DOI: 10.21513/2410-8758-2017-3-103-121 УДК 556.132.6

ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЛАГООБОРОТА СУШИ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Н.А. Сперанская[*], *К.В. Цыценко*

Государственный гидрологический институт,
Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, 2-ая линия, 23; [*]*speran@mail.rcom.ru*

Резюме. В статье рассмотрены основные закономерности изменения двух элементов влагооборота суши – осадков и испарения – для водосборов основных рек Европейской части России (ЕЧР). Показано, что на фоне общего роста осадков на ЕЧР в 1966 - 2010 гг., к югу от зоны широколиственных лесов с начала 2000-х годов формируется тренд к их уменьшению. Анализ полученных оценок суммарного испарения с поверхности речных бассейнов показал, что в таежной зоне, по крайней мере до 2000-х годов, годовое испарение уменьшается. Начиная с зоны оптимального увлажнения (зона широколиственных лесов) и к югу от нее, со второй половины 1990-х годов отмечается рост суммарного испарения с суши. Этот эффект усиливается по мере продвижения к югу ЕЧР. Сделан вывод, что при оценке испарения с территории бассейна необходимо учитывать различные виды ландшафтов на его территории и значения испарения с них. Показано, что изменения этих двух составляющих влагооборота – осадков и испарения – обусловили наблюдаемые изменения речного стока: на севере ЕЧР годовой сток растет, в южной части – уменьшается.

Ключевые слова. Элементы влагооборота суши, годовые осадки, суммарное испарение, речные водосборы.

CHANGES IN THE MAIN ELEMENTS OF TERRESTRIAL WATER CYCLE OVER THE EUROPEAN RUSSIA

N.A. Speranskaya[*], *K.V. Tsytsenko*

State Hydrological Institute,
23, 2nd Line, 199053, St.-Petersburg, Russia; [*]*speran@mail.rcom.ru*

Summary. The major patterns of changes in two elements of terrestrial water cycle, precipitation and actual evapotranspiration, for drainage basins of the main rivers of European Russia are described in the paper. It is shown that, against the background of common precipitation increase over European Russia in 1966 – 2010, its downward trend begins to form to the south of the broadleaved forest zone from the beginning of 2000s. Analysis of the estimates of actual evapotranspiration obtained from the various drainage basins indicates that its annual value in the taiga zone was decreasing at least until the beginning of 2000s. In the second part of 1990s, the actual evapotranspiration was increasing within the zone of sufficient

moistening, i. e., over the broadleaved forest zone, and southward. This effect is becoming stronger towards the European Russia south. It was concluded that various types of landscape and respective evaporation rates should be taken into account in assessments of the actual evapotranspiration from a drainage basin. It is shown that changes in those two elements of terrestrial water cycle, i.e., precipitation and evapotranspiration, have determined the observed changes in the river runoff: an increase in the north of European Russia and a decrease in its southern part.

Keywords. Elements of the terrestrial water cycle, annual precipitation, actual evapotranspiration, drainagebasins.

Введение

Влагооборот – важная составная часть механизма взаимодействия между компонентами экосистем и между самими экосистемами. Его можно определить как одно из главных функциональных звеньев ландшафта. Запас обращающейся на поверхности суши влаги пополняется в основном атмосферными осадками, часть которых испаряется как с поверхности растительного покрова, так и с поверхности почвы. Соотношение величины осадков и суммарного испарения и взаимодействие этих разнонаправленных процессов во многом определяет интенсивность влагооборота в пределах природной экосистемы, речного водосбора или выделенной территории.

Количественно влагооборот характеризуется водным балансом, приходная часть которого в основном формируется за счет осадков, а испарение характеризует один из его расходных элементов.

Проблема оценки водного баланса речных водосборов и крупных территорий давно привлекает внимание ученых. В настоящее время подробно исследованы атмосферные осадки, поскольку довольно густая сеть наземных осадкомерных станций позволяет использовать данные натурных наблюдений.

Исследованию закономерностей изменения осадков как по территории Европейской части России, так и во времени посвящено большое количество работ (следует упомянуть из последних Груза и др., 2001; Groisman, Rankova, 2001; Мещерская и др., 2004). Изучены также особенности характера экстремальных осадков на ЕЧР (Bulygina et al., 2007; Золина, Булыгина, 2016).

