагообмена данным способом учитывался параметр шероховатости испаряющей поверхности. Значение коэффициента шероховатости зависит от вида подстилающей поверхности, и в данном расчете принят равным 3 см (средняя шероховатость луга).

Вертикальный поток водяного пара E (мм) за промежуток времени τ выражен формулой

$$E = 10\rho k_e \frac{\partial q}{\partial z} \tau, \quad (1)$$

где $\partial q/\partial z$ — градиент удельной влажности воздуха, 1/см; k_e — коэффициент обмена, см²/с.

Величина коэффициента обмена представлена так:

$$k_e = \gamma k \alpha_e = 0.63 \times 10^3 \alpha_e (u_2 - u_1), \quad (2)$$

$(u_2 - u_1)$ — градиент скорости ветра, м/с; α_e — безразмерный параметр, который рассчитывается так:

$$\alpha_e = 1 + 0.72 \left(\sqrt{1 - 28 \left(\frac{z_0}{z_{00}} \right) \text{Ri}_{1.0}} - 1 \right), \quad (3)$$

z_0 — коэффициент шероховатости, см; z_{00} — размерный коэффициент, равный 1 см; $Ri_{1.0}$ — число Ричардсона на высоте 1 м.

Ri — универсальный параметр, определяющий все основные свойства турбулентных процессов в температурно-неоднородной атмосфере [6]. От его величины непосредственно зависят значения коэффициентов α , k и γ .

$$Ri_{1.0} = -0.078 \frac{T_1 - T_2}{(u_2 - u_1)^2}, \quad (4)$$

$T_2 - T_1$ — градиент температуры воздуха, °С.

При сверхadiaбатической стратификации величина $Ri < 0$, а в инверсиях $Ri > 0$.

При равновесном вертикальном градиенте температуры профили всех метеорологических элементов над любыми видами подстилающей поверхности меняются с высотой по логарифмическому закону. Поэтому при расчете k_e вводится поправочный коэффициент γ , характеризующий отличие естественных профилей метеозаэментов от логарифмических:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - Ri_{1.0}}}. \quad (5)$$

$\partial q / \partial z$ при расчетах испарения по методу турбулентной диффузии рассчитывался по формуле

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0.45 \times 10^{-5} \gamma (e_1 - e_2), \quad (6)$$

где $(e_1 - e_2)$ — градиент упругости водяного пара, гПа.

Имея величину плотности воздуха, измеряемую АМС, и принимая промежуток времени, за который рассчитывается влагообмен: $\tau = 3.6 \times 10^3$ с, — определяется интенсивность испарения по формуле (1).

Расчет суточного испарения по данным срочных наблюдений сводится к нахождению их суммы:

$$E_{\text{сут}} = 3(E_7 + 1.06E_{10} + 1.10E_{13} + 1.06E_{16} + E_{19}). \quad (7)$$

Интенсивный перенос водяного пара в верхние слои воздуха происходит в дневные часы при сверхadiaбатической стратификации атмосферы

в сроки 10, 13 и 16 ч. Сильный ветер в отдельные даты (при больших положительных значениях градиента скорости) в условиях температурной инверсии также способствует турбулентному перемешиванию объемов воздуха и переносу водяного пара в верхние слои. В случае когда скорость ветра снижена до 0 м/с, градиент влажности воздуха отрицательный, а состояние атмосферы устойчивое в температурном отношении, что характерно для ночного времени суток, перемещение воздушных слоев отсутствует и процесса испарения или обратного ему процесса конденсации не происходит.

Расчеты по методу турбулентной диффузии очень трудоемкие. Поэтому в настоящем исследовании также рассмотрен предложенный А.Н. Постниковым (Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург) легкий и доступный способ определения испарения с почвы в теплую часть года. Метод автора основан на связи испарения со среднесуточным дефицитом влажности воздуха и учете количества и распределения осадков в расчетный период [13, 14].

В основе метода — зависимость следующего вида:

$$E = K(w)E_0, \quad (8)$$

где E — испарение; $K(w)$ — функция от влажности почвы; E_0 — испаряемость.

Методы водного и теплового баланса, а также комплексные методы расчета испарения требуют значительного количества исходных данных и достаточно трудоемки при определении $K(w)$. В данном методе параметр влажности представлен так:

$$K(w) = \frac{140 - \sum E_{i-1} + \sum P_{i-1} + P_i}{140}, \quad (9)$$

где $\sum E_{i-1}$ и $\sum P_{i-1}$ — соответственно суммы испарения и осадков от даты начала расчета в данном теплом периоде до начала расчетного (i -го) интервала времени; P_i — сумма осадков за расчетный интервал времени i [12].

