

УДК 551.5

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

Токарев И.В.¹, Амеличев Г.Н.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, РЦ РДМИ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: tokarevigor@gmail.com

² Таврическая академия ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Российская Федерация

В статье приведены результаты экспериментов по испарению, направленные на выявление доли испарившейся влаги по величине смещения изотопного состава воды относительно начального положения на локальной линии метеорных вод. Выявлена эмпирическая зависимость линейного характера, показавшая удовлетворительную сходимость с результатами, полученными стандартными методами.

Ключевые слова: эватранспирация, изотопный состав воды, экспериментальные данные, изотопное смещение, линия испарения.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении замкнутых водообменных систем, их водного баланса и гидродинамических характеристик особое значение приобретают методы оценки испарения влаги. Обычно суммарное испарение или эватранспирация трудноопределимый показатель, подверженный влиянию многочисленных факторов. Прямые методы определения испарения основаны на использовании водных, почвенных и снеговых испарителей, а также лизиметров на опытных испарительных площадках. Оборудование для прямых измерений испарения дорого, а сами измерения трудоемки. Не дает однозначных ответов и применение дистанционного зондирования для расчета испарения. Во всех случаях обоснование моделей и используемых расчетных параметров требует продолжительных рядов данных.

В связи с вышеуказанными проблемами, актуальной является разработка методов, позволяющих выполнить интегральную оценку влияния испарения на водный баланс достаточно быстро, с удовлетворительной точностью и применительно к объектам разного масштаба. Поэтому авторы считают, что для этой цели могут быть использованы данные об изотопном составе воды (содержаниях дейтерия – $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 – $\delta^{18}\text{O}$). Для выявления закономерностей, связывающих количество испарившейся влаги с изотопными изменениями в остаточной воде, был выполнен ряд экспериментов в Карелии и Крыму.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИСПАРЕНИЯ

1.1. Оценка испарения стандартными методами

Водный баланс замкнутого водосбора и/или водоема описывается уравнением:

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

$$P - Q_R - Q_{GW} - ET \pm v = 0,$$

где P – атмосферные осадки; Q_R – поверхностный (речной) сток; Q_{GW} – подземный сток; ET – эвапотранспирация; v – изменение запасов воды на водосборе и/или в водоеме.

Среди названных параметров одним из наиболее трудно определяемых на практике является эвапотранспирация (в русскоязычной литературе имеет синоним суммарное испарение). Суммарное испарение включает физическое испарение с почвы и открытой воды, а также транспирацию растениями и испарение влаги, задержанной растительностью при выпадении осадков. При этом испарение является важной характеристикой водного баланса, используемой при построении моделей водных объектов, в водохозяйственных расчетах, при оценке распространенности отдельных видов ландшафтов, животных и насекомых (вылеты саранчи), прогнозировании засух, пожарной опасности, засоления почв, усыхания крупных водных объектов, обмеления рек и т.п. [1-10].

Величина физического испарения зависит, в основном, от радиационного баланса, температуры воздуха и поверхности, количества осадков, относительной влажности воздуха, скорости ветра и характера подстилающей поверхности, включая тип растительности и гидрофизические свойства почв [11-21].

Прямые методы определения испарения основаны на использовании водных, почвенных и снеговых испарителей, а также лизиметров на опытных испарительных площадках. Оборудование для прямых измерений испарения дорого, а сами измерения трудоемки. При проведении экспериментов необходимо соблюдать ряд требований, позволяющих избежать получения ошибочных данных. Например, конструкция испарителя должна исключать искажение профиля воздушного потока над испарителем, влияние смачивания борта испарителя, обратной стратификации температуры воды в испарителе, эффекта «холодной пленки» и т.д. Соблюдение указанных условий влечет за собой необходимость увеличения площади испарителя, что, в свою очередь, приводит к увеличению инерционности прибора, а также трудностям в его изготовлении, транспортировке и эксплуатации.

Основная сложность практического применения результатов прямых наблюдений, как нетрудно понять, заключается в определении и учете масштабных временных эффектов. В ходе прямых наблюдений измеряется скорость испарения в конкретных условиях в одной или нескольких точках водосборного бассейна. Поэтому применение полученных данных требует обоснования корректности экстраполяции измеряемых в точке параметров и расчетных характеристик на площадь бассейна для всего спектра условий испарения.

Параметры, определяющие суммарное испарение, в некоторой степени зависят друг от друга. Поэтому при наличии подробных наблюдений возможно применение математических зависимостей, использующих для расчета испарения физические величины, такие как приходящая солнечная радиация, альбедо, эффективное излучение подстилающей поверхности, турбулентный поток тепла (зависит, в основном, от скорости ветра), поток тепла в почву, затраты тепла на испарение, температура дневной поверхности, влажность воздуха.

Указанные выше сложности прямого определения испарения приводят к тому, что на практике чаще используют приближенный расчет испарения по упрощенным уравнениям, требующим знания только среднегодовых или среднемесячных температур воздуха и влажности. Количественные соотношения между испарением и контролируемые параметрами устанавливают по результатам изучения водного баланса замкнутых водосборов и выражают в виде уравнений или палеток/номограмм [22-32]. Наиболее часто на практике используются методы М.И. Будыко и А.Р. Константинова (последним разработаны таблицы и эмпирические графики определения испарения в зависимости от температуры и абсолютной влажности воздуха для различных физико-географических зон).

В экспериментальных уравнениях, связывающих испарение с температурой и влажностью, часто одним из аргументов является испаряемость (то есть, испарение с открытой водной поверхности), которая, как правило, также является расчетной, а не измеряемой величиной. Отметим, что, часть физических величин, используемых в расчетах, также является не прямо измеряемой, а оцениваемой [33-39]. Например, для расчета эффективного излучения подстилающей поверхности, используют полуэмпирические формулы, включающие балльность облачности (в долях единицы), излучательную способность подстилающей поверхности, температуру воздуха, эффективное излучение безоблачного неба (также задается уравнением), упругость водяного пара. Турбулентный поток тепла рассчитывается при помощи полуэмпирических формул, предполагающих, что перенос пропорционален градиенту температуры, скорости ветра в приземном слое и обратно пропорционален шероховатости поверхности (иногда последние два параметра объединяют, если нет данных по ветру). Поток тепла в почву определяют через текущий градиент температуры, что требует измерения температуры и влажности почвы, в том числе, с учетом наличия фазовых переходов при наличии сезона с отрицательными температурами.

Расхождение вычисленных величин суммарного испарения с наблюдаемыми на испарительных площадках может достигать: по формуле М.И. Будыко – 108 %, по Б.В. Полякову – 60%, по А.Р. Константинову – 74 % [40]. Анализ прямых наблюдений на достаточно больших территориях и их сравнение с расчетами испарения во многих случаях демонстрируют существенные отличия расчетных величин от измеренных, а также рассчитанных по разным методикам между собой из-за действия большого количества факторов [41-51]. Предполагается, что применение моделей миграции влаги в подстилающей поверхности может существенно уточнить расчеты испарения с почвы [52-55]. Значительные усилия направлены на разработку алгоритмов, использующих данные дистанционного зондирования для расчета испарения [56-58]. Применение дистанционных данных требует их наземной проверки, а полнота рядов космических наблюдений зависит от видимости земной поверхности. Кроме того, дистанционные наблюдения, зачастую, имеют недостаточное разрешение для практического применения.

Во всех случаях обоснование моделей и используемых расчетных параметров требует продолжительных рядов данных. В связи с вышеуказанными проблемами,

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

актуальной является разработка методов, позволяющих выполнить интегральную оценку влияния испарения на водный баланс достаточно быстро, с удовлетворительной точностью и применительно к объектам разного масштаба. В данной работе показано, что для этой цели могут быть использованы данные об изотопном составе воды (содержаниях дейтерия – $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 – $\delta^{18}\text{O}$).

Недостатком указанных выше подходов (кроме невысокой точности) является:

а) необходимость проведения долговременных подробных наблюдений по достаточно густой сетке точек мониторинга для получения экспериментальных зависимостей;

б) изменение характера связей между компонентами систем и, следовательно, испарения при переходе от одной географо-климатической зоны к другой (необходимо обосновывать правомочность применения выбранной формулы оценки испарения);

в) появление кардинальных изменений в структуре водного баланса вследствие климатических вариаций, а также под воздействием хозяйственной деятельности (большая часть экспериментов проведена 50–100 лет назад), требующих проведения нового цикла долговременных наблюдений для обоснования исправленных формул.

В качестве примера проблем корректного определения испарения можно привести данные для Предгорного Крыма, где для высот 350–400 м оценки испарения варьируют от 414 до 600 мм/год (Табл. 1 и 2, Рис. 1). Независимая оценка для Бельбекского и Салгирского районов $E = 400\text{--}450$ мм/год [59]. То есть, доля потерь на годовое испарение оценивается с большим разбросом величин от 60 до 88 %.

