ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.132.6

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ С ТРАВЯНЫМ ПОКРОВОМ: ДОСТУПНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ДАННЫЕ

© 2016 г. Н.А. Сперанская

ФГБУ "Государственный гидрологический институт", С.-Петербург, Россия e-mail: speran@mail.rcom.ru

Поступила в редакцию 17.07.2015 г.

Проведён анализ изменения испарения с поверхности почвы с естественным травяным покровом на территории Европейской России с 1960 по 1986 г. и выделены регионы характерных изменений его величины.

Оценены изменения величины испарения после 1987 г. по данным наблюдений за испарением с водной поверхности и осадкам за тёплый период года.

Выполнен анализ наблюдённых и восстановленных значений испарения с 1966 по 2010 г.

Ключевые слова: испарение с почвы, испарение с водной поверхности, метод оценки испарения, изменения величины испарения на ЕТР.

Введение. Испарение с поверхности почвы с естественным травяным растительным покровом – основа исследований составляющих водного баланса суши.

Проблема оценки величины этого вида испарения возникла практически с самого начала анализа водного баланса подстилающей поверхности [2, 39, 48]. При этом в Советском Союзе большое внимание уделялось исследованию данных натурных наблюдений, а за рубежом развивались главным образом расчетные методы.

В настоящее время основными методами оценки испарения с почвы являются модели, базирующиеся на решении водного и теплового балансов суши в различных формах [1, 4, 9, 22, 39, 48].

Оценки по методу теплового баланса предполагают учёт его составляющих в приземном слое атмосферы: радиационного баланса, потока тепла в почву, термических и влажностных характеристик воздуха приземного слоя [15, 20, 25, 26, 50, 53, 54].

Методы, основанные на водном балансе приземного слоя атмосферы, учитывают зависимость испарения от доступной влаги (включая влажность почвы), температуры и влажности приземного слоя воздуха, осадков [16, 27, 35, 45].

Однако разница между этими методами невелика, поскольку в моделях достаточно часто используется так называемый "комплексный

метод" [2, 39], объединяющий оба подхода. При этом оценить достоверность модельных оценок достаточно сложно.

Наряду с теоретическими методами оценки величины испарения с поверхности почвы широкое распространение получили различные эмпирические подходы [6, 10, 11, 18, 28]. В последние десятилетия, например, при оценке испарения с поверхности почвы используются методы, в основе которых лежит соотношение величин испарения с водной поверхности и с поверхности суши.

Впервые предположение о существовании прямой связи между этими видами испарения было высказано в работе Пенмана [39]. В начале 1960-х гг. были опубликованы исследования Буше [21], в которых утверждалось, что между испарением с водной поверхности и поверхности суши наблюдается обратная зависимость. Результаты обеих работ положили начало исследованиям по оценке испарения с поверхности суши с учётом данных по испарению с поверхности воды.

Предположение Пенмана [39] оказалось малоприемлемым (см., например, [49, 51]). И большинство работ посвящено исследованию гипотезы Буше [21]. В её развитие было разработано немалое количество моделей [23, 29, 37 и др.].

Развитие таких моделей позволило подтвердить реалистичность гипотезы Буше для разных

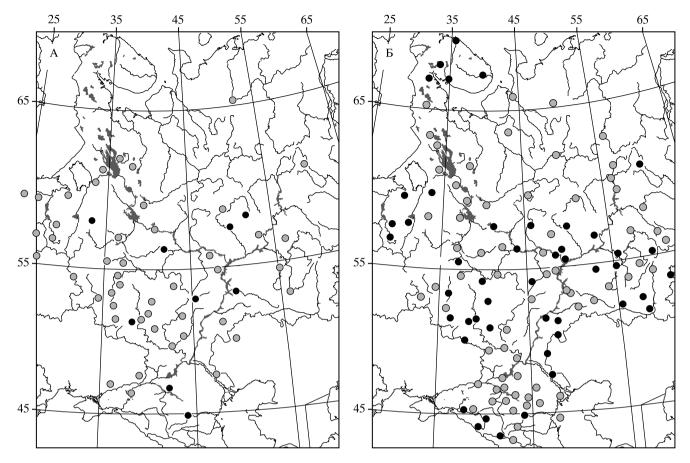


Рис. 1. Расположение почвенно- (A) и водноиспарительных (Б) станций на ЕТР и ближайшей территории бывших союзных республик.

Точки: серые – закрытые станции, черные – станции, продолжающие наблюдения после 2010 г.

временных интервалов и различных по площади территорий и, отчасти, объяснить наблюдаемые тренды испарения при изменении климата [24, 30–32, 34, 38, 42, 46, 52 и др.].

Именно гипотеза Буше о взаимодополняющем соотношении между испарением с водной поверхности и поверхности почвы была использована при оценке испарения с естественного травяного покрова после второй половины 1980-х гг.

Используемые данные. При анализе изменения испарения использовались данные наблюдений регулярной сети почвенно- и водноиспарительных станций Росгидромета (рис. 1).

Регулярная сеть почвенно- и водноиспарительных станций начала формироваться со второй половины 1950-х гг. Своего максимального развития она достигла в 1980-х гг. В это время на ЕТС функционировали 82 почвенноиспарительные станции и чуть менее 150 водноиспарительных станций. При этом на многих их них велись параллельные наблюдения за испарением с водной поверхности и с участков с естественным травяным растительным покровом.