Константа 140 представляет собой предельное значение слоя влаги (мм), которая может

испариться из почвы за продолжительное время без осадков. Величина постоянной определена по материалам наблюдений на почвенно-испарительных площадках воднобалансовых станций лесной, лесостепной и степной зон за засушливые периоды 1970-х гг. [14]. Полученные на станциях результаты мало отличались друг от друга, поэтому величина 140 мм была использована А.Н. Постниковым при апробации своего метода. Расчеты испарения в настоящей работе также основаны на результатах прошлых исследований.

Расчет по формулам (8) и (9) начинается с начала первого месяца теплого периода (месяц, средняя температура за который не отрицательна) с учетом того, что общий запас влаги в первом метровом слое почвогрунтов вскоре после схода снежного покрова ежегодно считается равным наименьшей влагоемкости.

Результаты работ А.Н. Постникова (1974 г.) и А.М. Алпатьева (1954 г.) показывают, что испарение с обильно увлажненной почвы как в ранний весенний период, когда испарение за счет транспирации пренебрежимо мало, так и позже в условиях развитой транспирации довольно тесно связано с дефицитом влажности воздуха [14]. Поэтому значение E_0 для первого месяца теплого периода, а также после первого октября определяется по формуле $E_0 = 0.44\sum d$, а за остальные месяцы – по формуле $E_0 = 0.65\sum d$.

Результаты

Результаты расчета интенсивности испарения по методу турбулентной диффузии на Белогорском, Изобильненском и Партизанском полигонах за отдельные месяцы 2022–2023 гг. приведены на рис. 2.

Расчеты потоков влаги в приземном слое воздуха на экспериментальных полигонах показали, что в течение суток активно преобладают процессы испарения, что в большей степени характерно для летних месяцев, а процессы конденсации очень редки. Величина потоков влаги, направленных от почвы к атмосфере в летние месяцы, по данным суточных расчетов, в несколько раз превышает величину обратных потоков. Для

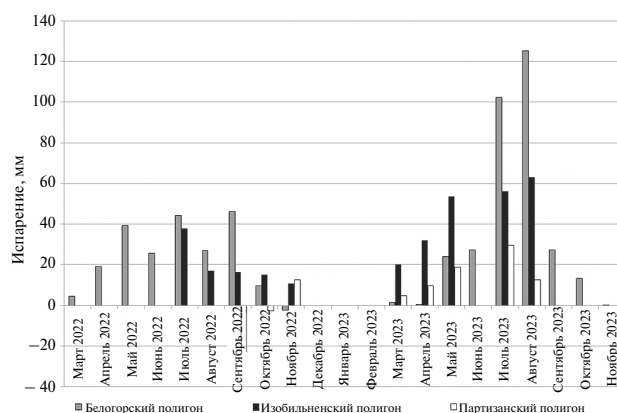


Рис. 2. Месячное испарение с деятельной поверхности экспериментальных полигонов (метод турбулентной диффузии).

осеннего и весеннего сезонов характерно чередование процессов испарения и конденсации в течение месяца. Очевидно, в отдельных случаях суммарная месячная величина потока влаги будет иметь отрицательные значения. Так, например, сочетание ряда метеорологических факторов в сентябре 2022 и 2023 гг. на Партизанском полигоне способствовало перемещению потока влаги из атмосферы к почве (рис. 2), т. е. преобладанию процессов конденсации.

В величинах месячного испарения, представленных на графиках, видны кардинальные отличия между полигонами за совместные периоды расчета. Это связано со сложным процессом формирования гидрометеорологических условий в разных районах исследования и с местоположением метеорологических комплексов, а кроме того, с различными типами почв и характером растительного покрова. К примеру, несмотря на то, что ветровой режим на Изобильненском полигоне отличался большой величиной градиента скорости, температурный градиент и режим увлажнения приземного слоя воздуха в совокупности далеко не всегда способствовали более интенсивному испарению, чем на Белогорском полигоне. Резкое увеличение интенсивности испарения в июле–августе 2023 г. вызвано высокими градиентами скорости ветра и парциального давления на фоне сверхадиабатической температурной стратификации. Небольшая величина испарения с почвы и соразмерная ей величина конденсации на Партизанском полигоне обу-