Таблица 1

Годовое испарение для Предгорного Крыма на высотах 350–400 м, рассчитанное различными методами [60, с изменениями]

Метод	[25]	[32]	[61, 62]	[63]	[64]	[23]	[24]
Испарение, мм	565	485	414	585	455,4	600	568

Таблица 2

Помесячное испарение (мм) для Предгорного Крыма на высотах 350–400 м, рассчитанное различными методами [60, с изменениями]

Испарение по данным разных авторов	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	год
[63]	20	20	30	47	76	92	90	95	52	32	20	11	585
[64]	38	23	27	12	30	74	62	56	36	28	20	8	414

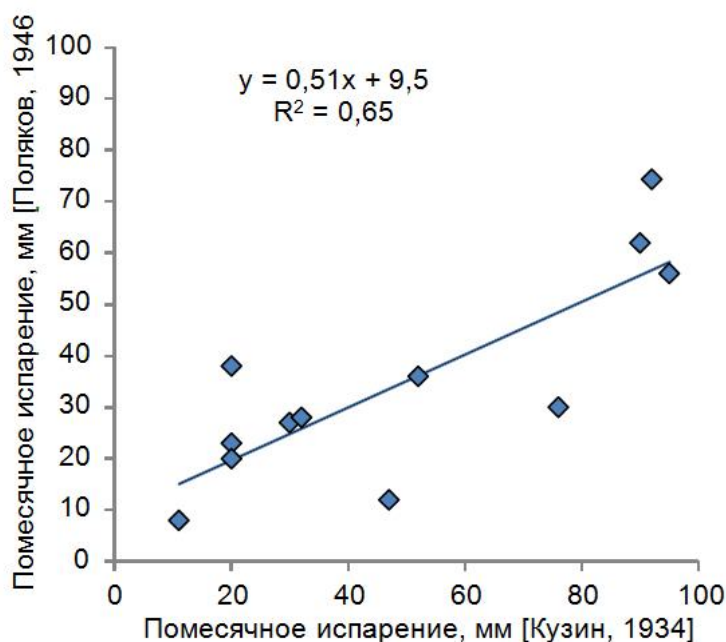


Рис. 1. Сравнение расчетного месячного испарения для Предгорного Крыма на высотах 350–400 м по [63, 64].

1.2. Использование системы дейтерий - кислород-18

1.2.1. Реакция системы дейтерий-кислород-18 на испарительный процесс

Изотопный состав атмосферных осадков ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) формируется за счет влагообмена воздушных масс с подстилающей поверхностью – преимущественно в ходе испарения, конденсации и замерзания, когда имеет место изотопное фракционирование. Содержания дейтерия и кислорода-18 в соседствующих фазах меняются, строго следуя правилу «тяжелые изотопы накапливаются в более конденсированной фазе». То есть, в ходе испарения/конденсации/замораживания обогащение тяжелыми изотопами соответствует ряду «пар < жидкость < лед».

Интерпретацию данных об изотопном составе воды выполняют на основании классической $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ диаграммы. Исходной точкой является океаническая вода $\delta^2\text{H} = 0 \text{ ‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰}$. В соответствии с вышеприведенным правилом, при испарении остаточная вода становится изотопически «тяжелее» (в ней накапливаются ^2H и ^{18}O), а уходящий пар – «облегчается». На диаграмме $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ «утяжеление» изотопного состава выглядит как появление менее отрицательных величин δ , а «облегчение» – как обратный процесс. В атмосферу 90 % пара поступает с поверхности океана в тропиках, поэтому величины $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в осадках

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

на континентах имеют, как правило, отрицательные значения, вследствие дефицита тяжелых изотопов.

При испарении с поверхности океана, а также при выпадении жидких и твердых осадков на континентах, разделение изотопов происходит преимущественно в равновесных условиях, когда перераспределение изотопов между жидкостью и паром, а также жидкостью и льдом успевает произойти полностью. Вследствие этого в координатах $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ соотношение между содержаниями дейтерия и кислорода-18 в осадках Мира подчиняется линейному уравнению $\delta^2\text{H} = a \times \delta^{18}\text{O} + b$, называемому *линией метеорных вод* (ЛМВ, рис. 2). Так как фракционирование протекает в равновесных условиях, коэффициенты ЛМВ составляют $a \approx 8$ и $b \approx 10$ и варьируют в небольших пределах [65-68].

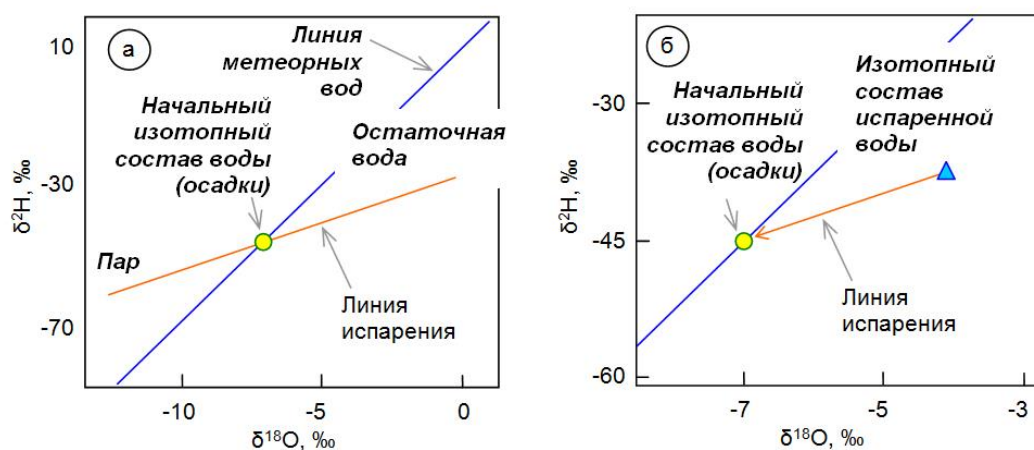


Рис. 2. Линия метеорных вод (синяя прямая) и теоретическое изменение изотопного состава комплиментарных компонентов (вода+пар) при испарении (а); фактически наблюдаемые параметры (б).

При испарении с почвы и воды в континентальных условиях процесс перераспределения изотопов между паром и водой проходит, как правило, не до конца и проявляется эффект неравновесного фракционирования. Исходя из теоретических предпосылок и экспериментальных данных, для испарения в абсолютно сухом воздухе при температуре 20 °C Dansgaard [66] получил уравнение *линии испарения* (ЛИ) $\delta^2\text{H} = 5 \times \delta^{18}\text{O} + x$ (рис. 2, свободный член уравнения зависит от начального изотопного состава воды). Позднее было показано, что на величину углового коэффициента ЛИ влияет также влажность воздуха [67]. На диаграмме $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ при неравновесном испарении фигуративные точки для воды утяжеляются (сдвигаются вправо-вверх от начального положения), а для пара облегчаются (сдвигаются влево-вниз относительно начального состава, рис. 2). Вследствие различий в угловых коэффициентах, на диаграмме $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ ЛМВ и ЛИ пересекаются.

Прежде чем перейти к дальнейшему обсуждению подчеркнем, что система дейтерий-кислород-18 реагирует на количество испаренной воды, а не на скорость испарения. То есть, использование изотопной информации не предполагает необходимости масштабирования полученных данных, как это имеет место при использовании стандартных прямых методов оценки испарения.

1.2.2. Базовые соотношения при использовании изотопных данных для оценки испарения

Водный баланс бассейна можно представить в виде уравнения (использовано описание в объемах воды V , так как далее рассмотрение будет идти в терминах концентраций):

$$V_P = V_R + V_{ET} \pm V_{GW} \pm i,$$

где индексы означают P – осадки, R – поверхностный (речной) сток, ET – эвапотранспирацию, GW – изменение запасов за счет притока/оттока подземных вод, i – свободный член – соответствует изменению запасов воды.

В стационарном случае $i = 0$, а для бассейнов, в которых доля подземного притока/оттока (например, за счет подрусловой фильтрации) невелика $V_R \pm V_{GW} \approx V_R$. Тогда уравнение водного баланса упрощается:

$$V_P = V_R + V_{ET}.$$

Испарение и транспирация существенно различаются по механизмам протекания процессов. Разделим этот член уравнения на два слагаемых, выразим члены уравнения в долях относительно осадков, а транспирацию – через два других компонента:

$$V_P = V_R + V_E + V_T,$$

$$1 = V_R / V_P + V_E / V_P + V_T / V_P = \alpha_R + \alpha_E + \alpha_T = \alpha_R + \alpha_E + (1 - \alpha_R - \alpha_E).$$

Оценка составляющих последнего уравнения может быть выполнена по наблюдениям за вещественным составом воды в бассейне, а также по содержанию (C) отдельных компонентов и/или их отношениям:

$$C_P = C_R \times \alpha_R + C_E \times \alpha_E + C_T \times (1 - \alpha_R - \alpha_E).$$

Решение последнего уравнения затруднено:

– при наличии дополнительных источников вещества (присутствие на водосборе легко растворимых солей, доступных для прямого усвоения осадками и/или плоскостным стоком, а также при высокой минерализации подземных вод);

– вследствие необходимости независимого определения величин C_E и C_T .

При переходе от солесодержания к изотопному составу воды нахождение параметров может быть выполнено более надежно:

$$\delta_P = \delta_R \times \alpha_R + \delta_E \times \alpha_E + \delta_T \times (1 - \alpha_R - \alpha_E).$$

Для решения последнего уравнения нужно знать величины δ_P , δ_R , δ_T и δ_E (значения индексов те же, что и ранее, а «дельта» – изотопный состав кислорода и/или водорода воды). Известно, что $\delta_T \approx \delta_P$, поскольку транспирирующаяся вода удаляется с поверхности растений за счет полного испарения микрокапель, а состав капель мало отличается от почвенной влаги.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ
ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

Соответственно, получаем, следующее уравнение:

$$\alpha_E = \alpha_R ((\delta_R - \delta_P) / (\delta_P - \delta_E)),$$

где поскольку $\alpha_E = V_E / V_P$ и $\alpha_R = V_R / V_P$, то доля испарившейся воды по отношению к речному стоку примет вид:

$$V_E / V_R = (\delta_R - \delta_P) / (\delta_P - \delta_E). \quad (1)$$

Аналогичные уравнения ранее уже были получены [69, 70].

1.2.3. Обоснование упрощений

В уравнении (1) трудно определяемым является изотопный состав пара δ_E , который предлагается оценивать из модели [71, 66]:

$$\delta_E = \frac{\delta_L - h\delta_A - \varepsilon}{1 - h + \varepsilon_K}, \quad (2)$$

где δ_L и δ_A – изотопный состав испаряющейся воды и атмосферной влаги; h – влажность воздуха; $\varepsilon = \varepsilon^* + \varepsilon_K$ – суммарный изотопный сдвиг при испарении, включающий ε^* – равновесный и $\varepsilon_K = C_K(1 - h)$ – кинетический изотопный сдвиг при испарении. Параметр ε^* зависит от температуры и уменьшается при ее росте [72, 73]. Параметр ε_K зависит от характера течения воздуха над поверхностью и определяется коэффициентом C_K , который характеризует зависимость кинетического изотопного сдвига от турбулентного перемешивания вследствие уменьшения толщины пограничного слоя [72, 74].