В начале 1990-х гг. сеть специализированных станций начала стремительно сокращаться. К настоящему времени на Европейской территории России продолжают работать только 8 почвенноиспарительных и 48 водноиспарительных станций. При этом оказались закрытыми станции, продолжительность рядов наблюдений которых составляла более 40 лет (см. рис. 1).

В данной работе были использованы данные о суммарном испарении за тёплый период (май-сентябрь) для всех доступных почвенно- и водноиспарительных станций.

К анализу привлекались данные 47 почвенноиспарительных станций (с максимально доступной информацией до 1986 г.) (рис. 1А) и 48 водноиспарительных станций (продолжающих наблюдения после 2010 г.). Дополнительно использовались данные ещё 63 водноиспарительных станций (рис. 1Б), имеющих более короткие ряды наблюдений (до 1995/2005 гг.).

Данные по испарению с поверхности почвы (как с естественного растительного покрова, так и с различных сельхозкультур) с 1951 по

1986/1990 г. содержатся в базе данных ФГБУ "ГГИ". Пополнение базы после 1990-х гг. почти невозможно, поскольку позднейшие данные концентрируются в региональных УГМС и Госфонде и практически недоступны для научных исследований.

Данные по испарению с водной поверхности содержатся в базе данных, созданной в ФГБУ "ГГИ" (Валдайский филиал). Анализируемый период охватывает временной интервал с 1951 по 2010 г. (последний год, за который обработаны данные со всех действующих станций).

Кроме того, в работе использовались данные о месячных суммах осадков для 700 станций на ЕТР с 1966 по 2010 г. из архива, подготовленного во ВНИИГМИ-МЦД (http://meteo.ru/data/158-to-tal-precipitation). Ограничение 1966-м г. обусловлено тем фактом, что до этого в наблюдениях за осадками, по крайней мере, трижды была нарушена однородность рядов: 1) в 1930-х гг. провели массовый перенос станций на отрытое место; 2) в начале 1950-х гг. произошла смена прибора; 3) с января 1966 г. поправка на смачивание стала вводиться непосредственно на станции. После 1966 г. ряды сумм осадков можно считать однородными.

Для всех станций предварительно были получены суммы осадков за тёплый период года (май-сентябрь).

Изменения испарения с почвы на Европейской территории России до второй половины 1980-х гг. Анализ изменения испарения с поверхности почвы осложняется несколькими факторами, наиболее существенными из которых являются недостаточная продолжительность рядов наблюдений; особенности режима испарения на участках с естественным (преимущественно луговым) растительным покровом и с различными сельхозкультурами.

Поскольку наблюдений на участках с естественным растительным покровом недостаточно для покрытия всей рассматриваемой территории, к анализу были дополнительно привлечены данные по испарению с озимых культур. Результаты предыдущих исследований [7] показали, что режим испарения с озимых культур в течение тёплого периода года практически не отличается от испарения с естественного травяного покрова и привлечение таких данных к анализу возможно.

Наиболее полные ряды наблюдений охватывают период с мая по сентябрь. Именно для этого периода были получены сезонные величины суммарного испарения.

Ярко выраженной зональности в изменении величины испарения с почвы в тёплый период года (май-сентябрь) на ЕТР выявить не удаётся. Тем не менее некоторые закономерности изменения испарения по территории можно отметить.

Так, в таёжной зоне величина испарения за тёплый период колеблется от 320–340 мм на западе до 240–260 мм в восточной части ЕТР. В зоне смешанных и широколиственных лесов она слегка увеличивается до 350–390 мм, хотя на Среднерусской возвышенности её величина практически не меняется (310–325 мм). В лесостепной зоне значения величины испарения колеблются от 410 мм на западе (где увлажнение выше) до 310–330 мм на востоке. По-видимому, в зоне широколиственных лесов и лесостепной зоне существует оптимальное соотношение между доступными ресурсами влаги и температурным режимом.

Южнее, в зоне тучных степей, испарение с почвы несколько уменьшается, до 280–300 мм, а в зоне сухих степей оно изменяется от 280 мм на западе до 240 мм в Заволжье. В степях Предкавказья величина испарения снова растёт до 320–340 мм, а к зоне полупустынь испарение резко уменьшается до 160–180 мм.

Такое распределение величины суммарного испарения за тёплый период (май—сентябрь) отражает режим увлажнённости территории и её термические ресурсы.

Анализ временных трендов измеренных величин испарения с поверхности суши показал, что на всей территории Европейской России наблюдается рост испарения с поверхности почвы (рис. 2) с 1960 до 1986 г. (последнего года, для которого доступно максимальное количество данных наблюдений).

Максимальный рост испарения при этом отмечается в зоне избыточного и достаточного (в соответствии с [3]) увлажнения: в таёжной зоне и в зоне смешанных лесов (регион 2–1, рис. 2); на основной части зоны широколиственных лесов и зоны луговой степи (регион 2–2, 2–4, рис. 2), в восточной части зоны южной тайги (регион 2–2, рис. 2).

Практически такой же интенсивный рост испарения наблюдается в регионе луговых и засушливых степей Предкавказья (регион 2–7, рис. 2).

Изменения величины испарения с поверхности почвы в степной зоне (регионы 2–3, 2–5, 2–6, рис. 2) менее значительны, что свидетельствует об относительно устойчивом режиме увлажнения этих территорий.