Для оценки величины испарения до сих пор используются различные модельные подходы, поскольку ограниченное количество данных прямых наблюдений за испарением значительно затрудняет получение региональных и глобальных выводов об изменении этого элемента влагооборота. Именно поэтому проблема оценки величины испарения каждым исследователем рассматривается по-разному. В некоторых публикациях (Водные ресурсы…, 1967; Коронкевич, 1990; Walter et al., 2004 и др.) величина испарения оценивается как остаточный член водного баланса. В других работах для его расчета используются различные модели на основе теплового баланса суши (Choudhury, 1999; Droogers, 2000; Xu et al. 2006; Zhang et al., 2007) или ее водного баланса (Frank, Inouye, 1994; Milly, Dunne, 2001; Gao et al., 2007).

Нередко для оценки испарения используются полуэмпирические модели, основанные на его зависимости от различных факторов природной среды (Kondo et al., 1990; Sorman, Abdulrazzak, 1994; Шлычков, 2004 и др.).

В последние десятилетия XX века достаточно большое распространение получил метод оценки величины испарения с суши на основе наблюдений за испарением с водной поверхности (Kristensen, Jensen, 1975; Poulovassilis et al., 2001; Xinfa et al., 2004; Khoob et al., 2007 и др.). Впервые предположение о существовании связи этих двух видов испарения было высказано в работе Буше (Bouchet, 1963) и развито в (Morton, 1965): падение испарения с поверхности суши при достаточном количестве доступной влаги компенсируется ростом испарения с поверхности воды. В условиях же повышенного увлажнения величина обоих видов испарения становится одинаковой.

В развитие гипотезы Буше было разработано большое количество моделей, результаты которых подтвердили ее реалистичность для разных временных интервалов и различных по площади территорий (Allen et al., 1998; Szilagyi et al., 2001; Hobbins et al., 2001; Ramírez et al., 2005; Yang et al., 2009; Liu et al., 2010).

Именно такой подход использовался при оценке величины испарения с суши для основных водосборов ЕЧР в данной работе.

Исследуемые водосборы и метод анализа

Характеристика анализируемых водосборов

Территория бассейна **Северной Двины** (рис.1) расположена в основном в зоне южной тайги с преобладанием хвойных лесов с примесью мелколиственных пород. Северная Двина – типичная равнинная река с естественным режимом стока.

Бассейн **Печоры** (рис. 1) находится в зоне тайги, лесотундры и тундры. В верхнем течение река носит горный характер, который сменяется равнинным в среднем и нижнем течении. Режим стока р. Печора естественный.

Бассейн **Невы** (рис.1) располагается на юго-западе зоны южной тайги. В верховьях бассейна преобладают хвойные леса, сменяемые смешанными в его средней части. Открытая водная поверхность (включая Ладожское и Онежское озера) занимает около 14 % территории водосбора, болота – примерно 17 %. К бассейну р. Нева относится также водосбор р. Вуокса с оз. Большая Сайма, значительная часть которого расположена на территории Финляндии. Естественный режим стока реки частично зарегулирован водохранилищами ГЭС на ее притоках.

Бассейн **Западной Двины** (рис. 1) находится в основном в зонах южной тайги и смешанных лесов. Озера занимают порядка 3 % бассейна, болота и заболоченные территории – чуть менее 16 %. Западная Двина – типичная равнинная река, водосбор которой в основном располагается за пределами России на территории Белоруссии и Латвии. На территории Латвии режим стока реки зарегулирован каскадом водохранилищ ГЭС.