Корректная экспериментальная оценка параметра δ_E довольно проблематична и его численное значение с трудом проверяется с помощью прямых наблюдений, поскольку в воздухе одновременно содержится пар местного происхождения (от испарения и транспирации) и пар, принесенный в бассейн извне. Вероятно, нахождение этого параметра возможно при измерении состава воздушного пара на «входе» и «выходе» из бассейна или опытной площадки (относительно траектории движения воздушной массы), что, однако, требует довольно больших затрат, а приводимые в публикациях результаты измерений не всегда убедительны [75].

Первое упрощение – отказ от определения изотопного состава пара.

Из атмосферных осадков данной местности при испарении образуются два компонента (рис. 2) – остаточная вода (индекс **RW** в следующем уравнении) и уходящий пар (индекс **VAP** в уравнении):

$$\delta_P V_P = \delta_{RW} V_{RW} + \delta_{VAP} V_{VAP}.$$

Изотопный состав остаточной воды δ_{RW} определяется просто, так как по физическому смыслу – это поверхностные и подземные воды – местный речной сток и озера, влага в почве и зоне аэрации, а также вода грунтовых (первых от поверхности) горизонтов. Поскольку вышеприведенное уравнение является балансовым, то в знании величины $\delta_{VAP} V_{VAP}$ нет необходимости, если известны $\delta_P V_P$ и $\delta_{RW} V_{RW}$.

При наличии испарения начальный состав осадков, идущих на восполнение запасов, определяется по точке пересечения линии аппроксимации изотопного

состава поверхностных и/или грунтовых вод с линией метеорных вод (рис. 2).

Второе упрощение – экспериментальное определение функции связи объема потерь на испарение с изотопным составом остаточной воды.

Величина потерь на испарение может быть найдена по смещению изотопного состава остаточной воды δ_{RW} относительно начальной точки δ_P , для чего нужно количественно определить функцию изменения изотопного состава воды при испарении.

Функциональная зависимость изотопного состава остаточной воды от доли испарившейся может быть определена:

– расчетным методом – по модели дистилляции Рэлея (для равновесных условий) или уравнений, учитывающих кинетику фракционирования при испарении (для неравновесных условий);

– экспериментально с помощью испаромеров.

Для расчетов необходимо задаваться влажностью и температурой, а также кинетическим коэффициентом фракционирования, что приводит к существенному усложнению вида расчетных формул [76, 72, 67]. Расчет выполняется для фиксированной влажности и температуры или пределов их вариаций, которые определяются по метеоданным. Наиболее сложным является обоснование параметра ϵ_k – кинетического изотопного сдвига при испарении, так как он зависит от таких дополнительных факторов как общая минерализация и состав растворенных солей (которые меняются при упаривании воды), а также скорости испарения.

Поэтому для решения поставленной задачи корректнее использовать натурные наблюдения за изменением изотопного состава воды в ходе испарения, поскольку эти зависимости интегрируют все вышеуказанные действующие факторы.

1.2.4. Методика экспериментов по определению зависимости изотопного состава остаточной воды от величины потерь на испарение

В данной работе для экспериментальной оценки зависимости изменения изотопного состава остаточной воды от доли испаренной использовались полиэтиленовые и стеклянные испаромеры объемом от 0,5 до 3,0 л. опыты проводились в точках, характеризующихся различными условиями испарения, и в периоды года, когда суточные колебания температуры не приводили к полному замерзанию воды в приборе.

Для каждого сосуда определялась зависимость объема от уровня воды. В ходе опытов определение убыли воды производилось ежедневно по уровню. Для исключения неконтролируемых потерь воды сосуды размещались в сетчатых клетках, были защищены от выдувания воды коробом размером 0,6×0,6 м в плане, высотой 0,4 м, а от попадания осадков – пластиковым полупрозрачным козырьком. Во избежание влияния отбора проб на результаты эксперимента, объем воды, отбираемой за один раз на анализ, был ограничен 2 мл, а пробы отбирались только в случае, если изменение уровня воды в сосуде составляло более 2 мм.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

Условия эксперимента, принятые в данной работе, существенно отличаются от используемых, например, при эксплуатации испаромера ГГИ-3000. Указанные отличия в схеме эксперимента влияют на скорость испарения (что принципиально для интерпретации прямых наблюдений по стандартной схеме), однако функциональная зависимость изотопного состава водорода и кислорода от количества испаренной воды при этом остается неизменной, как это будет показано далее.

В опытах использовалась вода атмосферных осадков, выпадающих в данный период года, дистиллированная вода и вода из-под крана (исходно – речная и подземная вода). Температура воздуха контролировалась термометром-логгером или по данным метеостанции.

Измерения изотопного состава воды проводились на лазерном спектрометре Picarro L2120-i в РЦ «Геомодель» и РДМИ Научного парка СПбГУ. Калибровка прибора выполнялась с помощью стандартов VSMOW-2, SLAP, GISP, USGS45 и USGS46. Неопределенность единичного измерения составляла $\pm 0,1\%$ по кислороду-18 и $\pm 1\%$ по дейтерию. Все результаты приводятся в промилле относительно SMOW.

1.2.5. Способ расчета потерь на испарение по изменению изотопного состава остаточной воды

На практике обычно имеется возможность (Рис. 2):

- определить линию аппроксимации для проб, изотопный состав которых указывает на влияние испарения;
- найти начальный состав воды по точке пересечения линии аппроксимации и линии метеорных вод.

Поэтому необходимо вычислить функцию, связывающую объем потерь воды на испарение с изменением изотопного состава остаточной воды. Для корректной оценки указанной функции изменение изотопного состава остаточной воды при испарении необходимо определять в виде полного смещения точек вдоль линии испарения – $\Delta(\delta^{18}\text{O})$ и $\Delta(\delta^2\text{H})$, так как угловые коэффициенты линий испарения, как правило, существенно изменяются во времени и от места к месту. То есть, использование одной координаты, как это принято при расчете дейтериевого эксцесса, приводит к некорректной оценке испарительных потерь.

В нашем случае изотопный состав водорода масштабировался, исходя из соотношения $\delta^2\text{H}_{\text{ИСПР.}} = (\delta^2\text{H}_{\text{ИЗМ.}} - b)/a$, где a и b – коэффициенты линии испарения (индексы ИСПР. и ИЗМ. – исправленный и измеренный изотопный состав водорода, соответственно). Затем вычислялся шифт по кислороду-18 – $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = \delta^{18}\text{O}_i - \delta^{18}\text{O}_{\text{НАЧ.}}$ и дейтерию $\Delta(\delta^2\text{H}) = \delta^2\text{H}_i - \delta^2\text{H}_{\text{НАЧ.}}$ (индексы i и НАЧ. – текущий и начальный, до испарения, состав кислорода и водорода). Наконец определялось полное смещение точки относительно начального положения в координатах $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ в каждом эксперименте:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\{\Delta(\delta^2\text{H})\}^2 + \{\Delta(\delta^{18}\text{O})\}^2}.$$

Полученный в каждом эксперименте набор точек аппроксимировался линейной функцией $\Delta V_E = a \times \Delta \Sigma + b$, где величина ΔV_E – доля потерь воды на испарение.

1.2.6. Испарительные эксперименты и их результаты

В г. Петродворец силами сотрудников РЦ «Геомодель» Научного парка СПбГУ (г. Санкт-Петербург) в 2013–2015 г. выполнен цикл экспериментов с испаромером объемом 0,5 л, который был установлен на крыше здания в закрытом от осадков и прямых солнечных лучей месте. Использовалась вода атмосферных осадков с начальным изотопным составом $\delta^{18}\text{O} = -13,3..-10,2 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -93..-79 \text{ ‰}$. Серии экспериментов охватывали как теплый, так и холодный период года (Табл. 3).

Таблица 3

Условия проведения и результаты экспериментов по испарению в г. Петродворец

№ пп	Дата эксперимента	Начальный объем воды, мл	Средняя скорость испарения мм/сут	Начальный состав воды		Уравнение испарительного фракционирования $\delta^2\text{H} = a \times \delta^{18}\text{O} + b$	Уравнение для расчета доли потерь на испарение $\Delta V_E = a \times \Delta \Sigma + b$
				$\delta^{18}\text{O}, \text{ ‰}$	$\delta^2\text{H}, \text{ ‰}$		
1	16–27.05.13	493	0,39	-13,3	-91	$y = 5,39x - 19$	$y = 0,0299x - 0,0069$ ($R^2 = 0,984$)
2	18.12.13–09.01.14	416	0,09	-11,1	-77	$y = 6,25x - 7,6$	$y = 0,0305x - 0,0087$ ($R^2 = 0,998$)
3	24.02.14–11.03.14	519	0,09	-12,3	-93	$y = 5,68x - 25$	$y = 0,0372x - 0,0291$ ($R^2 = 0,950$)
4	24.03.14–09.04.14	525	0,18	-12,4	-89	$y = 4,99x - 28$	$y = 0,0332x + 0,0219$ ($R^2 = 0,969$)
5	26.06.14–08.07.14	480	0,26	-10,4	-80	$y = 4,99x - 28$	$y = 0,0309x + 0,0185$ ($R^2 = 0,983$)
6	25.08.14–12.09.14	403	0,07	-11,1	-72	$y = 4,70x - 22$	$y = 0,0354x + 0,0044$ ($R^2 = 0,704$)
7	20–30.04.15	506	0,23	-11,5	-89	$y = 4,99x - 30$	$y = 0,0309x - 0,0104$ ($R^2 = 0,966$)
8	08–14.06.15	458	0,44	-10,6	-81	$y = 5,36x - 24$	$y = 0,0352x + 0,0007$ ($R^2 = 0,997$)
9	29.06.15–03.07.15	519	0,33	-10,2	-79	$y = 4,27x - 35$	$y = 0,0343x - 0,0067$ ($R^2 = 0,956$)
Средний угловой коэффициент						5,18	0,0331

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

В холодный период года подставка для испаромера подогревалась таким образом, чтобы в момент отбора проб в нем не было льда (перед отбором пробы вода в испаромере перемешивалась).