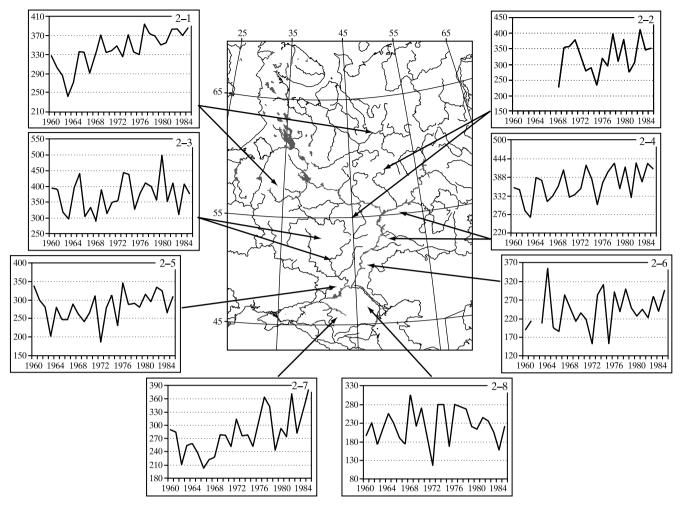


Рис. 2. Характерные особенности изменения испарения с травяного растительного покрова (мм) в разных частях Европейской территории России с 1960 по 1985 год:

2–1 – таежная зона, запад южной тайги и зоны смешанных лесов; 2–2 – восточная часть зоны южной тайги и зоны широколиственных лесов; 2–3 – западная часть зоны широколиственных лесов и лесостепи и часть региона типичных степей (до р. Волга); 2–4 – основная часть зоны широколиственных лесов и лесостепи; 2–5 – основная часть региона типичных степей; 2–6 – регион сухих степей Заволжья; 2–7 – засушливые степи и степи Предкавказья; 2–8 – юг региона сухих степей и зона полупустынь.

На юге ETP в зоне сухих степей и полупустынь величина испарения в целом за весь период практически не меняется (регион 2–8, рис. 2).

Вместе с тем доступные ряды наблюдений не позволяют проследить изменения величины испарения за прошедшие почти три десятилетия. Поэтому была сделана попытка продлить данные до современного периода.

Метод оценки величины испарения с травяного растительного покрова. В первой половине 1960-х гг. были опубликованы результаты многолетних исследований Р.Дж. Буше [21], где была высказана идея о том, что между испарением с водной поверхности и с поверхности суши существует взаимодополняющее соотношение: падение испарения с поверхности суши при достаточном количестве доступной влаги компенсируется ростом

испарения с поверхности воды (рис. 3). В условиях же повышенного увлажнения величина обоих видов испарения становится одинаковой [21, 36].

В некоторых исследованиях [19, 41, 43, 44, 47] соотношение величины разных видов испарения рассматривается как некий постоянный коэффициент.

В других работах связь двух видов испарения аппроксимируется различными функциональными зависимостями от: 1) радиационного индекса сухости М.И. Будыко [3, 10, 17], 2) разности между испаряемостью, рассчитанной по комплексному методу [4], и наблюдёнными осадками [5], 3) влагосодержания почвы [40], 4) совместного влияния нескольких факторов [33].

Идея Буше [21] о взаимодополняющем соотношении двух видов испарения лежит в основе

предлагаемого метода восстановления величины испарения с поверхности почвы по данным об испарении с водной поверхности.

В данной работе используется функциональная зависимость между испарением с залежи ($E_{\rm nog}$) и испарением с водной поверхности: $E_{\rm nog} = E_{\rm вода} \cdot K_1$, которая оценивается в зависимости от величины видимого испарения, т.е. разности между испарением с водной поверхности и осадками за тот же самый период.

Коэффициент соотношения (K_1) описывается экспоненциальным уравнением вида $K_1 = ae^{-n\tilde{E}}$, где \tilde{E} — видимое испарение, a и n — эмпирические параметры.

Понятие видимого испарения давно используется в океанологии и гидрологии в воднобалансовых исследованиях различных водоёмов. Однако в данном исследовании величина видимого испарения характеризует величину свободной влаги в атмосфере над поверхностью суши, которая может быть вовлечена в процесс её влагооборота.

Положительная величина видимого испарения свидетельствует о недостаточном увлажнении территории, поскольку в этом случае испарение превышает осадки ("сухие" годы). Отрицательным видимое испарение становится, когда величина осадков превышает испарение ("влажные" годы). Чем меньше величина видимого испарения, тем более увлажнённой становится территория и тем больше влаги участвует во влагообороте.

Результаты предыдущих исследований [7, 13, 14] показали, что использование этого подхода с достаточной степенью надёжности позволяет восстанавливать величину испарения с поверхности почвы с естественным травяным растительным покровом в разных природных зонах. При этом необходимо отметить, что данный метод позволяет получать наиболее достоверные результаты для некоторых выделенных территорий, а не для отдельных станций. Кроме того, повышению точности расчётных оценок величины испарения способствует дробность деления всего диапазона изменений величины видимого испарения на отдельные части: чем уже интервал изменения его величины, тем более точно можно определить эмпирические параметры a и n в уравнении $K_1 = ae^{-nE}$.