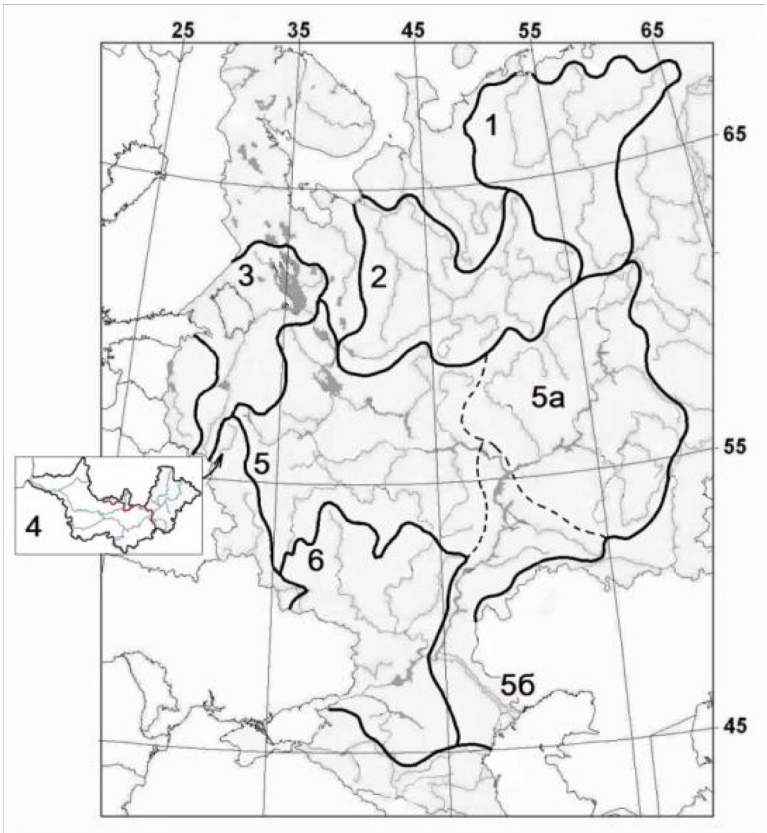

Рисунок 1. Расположение исследуемых водосборов основных рек ЕЧР
1 - р. Печора, 2 - р. Северная Двина, 3 - р. Нева, 4 - р. Западная Двина, 5 (5а, 5б) - р. Волга, 6 - р. Дон

Бассейн **Волги** (рис. 1) охватывает практически все природные зоны ЕЧР: от зоны южной тайги до полупустыни. Волга – типичная равнинная река, а ее естественный сток полностью зарегулирован каскадом водохранилищ ГЭС.

Поскольку площадь бассейна р. Волга занимает слишком обширную территорию, для более точной оценки испарения водосбор был разделен на три участка:

– Верхняя Волга – до г Чебоксары (**Волга-1**) (регион 5 на рис. 1),

– Среднее и Нижнее Поволжье – от г Чебоксары до Каспия (**Волга-2**) (регион 5б на рис. 1) и

– бассейн р. Кама до Куйбышевского водохранилища (**Кама**) (регион 5а на рис. 1).

Бассейн **Дона** (рис. 1) полностью расположен в лесостепной и степной зонах. Дон – типичная равнинная река со стоком, зарегулированным каскадом водохранилищ. Русло р. Дон соединено с руслом р. Волга искусственным каналом, который питается Донской водой. Примерно 13% площади Донского бассейна принадлежит Украине (водосбор р. Северский Донец – правого притока р. Дон).

Метод оценки суммарного испарения.

Обоснование предлагаемого метода оценки суммарного испарения по бассейну и его подробное описание даны в предыдущих работах (Голубев и др., 2002, 2003). Он основан на предположении, сформулированном в (Bouchet, 1963; Morton, 1965), что между испарением с поверхности воды и испарением с поверхности суши существует взаимодополняющее соотношение.

В данной работе зависимость между испарением с поверхности воды и испарением с поверхности почвы рассматривается как переменная функция:

$$E_{почва} / E_{вода} = f (E_{вода} - P) \quad (1)$$

где $E_{почва}$ – испарение с залежи (луга), $E_{вода}$ – испарение с поверхности воды, P – осадки.

Разность между испарением с поверхности воды и осадками, выпавшими за тот же период ($E_{вода} - P$) или видимое испарение, характеризует непосредственно не только фактическое испарение с водной поверхности, но и является косвенным показателем затрат энергетических ресурсов в процессе испарения с суши и позволяет оценить ресурсы избыточной влаги в регионе (см. подробно в Сперанская, 2016).

Испарение с естественного травяного покрова в рамках данного подхода рассчитывалось как:

$$E_{почва} = E_{вода} \text{ x } K_1 \quad (2)$$

когда коэффициент K_1 описывается экспоненциальным уравнением вида, $K_1=ae^{-nx}$, где x – видимое испарение, a и n – эмпирические коэффициенты.