Средний угловой коэффициент линий испарения 5,18 оказался близок к теоретическому [66]. Средний угловой коэффициент уравнения для расчета доли потерь на испарение по изотопному составу воды 0,0331 (стандартное отклонение 0,0026). Свободный член уравнений для расчета потерь на испарение, в среднем, 0,0119 (по абсолютной величине) и -0,0018 (среднее арифметическое).

Силами сотрудников КФУ (г. Симферополь) в 2018 г. выполнен цикл экспериментов с испаромерами объемом от 1,5 до 3,0 л, которые устанавливались на уровне земли. Было выполнено 5 экспериментов в теплый период года, каждый из которых выполнялся при своих условиях. Использовалась водопроводная и речная вода с начальным изотопным составом $\delta^{18}\text{O} = -9,6..-4,5 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -64..-41 \text{ ‰}$ (Табл. 4). Средний угловой коэффициент линий испарения 4,5 оказался несколько меньше теоретического [66]. Средний угловой коэффициент уравнения для расчета доли потерь на испарение по изотопному составу воды 0,0296. Свободный член уравнений, в среднем, 0,0054 (по абсолютной величине) оказался наименьшим среди всех серий экспериментов. По-видимому, погрешности экспериментов, обусловленные возможностью изотопного обмена и конденсации влаги из воздуха, на изотопный состав остаточной воды в условиях Крыма незначительны.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты полезно сравнить с ранее выполненными оценками по крупным водным объектам, в достаточной мере эффективно осредняющим региональный водный баланс.

Изотопный состав воды в Ладожском озере, в среднем, $\delta^{18}\text{O} = -10,6 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -78 \text{ ‰}$, а в р. Неве $\delta^{18}\text{O} = -10,2 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -76 \text{ ‰}$ [77]. Для дальнейшей оценки правильнее использовать данные по р. Неве, так как она корректнее осредняет состав озерной воды (в массиве данных по озеру преобладают пробы воды из поверхностного слоя). На диаграмме в координатах $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ точки озерной и речной воды ложатся на линию испарения с уравнением $y = 5,17x - 23,2$, давая точку пересечения с локальной линией метеорных вод (начальный изотопный состав воды до испарения) $\delta^{18}\text{O} = -11,8 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -84 \text{ ‰}$. Используя уравнение для расчета доли потерь на испарение $\Delta V_E = 0,0331 \times \Sigma_{\Delta} + 0,0047$ (Табл. 3), находим долю потерь испарения 7,7 %.

Аналогичную оценку можно выполнить для Онежского озера, средний изотопный состав воды в котором $\delta^{18}\text{O} = -10,4 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -77 \text{ ‰}$ [78, 79], в р. Свирь (в устье) $\delta^{18}\text{O} = -10,5 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -77,5 \text{ ‰}$ [77]. Уравнение линии испарения имеет вид $y = 5,34x - 21,4$, а точка пересечения с локальной линией метеорных вод $\delta^{18}\text{O} = -11,9 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -85 \text{ ‰}$. Используя для расчета уравнение $\Delta V_E = 0,0330 \times \Sigma_{\Delta} + 0,0038$ (Табл. 2), находим долю потерь на испарение из Онежского озера 7,4 %.

Найденные по изотопным данным потери на испарение – 7,7 % в бассейне Ладоги и 7,4 % в бассейне Онеги близки к полученным водобалансовыми методами [80, 81]. При этом изотопная оценка, осредняющая испарение за время водообмена в озере, не требует многолетних наблюдений.

Таблица 4

Условия проведения и результаты экспериментов по испарению в г. Симферополь

№ пп	Дата эксперимента	Начальный объем воды, мл	Средняя температура, °С	Средняя скорость испарения, мм/сут.	Начальный состав воды		Уравнение испарительного фракционирования $\delta^2\text{H} = a \times \delta^{18}\text{O} + b$	Уравнение для расчета доли потерь на испарение $\Delta V_E = a \times \Delta \Sigma + b$
					$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	$\delta^2\text{H}$, ‰ SMOW		
1	26.06–07.07.18	1400	22,4	0,39	-9,6	-64	$y = 4,43x - 21$	$y = 0,0266x - 0,0101$ ($R^2 = 0,995$)
2	08–22.07.18	2750	23,1	0,48	-8,7	-62	$y = 4,54x - 22$	$y = 0,0305x - 0,0022$ ($R^2 = 0,998$)
3	09–23.07.18	1700	23,1	0,24	-6,9	-48	$y = 4,45x - 20$	$y = 0,0257x - 0,0061$ ($R^2 = 0,995$)
4	24.08–02.09.18	2750	24,2	0,49	-4,5	-41	$y = 4,48x - 25$	$y = 0,0335x + 0,0056$ ($R^2 = 0,995$)
5	23.08–02.09.18	2580	24,9	0,5	-8,8	-62	$y = 4,35x - 26$	$y = 0,0319x + 0,0029$ ($R^2 = 0,996$)
Средний угловой коэффициент							4,5	0,0296

В работах [82, 83, 60] приведены данные по изотопному составу различных водных объектов, в частности, по ставкам (прудам, заполняемым в весеннее половодье из р. Бодрак), условия испарения с которых наиболее похожи на условия экспериментов, выполненных в г. Симферополь. Уравнение испарительной линии имеет вид $y = 4,633x - 18,39$; начальный состав воды $\delta^{18}\text{O} = -9,6$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -63$ ‰ (восстановлен по точке пересечения линии испарения с линией метеорных вод); на момент опробования средний изотопный состав воды в р. Бодрак $\delta^{18}\text{O} = -7,5$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -54$ ‰, а в ставках $\delta^{18}\text{O} = 1,4$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -12$ ‰. При использовании указанных данных и уравнения $\Delta V_E = 0,0296 \times \Sigma_{\Delta} + 0,0054$ (Табл. 4), получаем долю испарения ~9 % для речной и ~47 % для прудовой воды. Со времени заполнения ставок до момента опробования прошло 4–6 месяцев (март–август). Из таблицы 2 следует, что за это время удаляется от 40 до 65 % от годовой нормы потерь на испарение. Приводя полученную изотопным методом оценку для периода март–август к

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

годовому циклу, получаем испарение из прудов 70–90 %, что достаточно хорошо совпадает с оценкой стандартными методами.

В работе [84] приведены данные по озерам Central Alberta (Канада). Используя изотопные данные, авторы рассчитали потери на испарение в виде отношения «evaporation/inflow» и нашли, что оно варьирует от 18 до 136 % (в среднем 77 %) при темпах водообмена в озерах от 2,3 до 58 лет. Предположив, что природные условия в Альберте, в целом, соответствуют условиям в Карелии и Ленинградской области, авторы рассчитали испарение из указанных озер по своей методике и получили оценки потерь от 59 до 91 (в среднем 75 %).

В работе [85] приведены данные по искусственным озерам, используемым для ирригации, на the Yinchuan Plain, снабжаемым водой из Желтой реки (центральный Китай). Используя стандартные и изотопные методы (модель неравновесного испарения Craig–Gordon [86]), авторы рассчитали потери на испарение в пределах 25–43 % (в среднем 34 %). Предположив, что природные условия в некоторой степени похожи на Крым, авторы рассчитали испарение из указанных озер по своей методике и получили оценки потерь от 15 до 42 % (в среднем 29 %).

В работе [87] приведены данные по мелководному горному озеру Lashi Lake в области влияния муссонов (Mt. Yulong, южная часть горного массива the Hengduan Mountains, в провинции Yunnan, Китай). Используя изотопные методы (модель Gibson, Edwards [88]), авторы рассчитали потери на испарение в пределах 12–51 % (в среднем 32 %). Используя аппроксимацию уравнений, полученных в Крыму и ожидая некоторого смещения результатов из-за несовпадения природных условий, авторы рассчитали испарение из указанного озера по своей методике и получили оценки потерь от 18 до 38 % (в среднем 28 %).

ВЫВОДЫ

Выполненные эксперименты по испарению (Ленинградская область, Карелия, Крым), показали, что доля воды, испарившейся с поверхности водосборного бассейна, может быть определена по величине смещения изотопного состава воды в исследуемом водном объекте относительно начального (определяемого позицией на локальной линии метеорных вод). Предлагаемый подход сравнивался с оценками испарения, полученными стандартными методами и другими изотопными методами, и показал удовлетворительную сходимость с независимо полученными результатами.

Методика оценки испарения включает следующие этапы.

1. Проведение испарительных экспериментов.

1.1. Используют матовые, полупрозрачные или прозрачные стеклянные или пластиковые емкости, вмещающие не менее 3 л воды.

1.2. Слой воды в емкости-испаромере не должен превышать 5 см.

1.3. Потери на испарение определяют не реже раза в сутки объемным или весовым методом.

1.4. Отбор проб воды для изотопного анализа также выполняют не реже раза в сутки. Суммарный объем проб не должен существенно влиять на количество воды в испарителе. При стандартной аликвоте для анализа 2 мл, уменьшение объема/массы воды в испарителе, вследствие отбора единичной пробы, должно быть меньше погрешности измерения объема/массы воды в нем.