Поскольку испарение с водной поверхности является основой данного метода, на территории Европейской России выделены регионы с однотипными изменениями во времени величины испарения с водной поверхности [12] (рис. 4) (см., также [7, 13, 14]). Для каждого из этих регионов получены средние оценки изменения ис-

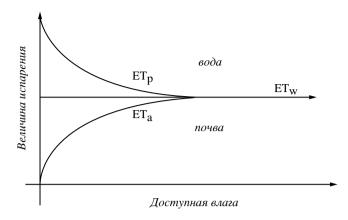


Рис. 3. Схема взаимодополняющего соотношения между испарением с водной поверхности и поверхности почвы из [21, 36].

Величина испарения, мм: ${\rm ET_p}-{\rm c}$ поверхности воды, ${\rm ET_a}-{\rm c}$ поверхности почвы, ${\rm ET_w}-{\rm при}$ неограниченных ресурсах влаги.

парения с поверхности почвы и осадков в тёплый период года (май-сентябрь) за весь доступный период наблюдений.

Для получения средних по территории данные наблюдений на отдельных станциях осреднялись в пределах выделенных регионов с использованием метода оптимального осреднения с нормировкой весов [8]. Это позволило исключить влияние неравномерности размещения станций.

Совпадение наблюдённых и восстановленных величин испарения до 1986 г. позволяет с достаточной степенью уверенности говорить о восстановлении основных закономерностей изменения величины испарения с поверхности почвы в последующие годы (рис. 5) с помощью предлагаемого метода.

Изменения испарения с почвы на Европейской территории России до 2010 гг. Анализ изменения величины испарения за весь период наблюдений (1966—2010 гг.) показал, что после достаточно интенсивного роста испарения до 1986 г. практически на всей территории Европейской России отмечается его падение в последующие годы (рис. 5, таблица). Интенсивность изменений восстановленного испарения с конца 1980-х гг. при этом меньше, чем в предшествующий период, что соответствует уменьшению межгодовой изменчивости и скорости изменений величины испарения с водной поверхности в эти годы.

Две разнонаправленные тенденции изменения величины испарения в первой и второй части периода наблюдений определяют её незначительные изменения в целом за весь анализируемый интервал (см. таблицу).

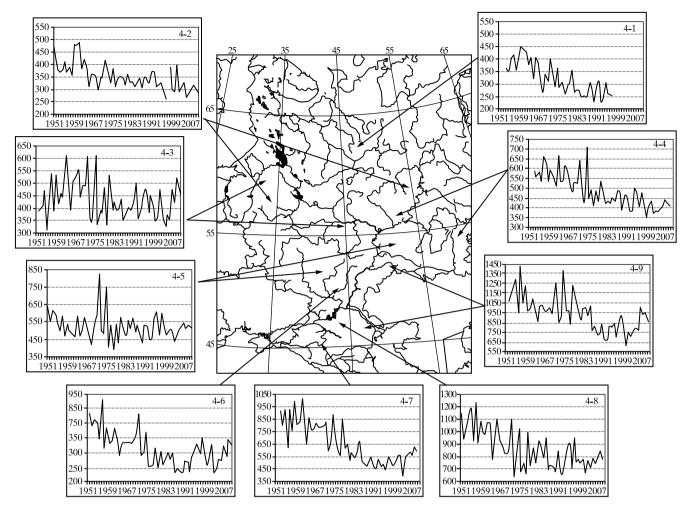


Рис. 4. Регионы с характерными особенностями изменения испарения с водной поверхности (мм) в разных частях Европейской территории России.

4—1 — таежная зона; 4—2 — восточная часть зоны южной тайги и зона смешанных лесов; 4—3 — западная часть зоны южной тайги и зона широколиственных лесов; 4—5 — лесостепная зона и район луговой степи; 4—6 — район типичных степей; 4—7 — район засушливых степей; 4—8 — район типичных и сухих степей; 4—9 — район сухих степей и зона полупустынь.

Однако в разных частях ETP эти изменения имеют свои особенности.

В таёжной зоне (регион 5–1, рис. 5) оценки изменения имеют ориентировочный характер, поскольку наблюдения здесь доступны только до 2000 г. Можно только отметить, что направленные изменения величины испарения до 2000 г. практически отсутствуют (см. рис. 5, таблица). При этом интенсивность роста испарении до 1986 г. превышает скорость и величину его уменьшения в последующие годы.

В зонах южной тайги и смешанных лесов (регионы 5-2, 5-4 на рис. 5) на фоне незначительного роста испарения за весь период наблюдений (1966-2010 гг.) после 1987 г. наблюдается уменьшение его величины (см. таблицу). При

этом в зоне южной тайги интенсивность роста величины испарения до 1986 г. превосходит скорость его уменьшения с конца 1980-х гг. (более выраженного в западной части зоны, чем на востоке). В западной части зоны смешанных лесов интенсивность изменений испарения в первой и второй частях периода (до 1986 г. и позднее) практически совпадает по величине, а на востоке зоны рост испарения до 1986 г. значительно превышает величину его падения в последующие десятилетия.

В обеих зонах отмечается увеличение межгодовой изменчивости величины испарения с 1990-х гг., что свидетельствует об относительно неустойчивом режиме увлажнения зоны южной тайги и зоны смешанных лесов (см. рис. 5).