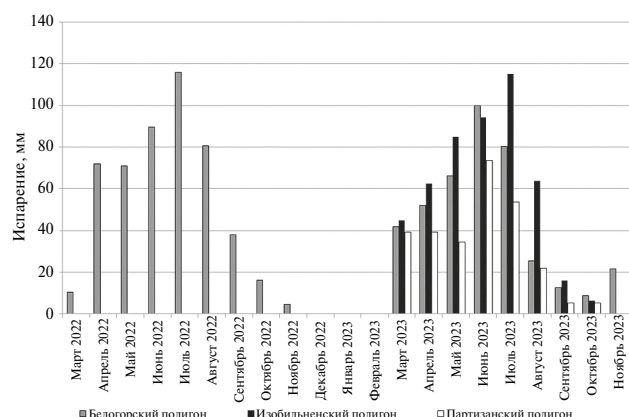


Рис. 3. Месячное испарение с деятельной поверхности экспериментальных полигонов (метод А.Н. Постникова).

словлены малыми скоростями ветра и нулевым градиентом большую часть времени, что в значительной степени обусловлено местоположением измерительного комплекса.

Недостаток этого метода — то, что он не учитывает степень увлажнения почвы. Картину расчетов по испарению могли бы дополнить расчеты потока влаги в слое почвы, для чего необходимы данные температуры почвы на горизонтах и относительной влажности почвы, определение которой с требуемой периодичностью было технически неосуществимо.

Определение испарения по методу А.Н. Постникова выполнялось с использованием усовершенствованного варианта расчета с помощью программы, написанной на языке C++, так как расчеты “вручную” — очень сложная и трудоемкая задача [13]. В качестве данных для расчета испарения использовались средние за месяц значения дефицита влажности воздуха и ежедневные данные по осадкам за расчетный период — теплую часть года. Расчетные периоды 2022–2023 гг. для определения испарения на экспериментальных полигонах охватывают в целом период с марта по ноябрь. Даты начала расчета устанавливались на основе данных измерений температуры воздуха и показаний влажности почвы на АМС. Полученные месячные величины испарения на Белогорском, Изобильненском и Партизанском полигонах представлены на рис. 3.

Ввиду отсутствия данных измерений на АМС Изобильненского и Партизанского полигонов в первой половине 2022 г. испарение в этих районах рассчитано только за 2023 г. Это обстоятельство свидетельствует о главном недостатке данного метода, поскольку здесь расчет всегда начинается с раннего весеннего времени.

Результаты расчета 2023 г. показали, что величина испарения с почвы в разных районах Крымского п-ова различна. С марта по ноябрь 2023 г. слой испарившейся воды с деятельной поверхности Белогорского полигона равен 390 мм, Изобильненского полигона — 490 мм, Партизанского полигона — 272 мм.

Согласно материалам Климатического атласа Крыма поле значений испарения с почвы, осредненных за многолетний период, для рассматриваемой территории укладывается в пределы 350–450 мм [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета испарения с поверхности Белогорского, Изобильненского и Партизанского водохранилищ различными методами сравнивались с величиной испарения, полученной методом наземных испарителей за отдельные месяцы. Расчет по формуле В.И. Мокляка показал наилучшее соответствие результатам, полученным на основе данных натурных наблюдений. Относительная погрешность определения испарения по данному методу $\leq 15\%$. Ввиду наличия пропусков в рядах данных измерений АМС на Изобильненском и Партизанском полигонах величина годового испарения с водной поверхности (март–ноябрь) получена для Белогорского водохранилища и составила 685 мм в 2022 г. и 660 мм в 2023 г. Данный результат соответствует диапазону величин испарения, осредненных за многолетний период для территории Крымского п-ова [5].

Сравнение результатов расчета испарения с поверхности почвы, полученных методом турбулентной диффузии и методом А.Н. Постникова, показало расхождения значений как месячных, так и за расчетные периоды. Очевидно, это связано с использованием в расчетах совокупностей разных метеорологических параметров. Другими

возможными причинами расхождений результатов могут быть неудачное расположение АМС, а также некоторые допущения при расчетах по методу Постникова, возможность применения которого находится под вопросом ввиду климатических и ландшафтных условий исследуемого региона.

Сопоставление полученных по двум методам величин испарения в 2022 и 2023 гг. представилось возможным только на Белогорском экспериментальном полигоне. Испарение с почвы за теплую часть года, рассчитанное по методу турбулентной диффузии, составляет 320 и 220 мм соответственно, а по эмпирическому методу А.Н. Постникова — 490 и 390 мм.