Для оценки испарения с сельскохозяйственных полей вводится дополнительный коэффициент, характеризующий соотношение испарения с естественной травяной растительности и с различных видов сельхозкультур (Голубев и др., 2002, 2003).

Исходя из указанных зависимостей, можно рассчитать величину испарения с различных типов сельскохозяйственных угодий за каждый месяц теплого периода года, основываясь на результатах режимных наблюдений за испарением с поверхности естественного травяного покрова, водной поверхности и атмосферными осадками (Голубев и др., 2003; Сперанская, Цыценко, 2008, 2013).

Испарение с леса, который занимает значительную часть ЕЧР, оценивалось по методике, изложенной в (Голубев, Цыценко, 1995). Суть ее заключается в привязке испарения с леса к испарению с открытой водной поверхности и в учете величины альбедо водной поверхности и леса (Голубев и др., 2003; Сперанская, Цыценко, 2008, 2013). Величина альбедо с водной поверхности принималась в исследовании равной 5%. Для хвойных и лиственных лесов использовались разные значения альбедо в соответствии с (Пивоварова, 1977; Альбедо…, 1981), величина которого зависит от конкретного месяца года и отличается для разных частей Европейской территории России.

Испарение с низинных и верховых болот, занимающих довольно значительную территорию в зоне избыточного и достаточного увлажнения, оценивалось в соответствии с (Романов, 1961, 1962; Крестовский, Книзе, 1993): испарение с низинных и верховых болот принималось равным испарению с луга ($E_{почвы}$) с поправкой на широтную составляющую из (Романов, 1961, 1962).

Для месяцев с отрицательными температурами воздуха испарение со всех типов подстилающей поверхности (за исключением лесопокрытых площадей) определялось расчетным путем по упрощенной формуле П.П.Кузьмина (Кузьмин, 1953), учитывающей величину дефицита влажности воздуха.

Доступные данные наблюдений

В работе использованы данные стандартных режимных наблюдений за испарением с водной поверхности и поверхности суши для теплого периода года (май-сентябрь) и месячными осадками.

Для получения средних по территории временных рядов исследуемых элементов данные наблюдений на отдельных станциях осреднялись в пределах выделенных водосборов с использованием метода оптимального осреднения с нормировкой весов (Каган, 1979). Такое осреднение позволяет уменьшить влияние неравномерности размещения наблюдательных станций.

Испарение с водной поверхности

В работе использованы данные о суммарном за теплый период года (май-сентябрь) испарении для 49 станций на ЕЧР с 1965 по 2010 год. К анализу дополнительно привлекались материалы наблюдений еще для 83 станций как на территории России, так и в Белоруссии и Латвии, имеющие более короткие ряды наблюдений (до 1995/2000 гг.).

Испарение с поверхности почвы

Данные наблюдений за испарением с поверхности почвы после середины 1990-х годов практически недоступны даже для немногочисленных станций, продолжающих работу до настоящего времени. Поэтому в настоящей работе использованы сведения о суммарном за теплый период (май-сентябрь) испарении по 81 станции с данными наблюдений с 1960-х до 1990/1994 гг. на Европейской территории России, Белоруссии и Латвии.

Атмосферные осадки

В работе использовались данные о месячных суммах осадков из архива, подготовленного во ВНИИГМИ-МЦД (http://meteo.ru/data/). К анализу привлекались данные немногим более 250 станций на ЕЧР с 1966 по 2010 г. Данные по осадкам на территории Белоруссии и Латвии заимствовались из опубликованных справочников.

Материалы по осадкам до 1966 года не принимались во внимание, поскольку в наблюдениях за ними, по крайней мере, трижды была нарушена

однородность рядов (http://meteo.ru/data/). Связано это было с: 1) массовым переносом станций на открытые места в 1930-е годы, 2) заменой дождемеров Нифера осадкомерами с защитой Третьякова в начале 1950-х годов, 3) началом введения поправок на смачивание непосредственно на станциях с января 1966 г.

После 1966 года никаких изменений в методиках измерений и обработки не происходило, поэтому ряды сумм осадков можно считать однородными (http://meteo.ru/data/).