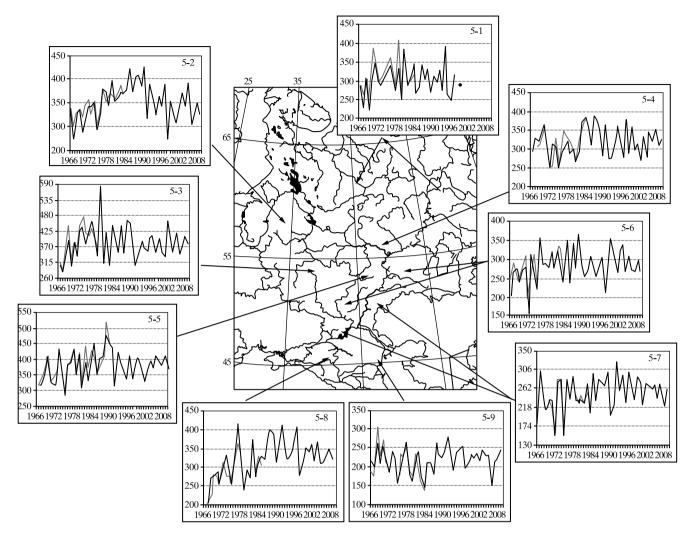


Рис. 5. Изменения наблюденного (серые кривые) и восстановленного испарения (черные кривые) с травяного растительного покрова (в мм) в разных частях Европейской территории России.

5–1 – таежная зона; 5–2 – западная часть зоны южной тайги и зоны смешанных лесов; 5–3 – западная часть зоны широколиственных лесов и зоны лесостепи; 5–4 – восточная часть зоны южной тайги и зоны смешанных лесов, зона широколиственных лесов; 5–5 – восток зоны широколиственных лесов, лесостепная зона и район луговой степи (до русла р. Волга); 5–6 – восточная часть лесостепной зоны и района луговых степей (район Заволжья) и зона типичных степей; 5–7 – южные и восточные районы типичных степей, регион засушливых и сухих степей; 5–8 – южная часть района засушливых и сухих степей и степи Предкавказья; 5–9 – зона полупустынь.

На основной части зоны широколиственных лесов (регион 5–4, рис. 5) рост величины испарения сохраняется на протяжении всего анализируемого периода (таблица). При этом основные особенности изменений испарения в течение всего периода и характер его межгодовой изменчивости во многом совпадают с изменениями испарения в восточной части южной таёжной зоны и зоны смешанных лесов (см. рис. 5). Изменения испарения на западе зоны широколиственных лесов (регион 5–3, рис. 5) имеют более сложный характер. В целом за весь период величина испарения несколько уменьшается (см. таблицу). Эта тенденция формируется главным образом

резким всплеском испарения в 1980-м г. и таким же быстрым падением его величины в течение следующего года (см. рис. 5). Причину такого всплеска величины испарения ещё предстоит выяснить. Однако если не принимать его во внимание, то с 1966 по 2010 г. величина испарения в этом регионе практически не меняется (параметр тренда 0.04 мм/год). В отличие от основной части зоны режим увлажнения здесь более устойчив, и величина межгодовой изменчивости на протяжении всего периода практически не меняется (см. рис. 5).

На востоке зоны широколиственных лесов, в лесостепной зоне и в регионе луговых степей

Таблица. Статистические характеристики изменения величины испарения с поверхности почвы в разных частях ETP

Регионы	Природные зоны	Весь период		Первая часть периода		Вторая часть периода	
		средн., мм	тренд, мм/год	средн., мм	тренд, мм/год	средн., мм	тренд, мм/год
1	Таёжная зона	313	-0.3	319	2.4		
2	Запад южной тайги	353	0.5	368	2.2	336	-1.7
	Запад зоны смешанных лесов	352	0.2	346	3.2	358	-3.4
3	Запад широколиственных лесов и лесостепи	389	-0.2	399	2.9	380	-0.8
4	Восток южной тайги и смешанных лесов	320	0.3	316	2.5	323	-0.9
	Зона широколиственных лесов	290	0.4	287	1.6	292	0.1
5	Восток широколиственных лесов и лесо-	384	0.5	388	4.2	379	0.04
	степь (до русла р. Волги)						
	Луговая степь (до русла р. Волги)	294	0.6	288	1.8	294	-0.2
6	Восток региона лесостепи (Заволжье)	276	0.6	270	3.9	281	-1.6
	Типичная степь	286	0.5	287	2.4	286	1.4
7	Восток региона типичных степей	250	1.0	237	1.5	261	0.03
	Юго-запад региона типичных степей	262	0.8	253	1.3	272	0.2
	Регион засушливых и сухих степей	232	0.4	227	0.2	237	-0.1
8	Южная часть региона засушливых и сухих	315	2.6	283	5.1	246	-2.0
	степей						
	Луговые степи Предкавказья	344	1.4	327	2.2	358	0.1
9	Полупустыни	217	0.2	209	-2.9	224	-0.9

Примечание: Оценки для первой части периода (1966–1986) получены по данным наблюдений. Для периода наблюдений в целом и для второй части периода (1987–2010) оценки получены с учётом восстановленных величин испарения.

(регионы 5-5, 5-6 на рис. 5) при незначительном увеличении испарения за весь период интенсивность роста его величины до 1986 г. в лесостепной зоне выше, чем для регионов, расположенных к северу (таблица). Однако если на востоке широколиственных лесов, на основной части зоны лесостепи и в зоне луговых степей (регион 5-5, рис. 5) после 1987 г. направленные изменения испарения практически отсутствуют, то в восточной части зоны (регион 5-6, рис. 5) отмечается достаточно заметное уменьшение его величины (таблица). Отличаются регионы и по характеру режима увлажнённости (см. рис. 5). На большей части территории (регион 5-5) межгодовая изменчивость после 1987 г. меньше, чем в предыдущий период, а в восточной части (регион 5-6) она мало меняется в продолжение всего периода (1966-2010 гг.).