1.5. Для исключения неконтролируемых потерь/поступления воды испаромер помещают в короб с линейным размером в плане в 2 раза превышающем размер испарительной емкости при высоте стенок короба 0,4–0,5 м. Короб накрывается сеткой, а также защищается от выдувания воды и от попадания осадков пластиковым полупрозрачным или прозрачным козырьком.

1.6. Для опытов можно использовать воду атмосферных осадков, выпадающих в данный период года, дистиллированную воду, воду из-под крана или воду из исследуемого объекта.

1.7. Температура и влажность воздуха контролируется логгером или по данным метеостанции. Температура воды в испарителе – термометром или логгером. Полезно также контролировать электропроводность воды.

1.8. Опыты желательно проводить в точках, характеризующихся различными условиями испарения и в различные периоды года. При минусовой температуре воздуха в ночное время моменты отбора проб выбирают таким образом, чтобы в испарителе не было льда (воду в емкости перед отбором пробы перемешивают).

2. Измерение изотопного состава проб выполняют на приборах, обеспечивающих пренебрежимо малую погрешность, по сравнению диапазоном изменения изотопного состава воды при испарении.

3. Интерпретация испарительных экспериментов.

3.1. Вычисляют уравнение линии испарения в виде $\delta^2\text{H} = a \times \delta^{18}\text{O} + b$.

3.2. Вычисляют смещение изотопного состава воды при испарении для каждой пробы:

$$\Delta(\delta^{18}\text{O}) = \delta^{18}\text{O}_i - \delta^{18}\text{O}_{\text{НАЧ.}}$$

нормируют шкалу по дейтерию

$$\delta^2\text{H}_{\text{ИСПР.}} = (\delta^2\text{H}_{\text{ИЗМ.}} - b)/a;$$

и вычисляют смещение по дейтерию

$$\Delta(\delta^2\text{H}) = \delta^2\text{H}_i - \delta^2\text{H}_{\text{НАЧ.}},$$

где индексы i и НАЧ. – текущий и начальный, до испарения, состав кислорода и водорода.

Определяют полное смещение вдоль линии испарения для каждой пробы:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\{\Delta(\delta^2\text{H})\}^2 + \{\Delta(\delta^{18}\text{O})\}^2}.$$

3.3. Вычисляют линию аппроксимации для полученного набора данных – уравнение связи между смещением изотопного состава и долей потерь воды на испарение:

$$\Delta V_E = a \times \Sigma_{\Delta} + b$$

Удобство данного подхода состоит в относительной простоте постановки наблюдений и измерений, а также в эффекте автоматического интегрирования

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

сигнала, когда особенности испарения на отдельных участках исследуемой площади осредняются в результирующем изотопном составе стока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Совета министров Республики Крым в рамках научных проектов № 19-45-910008 «р_а» и № 19-05-00982.

Список литературы

1. Вонский С.М. Определение природной пожарной опасности в лесу. Методические рекомендации. Л.: ЛенНИИЛХ. 1981, 52 с.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А., Кравцова В.И. Спутниковый мониторинг Аральского моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXIII. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Российская академия наук. М.: Гидрометеиздат. 2010, с. 150–193.
3. Корзухин М.Д., Цельникер Ю.Л. Модельный анализ современных ареалов лесных древесных пород на территории России и их вариаций при возможных изменениях климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXIII. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Российская академия наук. М.: Гидрометеиздат. 2010, с. 249–268.
4. Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Шкляревич О.Б. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках на основе моделирования климатических условий // Метеорология и гидрология. 2007, № 3, с. 14–24.
5. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. 1975. Л.: Гидрометеиздат. 15 с.
6. Панин Г.Н., Дзюба А.В., Осипов А.Г. О возможных причинах изменения испарения за последние десятилетия в районе Каспийского моря // Водные ресурсы. 1991, № 3, с. 5–17.
7. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 165–189.
8. Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Изменение увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в условиях глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXII. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Российская академия наук. М.: Гидрометеиздат. 2009, с. 64–78.
9. Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Лесные пожары при потеплении климата в XXI веке // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXV. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Российская академия наук. М.: Гидрометеиздат. 2013, с. 300–313.
10. Ясюкевич В.В., Давидович Е.А. Влияние наблюдаемого и ожидаемого изменения климата на распространение насекомых // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXIII. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Российская академия наук. М.: Гидрометеиздат. 2010, с. 316–333.
11. Блютген И. География климатов. М.: Прогресс. 1972, т. 1, 428 с; 1973, т. 2, 402 с.
12. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
13. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука. 1964, 242 с.
14. Калужный И.Л., Романюк К.Д. Испарение с болотных массивов зоны олиготрофных болот // Вестник ТГПУ. 2009, № 3(81), с. 120–125.
15. Минин А.А., Колосов П.А. Испарение с суши за вегетационный период в Европейской части СССР // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XIII.

- Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Академия наук СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1991, с. 151–161.
16. Минин А.А., Лисеев А.А. Пространственно-временная изменчивость месячных сумм испарения с суши на Русской равнине // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XV. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Академия наук СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1993, с. 151–160.
 17. Турко С.Ю., Трубакова К.Ю. Математическая модель испарения при наличии на почвенной поверхности растительного экрана // Аграрный вестник Урала. 2017, т. 165, № 11, с. 65–69.
 18. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 82 с.
 19. Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy // *Agricultural Water Management*. 2011 a, v. 98, p. 899–920.
 20. Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation // *Agricultural Water Management*. 2011 b, v. 98, p. 921–929.
 21. Rana G. and Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review // *European Journal of Agronomy*, 2000, v. 13, p. 125–153.
 22. Wang K., Dickinson R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability // *Review of Geophysics*, 2012, v. 50, RG2005
 23. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 136 с.
 24. Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1968. 529 с.
 25. Мезенцев В.С. Расчет водного баланса. Омск : Сельхоз. ин-т. 1976. 76 с.
 26. Ольдекоп Э.М. Об испарении с поверхности речных бассейнов // Сб. трудов, исполненных студентами при Метеорологической обсерватории Юрьевского университета. Юрьев. 1911, т. 4, 209 с.
 27. Постников А.Н. Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах // Ученые записи Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 10.
 28. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 96 с.
 29. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 82 с.
 30. Blaney H.F. and Criddle W.D. Determining water requirement in irrigated areas from climatological data, Soil Conservation Service Technical Publication No. 96, Washington DC, US Department of Agriculture. 1950, 48 p.
 31. Hargraves G.H. and Samani Z.A. Estimating PET, Tech Note // *J. Irrig. Drain Eng.* 1982, v. 108, no. 3 p. 225–230.
 32. Schreiber P. Uber die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserfuehrung der Flusse in Mitteleuropa // *Meteorolog. Z.* 1904, 21, 441–452.
 33. Будыко М. И. Изменения климата. — Л. : Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.
 34. Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954, т. 86, № 2, с. 186–196.
 35. Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Springer, Dordrecht. 1982, 299 p.
 36. Ge Z.-M., Zhou X., Kellomäki S., Peltola H., Wang K.-Y. Climate, canopy conductance and leaf area development controls on evapotranspiration in a boreal coniferous forest over a 10-year period: A united model assessment // *Ecological Modelling*. 2011, v. 222, p. 1626–1638.
 37. Jasechko S., Sharp Z.D., Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y. & Fawcett P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration // *Nature*. 2013, v. 496, p. 347–351.
 38. Shuttleworth W.J., Wallace J.S. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1985, v. 111, p. 889–895.
 39. Stull R.B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* // *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Series Vol. 13*. Springer Netherlands. 1st ed. 1988, 670 p.
 40. Иофин З.К. Развитие методологии оценки элементов водного баланса речных бассейнов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология. М., ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». 2016. 37 с.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ
ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

41. Постников А.Н. Об изменении испарения с суши и водной поверхности на территории России за последние десятилетия // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018, № 50, с. 88–96.
42. Румянцев В.А., Ефимова Л.К., Голицын Г.С., Хон В.Ч., Лыскова У.С. Моделирование температурно-влажностного режима водосбора Ладожского озера // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2007, № 1, с. 130–135.
43. Румянцев В.А., Ефимова Л.К., Хон В.Ч. О возможных изменениях термического режима и водного баланса водосборов озер Онежского и Ильмень в будущем, по данным региональной модели климата RCAO // Известия Русского географического общества. 2011, т. 143, № 6, с. 37–42.
44. Сперанская Н.А. Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской части России за последние 50 лет (по экспериментальным данным) // Водные ресурсы. 2016, т. 43, № 6, с. 661–672.
45. Сперанская Н.А. Цыценко К.В. Изменения основных элементов влагооборота суши на Европейской части России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017, т. 3, с. 103–121.
46. Evett St.R., Schwartz R.C., Casanova J.J., Heng L.K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. // *Agricultural Water Management*, 2012, v. 104, p. 1–9.
47. Hack J.J., Caron J.M., Yeager S.G., Oleson K.W., Holland M.M., Truesdale J.E., and Rasch P.J. Simulation of the Global Hydrological Cycle in the CCSM Community Atmosphere. Model Version 3 (CAM3): Mean Features // *Journal of Climate*. 2006, v. 19, p. 2199–2221.
48. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. Экспериментальные исследования и моделирование. Монография. СПб: Нестор-История. 2012. 616 с.
49. Oleson K.W., Niu G.Y., Yang Z.L., Lawrence D.M., Thornton P.E., Lawrence P.J., Stöckli R., Dickinson R.E., Bonan G.B., Levis S., Dai A., Qian T. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle // *Journal of Geophysical Research*. 2008, v. 113, G01021, 26 p.
50. Robock A. Volcanic Eruptions and Climate // *Reviews of Geophysics*. 2000, v. 38 (2), p. 191–219.
51. Zhu G.F., Li X., Su Y.H., Zhang K., Bai Y., Ma J.Z., Li C.B., Hu X.L., and He J.H. Simultaneous parameterization of the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: application to spring maize in an arid region of northwest China // *Geoscientific Model Development Discussions*. 2014, v. 7, p. 741–775.
52. Засухин С.В. Метод расчета испарения с поверхности почвы по профилям влажности // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017, № 3, с. 83–96.
53. Цыпкин Г.Г. Капиллярная неустойчивость поверхности испарения в грунте // Доклады академии наук. 2017, т. 476, № 6, с. 644–647.
54. Ahlers C.Fredrik, Ghezzehei T., Finsterle S. Development and testing of a method for efficient simulation of evaporation from a seepage face // *Proceedings TOUGH Symposium*. May 12–14, 2003. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California. 2003, p. 1–5.
55. Dam J.C. van, Feddes R.A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation // *Journal of Hydrology*. 2000, v. 233, p. 72–85.
56. Аль-Тамими М.А., Чукин В.В. Параметризация глобального испарения на основе спутниковых данных о влагосодержании атмосферы // Успехи современного естествознания. 2016, № 2, с. 137–141.
57. Kite G.W., Droogers P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data // *Journal of Hydrology*. 2000, v. 229, p. 3–18.
58. Ruhoff A.L., Paz A.R., Aragao L.E.O.C., Mu Q., Malhi Y., Collischonn W., Rocha H.R., Running S.W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modeling in the Rio Grande basin // *Hydrological Sciences Journal*. 2013, v. 58 (8), p. 1–19.
59. Трансформация структуры водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века и ее оптимизация. Монография под ред. В.А. Бокова. Симферополь: Крымский научный центр. 2011, 227 с.