Элементы подстилающей поверхности

Подстилающая поверхность водосборов подразделялась на территории, занятые сельскохозяйственными угодьями, лесами, водной поверхностью и болотами (см. подробнее в Голубев и др., 2003; Сперанская, Цыценко, 2008, 2013). При этом земли сельхозназначения дополнительно подразделялись на участки с естественным растительным покровом (пастбища, сенокосы, целина, пар) и земли, занятые посевами различных сельхозкультур. При оценке лесопокрытых площадей не принимались в расчет нелесные участки (болота, пастбища, сенокосы), необлесенные вырубки, гари, редины, просеки и т.п.

Для Европейской территории России, Белоруссии и Латвии было использовано свыше 300 источников различного типа, а после 1991 года – и материалы, доступные в Интернете. Динамика различных типов подстилающей поверхности оценивалась путем интерполяции между «реперными» годами, для которых удалось найти опубликованные данные (рис. 2).

Изменение структуры подстилающей поверхности происходило под влиянием преимущественно антропогенных факторов. Так, резкое увеличение площади открытой водной поверхности во второй половине XX века в бассейнах Волги и Дона (с 536 до 2848 тыс. га в бассейне Волги и с 134 до 536 тыс. га в бассейне Дона) связано со строительством каскада водохранилищ на этих реках.

Социально-экономические процессы, происходящие в 1990-е годы, привели к упадку сельского хозяйства, что проявилось в уменьшении земель сельскохозяйственного назначения. Часть территорий, выведенных из сельскохозяйственного оборота, стала зарастать кустарником и лесом. Поэтому на протяжении всего рассматриваемого периода повсеместно отмечается рост лесопокрытых площадей (рис. 2, табл. 1). Наибольшее увеличение лесистости за рассматриваемый период наблюдается при этом в бассейнах рек Нева и Западная Двина и в бассейне Волга-1 (примерно на 18 %). Увеличение лесистости на Дону и в низовьях Волги (Волга-2) в некоторой степени связано с искусственными лесопосадками.

Для земель сельхозназначения в целом за исследуемый период (1965-2010 гг.) характерно уменьшение площадей, несмотря на их незначительный рост со второй половины 1990-х годов. Самое значительное уменьшение (свыше 40 %) прослеживается на севере и северо-западе ЕЧР: бассейны рек Печора, Северная Двина, Нева (см. табл. 1). В низовьях р. Волги (бассейн Волга-2) и для водосбора р. Дон площади сельхозназначения практически не меняются (см. табл. 1).

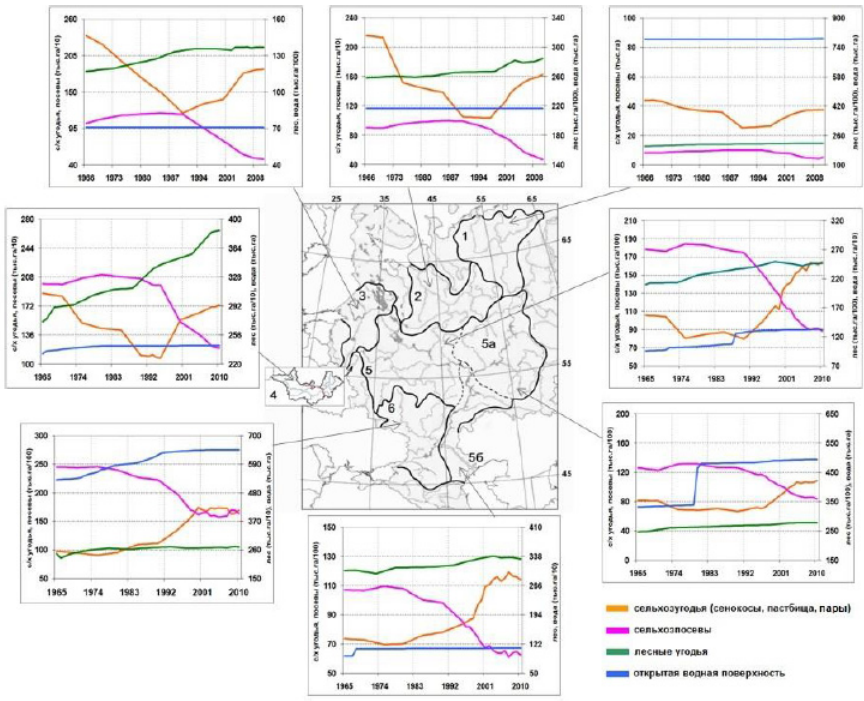

Рисунок 2. Изменение элементов ландшафта в бассейнах крупных рек ЕЧР
1 - р. Печора,2 - р. Северная Двина, 3 - р. Нева, 4 - р. Западная Двина, 5 - Волга-1, 5а - р. Кама, 5б - Волга-2, 6 - р. Дон