Ввиду того, что метод турбулентной диффузии основан на вертикальном обмене масс, т. е. наличии вертикальных градиентов температуры и влажности воздуха, главным образом — положительного градиента скорости ветра, расчет испарения в некоторые сроки, особенно в ночное время суток, при отсутствии движения воздуха, невозможен. Расчеты испарения в эти сроки проводятся по методу теплового баланса, который учитывает радиационный баланс и влагообмен в почве, зависящий от температуры и влажности почвы в слое. Такие расчеты достаточно трудоемки, а в условиях настоящего исследования невозможны. Поэтому с учетом условий применения метода турбулентной диффузии можно сделать вывод о том, что рассчитанная по нему величина испарения занижена. Стоит отметить, что при расчете по данному методу наблюдается устойчивая корреляционная зависимость ($R \sim 0.9$) между месячными значениями испарения и среднемесячным дефицитом влажности воздуха.

Оценка величин испарения по методу А.Н. Постникова, напротив, дает основания полагать, что значения 400–500 мм — завышенный результат, потому что расчетная формула метода напрямую учитывает величину слоя выпадающих осадков, которые она “испаряет”, но не водно-физические свойства почвы.

Оценка величин испарения с почвы за расчетные периоды — теплую часть года и отдельные месяцы — показала необходимость проведения

дальнейших исследований и более детальных расчетов. Это особенно важно с учетом невозможности определения величины испарения прямыми методами посредством специализированных наблюдений.

Проведенное исследование показало, что на сравнительно небольшой территории Крымского п-ова распределение испарения неравномерно, что обусловлено разными сочетаниями определяющих его факторов: гидрометеорологических характеристиками, особенностями рельефа и окружающего ландшафта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 222 с.
2. Вуглинский В.С., Албул И.П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземных испарителей ГГИ-3000 // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 3. С. 118–128.
3. Вуглинский В.С., Старовойтова В.К., Черская Е.Н. О методике оценки испарения с поверхности водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000 // Тр. ГГИ. 1981. Вып. 274. С. 53–72.
4. Голубев В.С., Урываев А.П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.
5. Климатический атлас Крыма. Приложение к научно-практическому дискуссионному сборнику “Вопросы развития Крыма”. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
6. Константинов А.Р. Испарение в природе. Издание второе. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 532 с.
7. Кузнецов В.И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3–32.
8. Материалы Междугосударственного совещания по проблеме изучения и обоснования методов расчета испарения с водной поверхности и суши, 1965. Валдай, 1966. 375 с.
9. Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети. СПб.: РИАН, 2021. 64 с.
10. Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.

11. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 480 с.
12. Постников А.Н. Метод определения испарения с поверхности суши в лесной, лесостепной и степной зонах России за месяцы теплого периода года // Международ. науч.-исследовател. журн. 2021. № 4–2 (106). С. 14–18.
13. Постников А.Н. Метод расчета испарения с поверхности суши за теплый период года в различных природных зонах // Евразийское науч. объединение. 2018. № 11 (45). С. 156–160.
14. Постников А.Н. Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах // Уч. зап. РГГМУ. 2009. № 10. С. 21–31.
15. Сапожникова С.А. Микроклимат и местный климат / Под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеиздат, 1950. 242 с.
16. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.

EVAPORATION ASSESSMENT BASED ON MEASUREMENT DATA AT EXPERIMENTAL SITES ON THE CRIMEAN PENINSULA

I. V. Zemlyanov^{a, b}, A. A. Sapozhnikova^{a, b}, E. A. Rakcheeva^{a, b, *}, A. E. Pavlovskii^a

^a*Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, 119034 Russia*

^b*Water Problems Institute, Moscow, 119333 Russia*

^{*}*e-mail: lizaveta.r86@gmail.com*

The methods for determining evaporation from the surface of water and soil are considered. Calculations of monthly evaporation values within the experimental sites of the Crimean Peninsula were performed based on the measurement data of automated meteorological complexes for 2022–2023. The results of calculating evaporation from the surface of reservoirs were compared with the evaporation value obtained by the method of ground evaporators for individual months. The calculation using the formula of V.I. Moklyak showed the best agreement with the results obtained on the basis of in-situ observations of evaporation. The relative error in determining evaporation using the recommended method is 15%. An estimate of monthly evaporation from the soil is given, determined by calculation methods using dependencies on various meteorological factors.

Keywords: Crimean peninsula, reservoir, evaporation, experimental sites, ground evaporator, automatic weather station