60. Каюкова Е.П. Оценка подземного стока как элемента водного баланса при комплексных гидрогеологических исследованиях (северо-западные склоны Крымских гор). Диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук. Специальность 25.00.07 – Гидрогеология. СПбГУ, ИНЗ. 2018, 189 с.
61. Turc L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour // *Ann. Agron.* 1961, 12, p. 13–49.
62. Turc L. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement // *Ann. Agron.* 1954, 5, 491–569.
63. Кузин П.С. График испарения с поверхности речного бассейна и его применение к расчету среднего многолетнего стока // *Записки ГГИ.* 1934, т. 12, с. 189–209.
64. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Гидрометеиздат, Л. 1946, 480 с.
65. Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters // *Science.* 1961, v. 133, p. 1702–1703.
66. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* 1964, v. XVI (4), p. 436–468.
67. Yurtsever Y., Gat J.R. Atmospheric waters // *Stable Isotope Hydrology*, ed. JR Gat, R Gonfiantini. IAEA Tech. Rep. Ser. 210. 1981, p. 103–42.
68. Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation. Technical Reports Series No. 331, IAEA, Vienna. 1992, 781 p.
69. Gibson J.J., Edwards T.W.D., Bursey G.G., Prowse T.D. Estimating evaporation using stable isotopes: quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in northern Canada // *Nordic Hydrology.* 1993, v. 24, p. 79–94.
70. Yakir D., Sternberg L.D.S.L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange // *Oecologia.* 2000, v. 123, p. 297–311.
71. Craig H., Gordon L.I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere // *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures.* Lab. Geologica Nucleare, Pisa. 1965, p. 9–130.
72. Gonfiantini R. Environmental isotopes in lake studies // *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry.* Vol. 3. Elsevier, New York. 1986, p. 113–168.
73. Majoube M. Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur // *J. Chim. Phys.* 1971, v. 197, p. 1423–1436.
74. Merlivat L. Dependence of bulk evaporation coefficients on air-water interfacial conditions as determined by the isotopic method // *Journal of Geophysical Research.* 1978, v. 83, p. 2977–2980.
75. Amenou N., Marah H., Raïbi F., Ezzahar J., Khabba S., Lionel J. and Ismaili M. Estimation of soil evaporation and infiltration losses using stable isotopes, Fluxmeter and Eddy-Covariance system for citrus orchards in a semi-arid region (Morocco) // *Academia Publishing. Academia Journal of Environmental Sciences,* 2013, v. 1 (1), p. 001–008.
76. Gibson J.J., Edwards T.W.D. and Prowse T.D. Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation // *Hydrological processes.* 1996, v. 10, p. 1369–1382.
77. Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Токарев И.В. Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов // *Ученые записки РГГМУ.* 2017, т. 48, с. 94–109.
78. Бородулина Г.С., Токарев И.В., Крайнюкова И.А. Изотопный состав воды Онежского озера // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения // *Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г.М. Крепса и 110-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского.* 2016, с. 169–172.
79. Бородулина Г.С., Токарев И.В., Левичев М.А. Оценка компонентов водного баланса Онежского озера по изотопным данным // *Матер. II Междунар. конф. «Озера Евразии: проблемы и пути их решения.* 19–24 мая 2019 г., Казань». Казань: Изд-во Академии наук РТ. 2019, ч. 1. с. 239–242.
80. Ладога. Моногр. под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История. 2013, 468 с.
81. Онежское озеро. Атлас. Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010.
82. Каюкова Е.П. Использование изотопных методов для оценки элементов водного баланса // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география.* 2013. вып. 4, с. 53–61.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

83. Каюкова Е.П. Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география. 2016, выпуск 2, с. 11–26.
84. Gibson J.J., Birks S.J., Yia Y., Moncur M.C., McEachern P.M. Stable isotope mass balance of fifty lakes in central Alberta: Assessing the role of water balance parameters in determining trophic status and lake level // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2016, v. 6, p. 13–25.
85. Qian H., Wu J., Zhou Y., and Li P., Stable oxygen and hydrogen isotopes as indicators of lake water recharge and evaporation in the lakes of the Yinchuan Plain // Hydrological processes. 2014, v. 28, p. 3554–3562.
86. Craig H., Gordon L.I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Lab. Geologica Nucleare. Pisa. 1965, p. 9–130.
87. Shi X., Pu T., He Y., Qi C., Zhang G. and Xia D. Variability of Stable Isotope in Lake Water and Its Hydrological Processes Identification in Mt. Yulong Region // Water. 2017, v. 9, 711 p.
88. Gibson J.J., Edwards T.W.D. Regional water balance trends and evaporation–transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada // Global Biogeochemical Cycles. 2002, v. 16, 10-1 – 10-14.

THE EVALUATION OF EVAPORATION BY USE OF DATA ON THE ISOTOPIC COMPOSITION OF WATER (^2H , ^{18}O)

Tokarev I. V¹, Amelichev G. N.²

¹ Saint Petersburg state University, Science Park, Saint Petersburg, Russian Federation

² V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation

E-mail: tokarevigor@gmail.com

In the study of water exchange systems, their water balance, methods for evaluation of moisture evaporation have a particular importance in determining the hydrodynamic characteristics of runoff. Normally, total evaporation or evapotranspiration is a difficult indicator, subject to the influence of numerous factors. Direct methods for determining evaporation are based on the use of water, soil and snow evaporators, as well as lysimeters at pilot evaporation sites. Equipment for direct evaporation measurements is expensive, and the measurements are laborious. The use of remote sensing for the calculation of evaporation does not give unambiguous answers. In all cases, grounding the models and the calculation parameters used requires a long series of data.

In connection with the above problems, it is urgent to develop methods that make it possible to perform an integrated assessment of the effect of evaporation on the water balance rather quickly, with satisfactory accuracy, and with regard to objects of various sizes. Therefore, the authors believe that for this purpose, data on the isotopic composition of water (the contents of deuterium — $\delta^2\text{H}$ and oxygen-18 — $\delta^{18}\text{O}$) can be used.

The interpretation of data on the isotopic composition of water is carried out on the basis of the classical $\delta^2\text{H} \div \delta^{18}\text{O}$ diagram. The ratio between the deuterium and oxygen-18 contents in the World precipitation obeys the linear equation $\delta^2\text{H} = a \times \delta^{18}\text{O} + b$, called the line of meteoric waters (LMW). Since fractionation proceeds under equilibrium conditions, the LMW coefficients are $a \approx 8$ and $b \approx 10$ and vary within small limits, maintaining a linear character. In experiments on evaporation in absolutely dry air at a

temperature of 20 °C W. Dansgaard obtained the equation of the evaporation line (EL) $\delta^2\text{H} = 5 \times \delta^{18}\text{O} + x$, in which the free member depends on the initial isotopic composition of water. In the course of the experiments performed by the authors, the local EL parameters were calculated (Crimea: $a \approx 4.5$; Karelia: $a \approx 5.18$). Then, the dependence that relates the volume of water loss due to evaporation with a change in the isotopic composition of the residual water was calculated. As a result, the performed experiments showed that the portion of water evaporated from the surface of the catchment basin can be determined by the magnitude of a shift of the isotopic composition of water in the studied water body relative to the initial one (determined by the position on the local line of meteoric waters). This approach greatly facilitates the calculations of total evaporation, which are so necessary for water balance researches in the studied territories.

Keywords: evapotranspiration, isotopic composition of water, experimental data, isotopic shift, evaporation line.