В бассейнах рек Печора, Северная Двина, Нева и Западная Двина отмечается уменьшение площадей участков с естественным растительным покровом (пастбища, сенокосы, целина, пар) на 25-40 % (рис. 2). В то время, как для остальных водосборов характерно их увеличение на 60-80 % (рис. 2). Во многом это объясняется ростом площадей паров (в 4-6 раз) и пастбищ, вклад которых в начальном периоде был несущественным. Для всех исследуемых бассейнов отмечается также значительное уменьшение площадей, занятых под посевы сельхозкультур (до 40-50 %), максимально выраженное начиная с 1990-х годов после некоторого увеличения их площадей в первой половине рассматриваемого периода (рис. 2). В современных условиях на ЕЧР не используется до 30-40 % пахотных земель.

Разнонаправленные изменения площадей участков с естественным растительным покровом и земель, занятых посевами различных сельхозкультур (рис. 2), объясняют относительно небольшие изменения земель сельхозназначения в целом на большей части ЕЧР.

Основные полученные результаты

Изменения осадков в бассейнах основных рек ЕЧР

На всей территории Европейской части России отмечается рост годовых осадков (рис. 3), особенно заметный после некоторого их уменьшения до

середины 1970-х годов. Однако в разных природных зонах ЕЧР изменения осадков имеют свои особенности.

На севере ЕЧР (бассейны рек Северная Двина и Печора) после уменьшения осадков с 1966 до 1976 года отмечается их резкий рост в течение двух лет. Затем, в продолжении достаточно длительного периода (почти до конца 1990-х годов), направленные изменения осадков практически не наблюдались (рис. 3). С начала 2000-х годов отмечается довольно интенсивное увеличение годовых величин осадков: 70 мм в бассейне Печора и 99 мм в бассейне Северной Двины.

В западной части рассматриваемой территории (бассейны рек Нева и Западная Двина) уменьшение количества осадков с 1966 по 1971 г. сменяется их увеличением до начала 1990-х годов. При этом в бассейне Западной Двины рост осадков более интенсивен, чем для бассейна Невы (рис. 3). До 1996 года в обоих бассейнах наблюдается довольно существенное уменьшение годовых осадков (более 100 мм), а затем их резкий подъем в течение двух последующих лет (1997-1998 гг.). К сожалению, после 2006 года осадки для зарубежной части водосбора Западной Двины отсутствуют. В бассейне Невы с начала 2000-х годов величина годовых осадков снова увеличивается (на 56 мм). И, поскольку характер изменения осадков в двух бассейнах в течение многих лет был подобен, можно предположить, что и в бассейне Западной Двины осадки с начала XXI столетия также увеличиваются к 2010 году.