Зона типичных степей (регионы 5-6, 5-7 на рис. 5) характеризуется сохранением роста величины испарения на протяжении всего исследуемого периода (таблица). При этом на основной территории зоны (регион 5-6) в целом за весь период рост величины испарения менее выражен,

чем на востоке и юге зоны (регион 5–7), хотя для каждой из выделенных частей периода интенсивность изменений испарения на основной части зоны выше, чем на окраинах (см. таблицу). Межгодовая изменчивость на большей части зоны мало меняется в течение всего периода, и только на юге и востоке зоны отмечается её уменьшение после 1989 г.

Изменения в зоне засушливых и сухих степей (регион 5–7, рис. 5) повторяют характер изменений на востоке и юге зоны типичных степей, но величина этих изменений меньше (таблица).

Юго-запад и южная часть района засушливых степей и регион степей Предкавказья (регион 5–8, рис. 5) характеризуются максимальным ростом величины испарения за весь период наблюдений (см. таблицу). При этом рост испарения до 1986 г. и его дальнейшее уменьшение более выражены в регионе засушливых и сухих степей, чем в районе степей Предкавказья (см. таблицу). На всей территории сохраняется общий характер межгодовой изменчивости: до 2000 г. величина изменчивости меняется мало, а в последнее десятилетие отмечается её заметное уменьшение (см. рис. 5).

Изменения величины испарения в зоне полупустынь (регион 5–9, рис. 5) в целом за весь период незначительны, но положительно направлены. При этом в обеих частях периода (до 1986 г. и в последующие годы) наблюдается отрицательный тренд его величины (см. таблицу). В этой зоне с 1984 по 1992 г. отмечаются быстрый рост величины испарения и формирование нового (более высокого) среднего (см. рис. 5), что и обуславливает общий положительный тренд величины испарения за весь период (1966–2010 гг.).

Таким образом, восстановленные ряды испарения до 2010 г. показывают незначительный рост его величины с 1966 г. практически на всей территории Европейской России. Максимальные изменения при этом отмечаются в зоне засушливых степей и степей Предкавказья. Только на западе зоны широколиственных лесов величина параметра линейного тренда испарения отрицательна. Однако эта тенденция характеризуется резким всплеском величины испарения в 1980 г., и при его отсутствии изменения испарения здесь также имеют незначительную положительную направленность.

Основные результаты и выводы. Данные натурных наблюдений позволяют выявить рост величины испарения с поверхности почвы с естественным травяным растительным покровом до 1986 г. практически на всей территории Европейской России.

Максимальный рост испарения отмечается в лесной зоне и в зоне лесостепи и луговой степи. В зоне сухих степей и полупустынь направленные изменения испарения практически отсутствуют. Проследить изменения величины испарения в последующие десятилетия не позволяет отсутствие доступных данных наблюдений.

Для восстановления основных закономерностей изменения величины испарения с поверхности травяного растительного покрова в разных частях ЕТР после 1986 г. использовались результаты исследований Р.Дж. Буше [21]. Его идея о взаимодополняющем соотношении двух видов испарения позволила разработать довольно простой метод оценки испарения с поверхности почвы по данным наблюдений за испарением с водной поверхности и осадкам.

Коэффициент соотношения двух видов испарения $E_{\text{почва}} = E_{\text{вода}} \cdot K_1$ хорошо описывается экспоненциальной зависимостью $K_1 = ae^{-n\tilde{E}}$, где \tilde{E} – видимое испарение, a и n – эмпирические параметры.

Данный метод позволяет получать наиболее достоверные результаты для некоторых выделен-

ных территорий. Повышению точности расчётных оценок величины испарения способствует дробность деления всего диапазона изменений величины видимого испарения для выделенной территории на отдельные части: чем уже интервал изменения величины испарения, тем более точно можно определить эмпирические параметры a и n в уравнении $K_1 = ae^{-n\hat{E}}$.

Совпадение изменений наблюдённых и восстановленных величин испарения до 1985 г. (см. рис. 5) позволяет говорить о реалистичности разработанного метода. Этот же вывод подтверждают изменения восстановленного испарения с травяного растительного покрова в последующие годы (см. рис. 5). С конца 1990-х гг. практически на всей территории Европейской России отмечается незначительный рост величины испарения с водной поверхности (см. [7, 12, 13, 14]), а испарение с поверхности почвы на анализируемой территории в этот же период несколько уменьшается или очень слабо увеличивается (см. таблицу).

Таким образом, гипотеза Буше [21] о взаимодополняющем соотношении двух видов испарения подтверждается данными натурных наблюдений.

Преимущество предложенного метода состоит в использовании ограниченного набора гидрометеорологических характеристик: осадков и испарения с водной поверхности. Наблюдения за осадками продолжаются на достаточном количестве станций. Данные по испарению с водной поверхности также доступны для основных природных зон и бассейнов крупных рек.

Именно наблюдения за испарением являются фактором ограничения применимости данного метода. В настоящий момент количество водноиспарительных станций приближается к критическому. Дальнейшее сокращение сети специализированных станций может привести к невозможности исследования изменений структуры водного баланса, а также показателей водообеспеченности территорий.