References

1. Vonskij S.M. Opredelenie prirodnoj pozharnoj opasnosti v lesu. Metodicheskie rekomendacii (Determination of natural fire hazard in the forest. Methodical recommendation). L.: LenNILH. 1981, 52 s. (in Russian).
2. Ginzburg A.I., Kostyanov A.G., Sheremet N.A., Kravcova V.I. Sputnikovij monitoring Aral'skogo moray (Satellite monitoring of the Aral sea) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XXIII. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy, Rossijskaya akademiya nauk. M.: Gidrometeoizdat. 2010, s. 150–193. (in Russian).
3. Korzuhin M.D., Cel'niker YU.L. Model'nyj analiz sovremennyh arealov lesnyh drevesnyh porod na territorii Rossii i ih variacij pri vozmozhnyh izmeneniyah klimata (Model analysis of modern areas of forest tree species on the territory of Russia and their variations under possible climate changes) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XXIII. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy, Rossijskaya akademiya nauk. M.: Gidrometeoizdat. 2010, s. 249–268. (in Russian).
4. Malevskij-Malevich S.P., Mol'kentin E.K., Nadezhina E.D., Shklyarevich O.B. Analiz izmeneniya pozharoopasnoj obstanovki v lesah Rossii v XX i XXI vekah na osnove modelirovaniya klimaticeskikh uslovij (Analysis of changes in the fire hazard situation in the forests of Russia in the XX and XXI centuries based on climate modeling) // Meteorologiya i gidrologiya. 2007, № 3, s. 14–24. (in Russian).
5. Metodicheskie ukazaniya po prognozirovaniyu pozharnoj opasnosti v lesah po usloviyam pogody (Guidelines for predicting fire danger in forests based on weather conditions) L.: Gidrometeoizdat. 1975. 15 s. (in Russian).
6. Panin G.N., Dzyuba A.V., Osipov A.G. O vozmozhnyh prichinah izmeneniya ispareniya za poslednie desyatiletiya v rajone Kaspijskogo moray (Possible reasons for changes in evaporation over the past decades in the Caspian sea region) // Vodnye resursy. 1991, № 3, s. 5–17. (in Russian).
7. Sirotenko O. D., Pavlova V. N. Metody ocenki vliyaniya izmenenij klimata na produktivnost' sel'skogo hozyajstva (Methods for assessing the impact of climate change on agricultural productivity) // Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. M.: Rosgidromet, 2012. S. 165–189. (in Russian).
8. Cherenkova E.A., Titkova T.B. Izmenenie uvlazhneniya subboreal'nyh ravninnyh landshaftov Rossii v usloviyah global'nogo potepeniya (Changes in humidification of Subboreal plain landscapes of Russia in the conditions of global warming) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

- ekosistem. Tom XXII. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy, Rossijskaya akademiya nauk. M.: Gidrometeoizdat. 2009, s. 64–78. (in Russian).
9. Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B. Lesnye pozhary pri potepnenii klimata v XXI veke (Forest fires in a warming climate in the XXI century) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XXV. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy, Rossijskaya akademiya nauk. M.: Gidrometeoizdat. 2013, s. 300–313. (in Russian).
 10. Yasyukevich V.V., Davidovich E.A. Vliyanie nablyudaemogo i ozhidaemogo izmeneniya klimata na rasprostranenie nasekomyh (Impact of observed and expected climate change on insect distribution) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XXIII. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy, Rossijskaya akademiya nauk. M.: Gidrometeoizdat. 2010, s. 316–333. (in Russian).
 11. Blyutgen I. Geografiya klimatov (The geography of climates). M.: Progress. 1972, t. 1, 428 s; 1973, t. 2, 402 s. (in Russian).
 12. Bratsert U.H. Isparenie v atmosferu. Teoriya, istoriya, prilozheniya (Evaporation into the atmosphere. Theory, history, applications). L.: Gidrometeoizdat, 1985. 351 s. (in Russian).
 13. Budagovskij A.I. Isparenie pochvennoj vlagi (Evaporation of soil moisture). M.: Nauka. 1964, 242 s.
 14. Kalyuzhnyj I.L., Romanyuk K.D. Isparenie s bolotnyh massivov zony oligotrofnih bolot (Evaporation from wetland massifs of the zone of oligotrophic bogs) // Vestnik TGPU. 2009, № 3(81), s. 120–125.
 15. Minin A.A., Kolosov P.A. Isparenie s sushi za vegetacionnyj period v Evropejskoj chasti SSSR (Evaporation from land during the growing season in the European part of the USSR) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XIII. Gosudarstvennyj komitet SSSR po gidrometeorologii, Akademiya nauk SSSR. L.: Gidrometeoizdat. 1991, s. 151–161. (in Russian).
 16. Minin A.A., Liseev A.A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' mesyachnyh summ ispareniya s sushi na Russkoj ravnine (Spatial and temporal variability of monthly amounts of evaporation from land on the Russian plain) // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. Tom XV. Gosudarstvennyj komitet SSSR po gidrometeorologii, Akademiya nauk SSSR. L.: Gidrometeoizdat. 1993, s. 151–160. (in Russian).
 17. Turko S.YU., Trubakova K.YU. Matematicheskaya model' ispareniya pri nalichii na pochvennoj poverhnosti rastitel'nogo ekrana (Mathematical model of evaporation in the presence of a plant screen on the soil surface) // Agrarnyj vestnik Urala. 2017, t. 165, № 11, s. 65–69. (in Russian).
 18. Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation // Agricultural Water Management. 2011 b, v. 98, p. 921–929.
 19. Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation // Agricultural Water Management. 2011 b, v. 98, p. 921–929.
 20. Rana G. and Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review // European Journal of Agronomy, 2000, v. 13, p. 125–153.
 21. Wang K., and Dickinson R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. Review of Geophysics, 2012, v. 50, RG2005.
 22. Budyko M.I. Isparenie v estestvennyh usloviyah (Evaporation under natural conditions). L.: Gidrometeoizdat, 1948. 136 s. (in Russian).
 23. Konstantinov A.R. Isparenie v prirode (Evaporation in nature). L.: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1968. 529 s. (in Russian).
 24. Mezencev V.S. Raschet vodnogo balansa (Water balance calculation). Omsk, sel'hoz. in-t. 1976. 76 s.
 25. Ol'dekop E.M. Ob isparenii s poverhnosti rechnyh bassejnov (On evaporation from the surface of river basins) // Sb. trudov, ispolnennyh studentami pri Meteorologicheskoy observatorii YUr'evskogo universiteta. YUr'ev. 1911, t. 4, 209 s. (in Russian).
 26. Postnikov A.N. Metod rascheta ispareniya s pochvy v razlichnyh prirodnyh zonah (The method of calculating evaporation from the soil in different natural zones) // Uchenye zapisi Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2009. № 10. (in Russian).
 27. Rekomendacii po raschetu ispareniya s poverhnosti sushi (Recommendations for calculating evaporation from the land surface). L.: Gidrometeoizdat, 1976. 96 s. (in Russian).
 28. Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverhnosti vodoemov (Instructions for calculating evaporation from the surface of reservoirs). L.: Gidrometeoizdat, 1969. 82 s. (in Russian).

29. Blaney H.F. and Criddle W.D. Determining water requirement in irrigated areas from climatological data, Soil Conservation Service Technical Publication No. 96, Washington DC, US Department of Agriculture. 1950, 48 p.
30. Hargraves G.H. and Samani Z.A. Estimating PET, Tech Note // J. Irrig. Drain Eng. 1982, v. 108, no. 3 p. 225–230.
31. Hargraves G.H. and Samani Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature // Appl. Eng. Agric. 1985, v. 1, no. 2, p. 96–99.
32. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Meteorolog. Z. 1904, 21, 441–452.
33. Budyko M. I. *Izmeneniya klimata (Climate change)*. L. : Gidrometeoizdat, 1974. 280 s. (in Russian).
34. Ivanov N.N. Ob opredelenii velichin isparyaemosti (On determining the values of evaporation) // *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*. 1954, t. 86, № 2, s. 186–196. (in Russian).
35. Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Springer, Dordrecht. 1982, 299 p.
36. Ge Z.-M., Zhou X., Kellomäki S., Peltola H., Wang K.-Y. Climate, canopy conductance and leaf area development controls on evapotranspiration in a boreal coniferous forest over a 10-year period: A united model assessment // *Ecological Modelling*. 2011, v. 222, p. 1626–1638.
37. Jasechko S., Sharp Z.D., Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y. & Fawcett P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration // *Nature*. 2013, v. 496, p. 347–351. doi:10.1038/nature11983.
38. Shuttleworth W.J., Wallace J.S. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1985, v. 111, p. 889–895.
39. Stull R.B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* // *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Series Vol. 13*. Springer Netherlands. 1st ed. 1988, 670 p.
40. Iofin Z.K. Razvitie metodologii ocenki elementov vodnogo balansa rechnyh bassejnov (Development of methodology for assessing elements of river basin water balance). Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. 05.23.16 – Gidravlika i inzhenernaya gidrologiya. M., FGBOU VO «Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet – MSKHA imeni K.A. Timiryazeva». 2016. 37 s. (in Russian).
41. Postnikov A.N. Ob izmenenii isparenija s sushi i vodnoj poverhnosti na territorii Rossii za poslednie desyatiletija (On changes in evaporation from land and water surfaces in Russia over the past decades) // *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2018, № 50, s. 88–96. (in Russian).
42. Romyancev V.A., Efimova L.K., Golicyn G.S., Hon V.CH., Lyskova U.S. Modelirovanie temperaturno-vlazhnostnogo rezhima vodosbora Ladozhskogo ozera (Modeling of the temperature and humidity regime of the lake Ladoga catchment area) // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2007, № 1, s. 130–135. (in Russian).
43. Romyancev V.A., Efimova L.K., Hon V.CH. O vozmozhnyh izmenenijah termicheskogo rezhima i vodnogo balansa vodosborov ozer Onezhskogo i Il'men' v budushchem, po dannym regional'noj modeli klimata RCAO (On possible changes in the thermal regime and water balance of the catchments of lakes Onega and Ilmen in the future, according to the RCAO regional climate model) // *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2011, t. 143, № 6, s. 37–42. (in Russian).
44. Speranskaya N.A. Potencial'no vozmozhnoe i vidimoe isparenje i ego izmeneniya na Evropejskoj chasti Rossii za poslednie 50 let (po eksperimental'nym dannym) (Potential and visible evaporation and its changes in the European part of Russia over the past 50 years (according to experimental data)) // *Vodnye resursy*. 2016, t. 43, № 6, s. 661–672. (in Russian).
45. Speranskaya N.A. Cyenko K.V. Izmeneniya osnovnyh elementov vlagooborota sushi na Evropejskoj chasti Rossii (Changes in the main elements of land moisture turnover in the European part of Russia) // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2017, t. 3, s. 103–121. (in Russian).
46. Evett St.R., Schwartz R.C., Casanova J.J., Heng L.K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE // *Agricultural Water Management*, 2012, v. 104, p. 1–9.
47. Hack J.J., Caron J.M., Yeager S.G., Oleson K.W., Holland M.M., Truesdale J.E., and Rasch P.J. Simulation of the Global Hydrological Cycle in the CCSM Community Atmosphere. Model Version 3 (CAM3): Mean Features // *Journal of Climate*. 2006, v. 19, p. 2199–2221.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ
ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