Благодарность. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 12-05-00859-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Будаговский А.И.* Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 243 с.
- 2. *Будыко М.И.* Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 136 с.
- 3. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 255 с.
- 4. *Будыко М.И.*, *Зубенок Л.И*. Определение испарения с поверхности суши // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1961. № 6. С. 3–17.

- 5. Голубев В.С., Вершинин А.П., Виноградов В.В. Перспективы усовершенствования методов измерения и расчёта испарения с водной поверхности и суши // Тр. ГГИ. 1961. Вып. 277. С. 3–21.
- 6. Голубев В.С., Лоримор Дж.Х., Гройсман П.Я., Сперанская Н.А., Журавин С.А., Менни М.Дж., Петерсон Т.К., Малон Р.В. Изменения испарения на территории бывшего Советского Союза и континентальной части Соединённых Штатов. Новые оценки // Изменения климата и их последствия / Под ред. Г.В. Менжулина. СПб.: Наука, 2002. С. 221–230.
- 7. Голубев В.С., Сперанская Н.А., Цыценко К.В. Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 89–99.
- 8. *Каган Р.Л.* Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 212 с.
- 9. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 561 с.
- 10. Крестовский О.И., Федоров С.Ф., Виноградов В.В. Определение декадных, месячных и сезонных величин испарения с поверхности водосборов и сельскохозяйственных полей // Матер. семинара по расчётам водного баланса речных бассейнов и организации комплексных воднобалансовых и агрометеорологических наблюдений. Валдай. 1966. С. 28–66.
- 11. *Логинов В.Ф., Волчек А.А.* Водный баланс речных водосборов Белоруссии. Минск: Тонпик, 2006. 160 с.
- 12. Сперанская Н.А. Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской территории России за последние 50 лет // Водные ресурсы. 2016. № 4.
- 13. *Сперанская Н.А.*, *Цыценко К.В.* Суммарное испарение в бассейне Дона и его изменчивость // Метеорология и гидрология. 2008. № 4. С. 89–100.
- 14. *Сперанская Н.А.*, *Цыценко К.В.* Суммарное испарение в бассейнах рек Северная и Западная Двина и его изменчивость // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 77–87.
- 15. *Старцева З.П.* Учёт теплопереноса в почве в модели суммарного испарения // Метеорология и гидрология. 1990. № 11. С. 93–100.
- 16. Стариева З.П. Исследование влияния почвенных и метеорологических характеристик на суммарное испарение с помощью модели влагопереноса в системе почва растительность атмосфера // Водные ресурсы. 1999. № 4. С. 438—445.
- 17. *Фёдоров С.Ф.* Испарение с леса и поля в различные по увлажнению годы // Тр. ГГИ. 1965. Вып. 123. С. 22–35.
- 18. *Харченко К.И.* Агроклиматические условия и испарение с сельскохозяйственных полей в степях Нижнего Дона // Тр. ГГИ. 1959. Вып. 71. С. 36–86.

- 19. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and Drainage Paper. 1998. No. 56. FAO, Rome, Italy. 300 p. (http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm).
- 20. Alvenäs G. and Jansson P.E. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis // Agric. Forest Meteorol. 1997. Vol. 88. Iss. 1–4. P. 47–56.
- 21. Bouchet R.J. Evapotranspiration reelle et potentielle, signification climatique // Symposium on Surface Waters. IAHS Publication. 1963. No. 62. P. 134–142.
- 22. *Brutsaert W.* Evaporation into the atmosphere. Theory, history and applications. L. 1982. 328 p.
- 23. *Brutsaert W. and Stricker H.* An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration // Water Resour. Res. 1979. Vol. 15. No. 2. P. 443–450.
- 24. Brutsaert W. and Parlange M.B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox // Nature. 1998. Vol. 396. P. 30. Doi: 10.1038/23845.
- 25. Choudhury B.J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model // J. Hydrol. 1999. Vol. 216. Iss. 1–2. P. 99–110. Doi:10.1016/S0022–1694(98)00293–5.
- 26. *Droogers P.* Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model // J. Hydrol. 2000. Vol. 229. Iss. 1–2. P. 50–58. Doi: 10.1016/S0022-1694(99)00198-5.
- 27. Gao G., Chen D., Xu C., and Simelton E. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002 // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D11120. Doi: 10.1029/2006JD008010.
- 28. Golubev V.S., Lawrimore J., Groisman P.Ya., Speranskaya N.A., Zhuravin S.A., Menne M.J., Peterson T.C., and Malone R.W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. P. 2665–2668.
- 29. *Granger R.J. and Gray D.M.* Evaporation from natural nonsaturated surfaces // J. Hydrol. 1989. Vol. 111. Iss. 1–4. P. 21–29.
- 30. *Hobbins M.T., Ramirez J.A., and Brown T.C.* The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: An enhanced advection-aridity model // Water Resour. Res. 2001a. Vol. 37. No. 5. P. 1389–1403.
- 31. *Hobbins M.T., Ramirez J.A., and Brown T.C.* Trends in regional evapotranspiration across the United States under complementary relationship hypotheses // Proceedings of Hydrology Days 2001 (April 2–5, 2001). Colorado, 2001b. P. 106–121.
- 32. *Hobbins M.T., Ramirez J.A., and Brown T.C.* Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L13503. Doi: 10/10029/2004GL019846.

- 33. *Hsuen-Chun Y.* A composite method for estimating annual actual evapotranspiration // Hydrol. Sci. J. 1988. Vol. 33. Iss. 4. P. 345–356. Doi: 10.1080/02626668809491258.
- 34. Liu S., Bai J., Jia Z., Jia L., Zhou H., and Lu L. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 14. No. 3. P. 573–584.
- 35. *Milly P.C.D. and Dunne K.A.* Trends in evaporation and surface cooling in the Mississippi River basin // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. No. 7. P. 1219–1222. Doi: 10.1029/2000GL012321.
- 36. *Morton F.I.* Potential evaporation and river basin evaporation // J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1965. Vol. 91. No. HY6. P. 67–97.
- 37. *Morton F.I.* Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology // J. Hydrol. 1983. Vol. 66. Iss. 1–4. P. 1–76.
- 38. *Ohmura A. and Wild M.* Is the hydrological cycle accelerating? // Science. 2002. Vol. 298. No. 5597. P. 1345–1346. Doi: 10.1126/science.1078972.
- 39. *Penman H.L.* Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc., Royal Soc. L. 1948. Ser. A. Iss. 193. P. 120–145.
- 40. Poulovassilis A., Anadranistakis M., Liakatas A., Alexandris S., and Kerkides P. Semi-empirical approach for estimating actual evapotranspiration in Greece // Agricultural Water Management. 2001. Vol. 51. No. 2. P. 143–152.
- 41. *Raghuwanshi N.S. and Wallender W.W.* Converting from pan evaporation to evapotranspiration // ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 1998. Vol. 124. No. 5. P. 275–277.
- 42. Ramhrez J.A., Hobbins M.T., and Brown T.C. Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis // Geophys. Res. Let. 2005. Vol. 32. L15401. Doi: 10.1029/2005GL023549.
- 43. Sentelhas P.C. and Folegatti M.V. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ETo) // Rev. bras. eng. agrнс. ambient. 2003. Vol.7. No. 1. P. 111–115. Doi: 10.1590/S1415–43662003000100018.
- 44. *Snyder R.L.* Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion // ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 1992. Vol. 118. No. 6. P. 977–980.

- 45. Sorman A.U. and Abdulrazzak M.J. Estimation of actual evaporation using precipitation and soil moisture records in arid climates // Hydrological Processes. 1994. Vol. 9. No. 7. P. 729–741.
- 46. Szilagyi J. On Bouchet's complementary hypothesis // J. Hydrol. 2001. Vol. 246. Iss. 1–4. P. 155–158.
- 47. *Szilagyi J.* On the inherent asymmetric nature of the complementary relationship of evaporation // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. L02405. Doi: 10.1029/2006GL028708.
- 48. *Thornthwaite C.W.* An approach toward a rational classification of climate // Geog. Review. 1948. Vol. 38. No. 1. P. 55–94.
- 49. Xinfa Qio, Zeng Yan, Miao Qilong, and Yu Qiang. Estimation of annual actual evapotranspiration from nonsaturated land surfaces with conventional meteorological data // Science in China. Ser. D Earth Sciences. 2004. Vol. 47. No. 3. P. 239–246.
- 50. Xu C-Y., Gong L., Tong J., and Chen D. Decreasing reference evapotranspiration in a warming climate a case of Changjiang (Yangtze) river catchment during 1970–2000 // Advances in Atmosph. Sci. 2006. Vol. 23. No. 4. P. 513–520. Doi: 10.1007/s00376-006-0513-4.
- 51. Xu X. and Yang D. Analysis of catchment evapotranspiration at different scales using bottom-up and top-down approaches // Front. Archit. Civ. Eng. China. 2010. Vol. 4. No. 1. P. 65–77.
- 52. Yang H., Yang D., Cong Z., and Lei Z. Analysis of the dominant climatic factors of evaporation change over the main basins in mainland China based on Budyko and Bouchet hypotheses // Hydrological Modelling and Integrated Water Resources Management in Ungauged Mountainous Watersheds. Proceedings of a symposium held at Chengdu, China (November 2008). IAHS Publ. 335. 2009. P. 111–115.
- 53. Zhang X., Ren Y., Yin Z.-Y., Lin Z., and Zheng D. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971–2004 // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D15105. Doi: 10.1029/2009JD011753.
- 54. Zhang Y., Liu C., Tang Y., and Yang Y. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D12110. Doi: 10.1029/2006JD008161.

60 СПЕРАНСКАЯ

Actual Evaporation from Natural Green Land over European Russia: Available Observations and Restored Data

N.A. Speranskaya

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia e-mail: speran@mail.rcom.ru

Analysis of changes in actual evaporation from natural green land from 1960 to 1986 is carried out for the European territory of Russia. Regions of specific changes in evaporation value are selected. It is shown that evaporation increase is observed over the whole territory under the study. Evaporation increase intensity is maximal in the forest zone and in the meadow steppe zone. Actual evaporation changes from 1987 are assessed using observations on pan evaporation and precipitation for the warm season of the year. It is shown that suggested empirical method allows to obtain sufficiently realistic estimates of actual evaporation from natural green land at least for the warm season. Analysis of observed and restored actual evaporation showed that small increase of its values from 1966 to 2010 is observed over European Russia despite its little decrease from 1987.

Keywords: actual evaporation, pan evaporation, method for evaporation assessment, evaporation changes over the European Russian territory.

doi: 10.15356/0373-2444-2016-2-49-60