48. Kalyuzhnyj I.L., Lavrov S.A. *Gidrofizicheskie processy na vodosbore. Eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie* (Hydrophysical processes in the catchment area. Experimental research and modeling). Monografiya. SPb: Nestor-Istoriya. 2012. 616 s. (in Russian).
49. Oleson K.W., Niu G.Y., Yang Z.L., Lawrence D.M., Thornton P.E., Lawrence P.J., Stöckli R., Dickinson R.E., Bonan G.B., Levis S., Dai A., Qian T. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle // *Journal of Geophysical Research*. 2008, v. 113, G01021, 26 p.
50. Robock A. Volcanic Eruptions and Climate // *Reviews of Geophysics*. 2000, v. 38 (2), p. 191–219.
51. Zhu G.F., Li X., Su Y.H., Zhang K., Bai Y., Ma J.Z., Li C.B., Hu X.L., and He J.H. Simultaneous parameterization of the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: application to spring maize in an arid region of northwest China // *Geoscientific Model Development Discussions*. 2014, v. 7, p. 741–775.
52. Zasuhin S.V. Metod rascheta ispareniya s poverhnosti pochvy po profilyam vlazhnosti (Method for calculating evaporation from the soil surface based on humidity profiles) // *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2017, № 3, s. 83–96. (in Russian).
53. Cypkin G.G. Kapillyarnaya neustojchivost' poverhnosti ispareniya v grunte (Capillary instability of the evaporation surface in the ground) // *Doklady akademii nauk*. 2017, t. 476, № 6, s. 644–647. (in Russian).
54. Ahlers C.Fredrik, Ghezzehei T., Finsterle S. Development and testing of a method for efficient simulation of evaporation from a seepage face // *Proceedings TOUGH Symposium*. May 12–14, 2003. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California. 2003, p. 1–5.
55. Dam J.C. van, Feddes R.A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation // *Journal of Hydrology*. 2000, v. 233, p. 72–85.
56. Al'-Tamimi M.A., Chukin V.V. Parametrizaciya global'nogo ispareniya na osnove sputnikovyh dannyh o vlagosoderzhanii atmosfery (Parameterization of global evaporation based on satellite data on atmospheric moisture content) // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016, № 2, s. 137–141. (in Russian).
57. Kite G.W., Droogers P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data // *Journal of Hydrology*. 2000, v. 229, p. 3–18.
58. Ruhoff A.L., Paz A.R., Aragao L.E.O.C., Mu Q., Malhi Y., Collischonn W., Rocha H.R., and Running S.W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modeling in the Rio Grande basin // *Hydrological Sciences Journal*. 2013, v. 58 (8), p. 1–19.
59. Transformaciya struktury vodnogo balansa v Krymu v XX veke – nachale XXI veka i ee optimizaciya (Transformation of the water balance structure in the Crimea in the XX century-early XXI century and its optimization). Monografiya pod red. V.A. Bokova. Simferopol': Krymskij nauchnyj centr. 2011, 227 s.
60. Kayukova E.P. Ocenka podzemnogo stoka kak elementa vodnogo balansa pri kompleksnyh gidrogeologicheskikh issledovaniyah (severo-zapadnye sklony Krymskih gor) (Assessment of underground runoff as an element of water balance in complex hydrogeological studies (North-Western slopes of the Crimean mountains)). Dissertaciya ... kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Special'nost' 25.00.07 – Gidrogeologiya. SPbGU, INZ. 2018, 189 s. (in Russian).
61. Turc L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour // *Ann. Agron.* 1961, 12, p. 13–49.
62. Turc L. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement // *Ann. Agron.* 1954, 5, 491–569.
63. Kuzin P.S. Grafik ispareniya s poverhnosti rechnogo bassejna i ego primenenie k raschetu srednego mnogoletnego stoka (Graph of evaporation from the surface of a river basin and its application to the calculation of average long-term runoff) // *Zapiski GGI*. 1934, t. 12, s. 189–209. (in Russian).
64. Polyakov B.V. *Gidrologicheskij analiz i raschety* (Hydrological analysis and calculations). Gidrometeoizdat, L. 1946, 480 s. (in Russian).
65. Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*. 1961, v. 133, p. 1702–1703.
66. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, v. XVI (4), p. 436–468.

67. Yurtsever Y., Gat J.R. Atmospheric waters // *Stable Isotope Hydrology*, ed. JR Gat, R Gonfiantini. IAEA Tech. Rep. Ser. 210. 1981, p. 103–42.
68. Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation. Technical Reports Series No. 331, IAEA, Vienna. 1992, 781 p.
69. Gibson J.J., Edwards T.W.D., Bursley G.G., and Prowse T.D. Estimating evaporation using stable isotopes: quantitative results and sensitivity analysis for two catchments in northern Canada // *Nordic Hydrology*. 1993, v. 24, p. 79–94.
70. Yakir D. and Sternberg L.D.S.L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange // *Oecologia*, 2000, v. 123, p. 297–311.
71. Craig H. and Gordon L.I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere // *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. Lab. Geologica Nucleare, Pisa. 1965, p. 9–130.
72. Gonfiantini R. Environmental isotopes in lake studies. In Fritz P., and Fontes J.Ch. (Eds), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Vol. 3. Elsevier, New York. 1986, p. 113–168.
73. Majoube M. Fractionnement en oxygene-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur // *J. Chim. Phys.* 1971, v. 197, p. 1423–1436.
74. Merlivat L. Dependence of bulk evaporation coefficients on air-water interfacial conditions as determined by the isotopic method // *Journal of Geophysical Research*. 1978, v. 83, p. 2977–2980.
75. Amenou N., Marah H., Raibi F., Ezzahar J., Khabba S., Lionel J. and Ismaili M. Estimation of soil evaporation and infiltration losses using stable isotopes, Fluxmeter and Eddy-Covariance system for citrus orchards in a semi-arid region (Morocco) // *Academia Publishing. Academia Journal of Environmental Sciences*, 2013, v. 1 (1), p. 001–008.
76. Gibson J.J., Edwards T.W.D. and Prowse T.D. Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation // *Hydrological processes*. 1996, v. 10, p. 1369–1382.
77. Rummyancev V.A., Rybakina V.N., Tokarev I.V. Rasprostranenie vod pritokov i podzemnykh vod v Ladozhskom ozere po dannym izotopnykh indikatorov (The distribution of the waters of the tributaries and groundwater in the lake Ladoga, according to the tracers) // *Uchenye zapiski RGGMU*. 2017, t. 48, s. 94–109. (in Russian).
78. Borodulina G.S., Tokarev I.V., Krajnyukova I.A. Izotopnyy sostav vody Onezhskogo ozera (Isotopic composition of lake Onega water) // *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ih resheniya. Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya G.M. Krepsa i 110-letiyu so dnya rozhdeniya O.I. Semenova-Tyan-Shanskogo*. 2016, s. 169–172. (in Russian).
79. Borodulina G.S., Tokarev I.V., Levichev M.A. Ocenka komponentov vodnogo balansa Onezhskogo ozera po izotopnym dannym (Assessment of water balance components of lake Onega using isotope data) // *Mater. II Mezhdunar. konf. «Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya. 19–24 maya 2019 g., Kazan'»*. Kazan': Izd-vo Akademii nauk RT. 2019, ch. 1. s. 239–242. (in Russian).
80. Ladoga. Monografiya pod red. V.A. Rummyanceva, S.A. Kondrat'eva. SPb.: Nestor-Istoriya. 2013, 468 s.
81. Onezhskoe ozero. Atlas (lake Onega. Atlas). Otv. red. N.N. Filatov. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2010.
82. Kayukova E.P. Ispol'zovanie izotopnykh metodov dlya ocenki elementov vodnogo balansa (The use of isotope techniques for the assessment of water balance elements) // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7: Geologiya, geografiya*. 2013. vyp. 4. s. 53–61. (in Russian).
83. Kayukova E.P. Formirovaniye izotopnogo sostava prirodnykh vod Gornogo Kryma pod vliyaniem estestvennykh processov (Formation of the isotopic composition of natural waters of the Mountainous Crimea under the influence of natural processes) // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7: Geologiya, geografiya*. 2016 a, vypusk 2, s. 11–26. (in Russian).
84. Gibson J.J., Birks S.J., Yia Y., Moncur M.C., McEachern P.M. Stable isotope mass balance of fifty lakes in central Alberta: Assessing the role of water balance parameters in determining trophic status and lake level // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2016, v. 6, p. 13–25.
85. Qian H., Wu J., Zhou Y., and Li P., Stable oxygen and hydrogen isotopes as indicators of lake water recharge and evaporation in the lakes of the Yinchuan Plain // *Hydrological processes*. 2014, v. 28, p. 3554–3562.

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ
ВОДЫ (^2H , ^{18}O)

86. Craig H. and Gordon L.I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Lab. Geologica Nucleare, Pisa. 1965, p. 9–130.
87. Shi X., Pu T., He Y., Qi C., Zhang G. and Xia D. Variability of Stable Isotope in Lake Water and Its Hydrological Processes Identification in Mt. Yulong Region // Water. 2017, v. 9, 711p.
88. Gibson J.J., Edwards T.W.D. Regional water balance trends and evaporation–transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada // Global Biogeochemical Cycles. 2002, v. 16, 10–1–10–14.

Поступила в редакцию 15.08.2020 г.