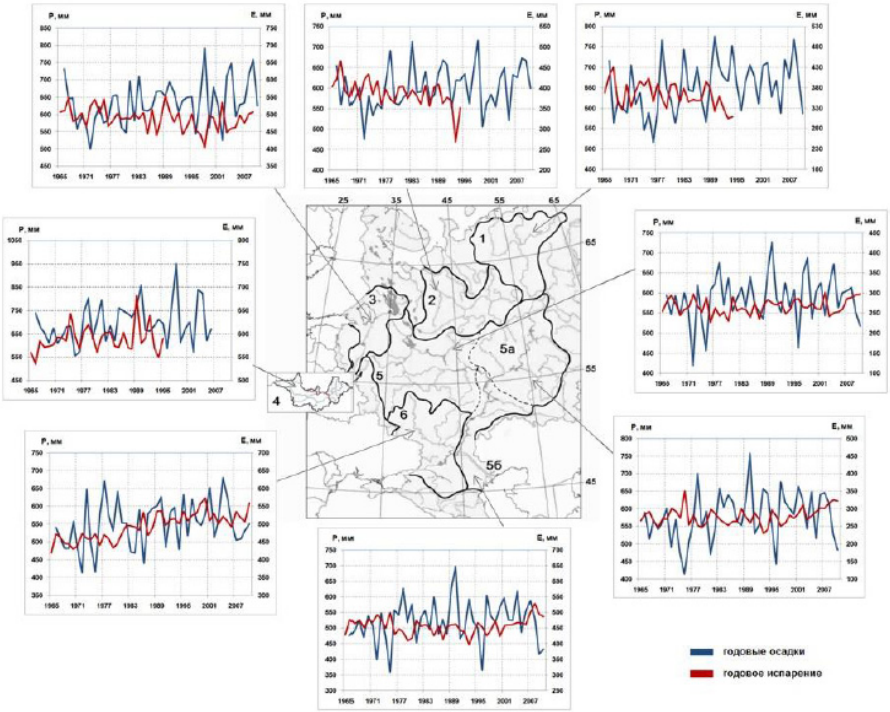

Рисунок 3. Изменения годовых осадков и суммарного испарения с поверхности водосбора для основных рек ЕЧР

1 - р. Печора, 2 - р. Северная Двина, 3 - р. Нева, 4 - р. Западная Двина, 5 - Волга-1, 5а - р. Кама, 5б - Волга-2, 6 - р. Дон

На основной части Европейской равнины (бассейны Волга-1 и р. Кама) направленное уменьшение годовых осадков до середины 1970-х годов отсутствует (рис. 3). Небольшие по величине осадки в 1972 и 1975 годах соответствуют интенсивным засухам на ЕЧР. В обоих бассейнах с 1976 г. прослеживается рост осадков до 1990 года и их резкое уменьшение (ниже 480 мм) к 1996 году. После интенсивного роста годовых осадков в конце 1990-х годов (1997-1999 гг.) в обоих бассейнах отмечается уменьшение их величины к 2010 году: на 64 мм в бассейне Волга-1 и почти на 80 мм в бассейне р. Кама. Рост осадков на этой части ЕЧР с 1966 по 2010 год минимален по сравнению с остальными бассейнами.

На юге ЕЧР изменения годовых осадков в бассейнах Волга-2 и р. Дон различаются довольно существенно (рис. 3).

В бассейне Дона отмечается устойчивый рост осадков (рис. 3) на протяжении всего периода на фоне их большой межгодовой изменчивости. Так же, как в бассейнах, расположенных севернее, малая величина осадков в 1972 и 1975 годах совпадает с интенсивными засухами на ЕЧР. Увеличение осадков к 1990 году прерывается их резким падением в 1991 году. Новый рост годовых осадков с 1992 по 2004 год более интенсивен, чем в предыдущий период (78 мм за 14 лет по сравнению с 76 мм за 25 предыдущих лет). После 2004 г. в бассейне отмечается уменьшение величины осадков более, чем на 100 мм.

В бассейне Волга-2 отчетливо выделяются два периода изменения осадков (рис. 3). На фоне роста осадков на 100 мм до 1990 года отчетливо выделяются годы их понижения: 1972 и 1975 (годы засух), период 1978-1986 гг. (уменьшение на 60 мм). После резкого падения величины осадков в 1991 году снова отмечается их увеличение, но менее значительное. Так же, как и в бассейне Дона, здесь наблюдается снижение величины осадков с 2004 до 2010 года более, чем на 100 мм.

Таким образом, на фоне общего роста величины годовых осадков на всей территории Европейской части России за прошедшие 50 лет, в регионах, расположенных в зоне оптимального увлажнения (зона широколиственных лесов) и к югу от этой зоны, с начала 2000-х годов наблюдается формирование тенденции к их уменьшению.

Изменения суммарного испарения в бассейнах основных рек ЕЧР

На основе разработанного метода были получены оценки годовых величин суммарного испарения для всех рассматриваемых бассейнов (рис. 3 и табл.1).

В бассейнах северных рек (Печора, Северная Двина) изменения величины суммарного испарения удалось оценить только до начала 1990-х годов, поскольку в 1995 году наблюдения за испарением были прекращены. Однако некоторые общие выводы сделать все-таки удается. Для обоих бассейнов отчетливо проявляется уменьшение величины годового испарения с поверхности суши с 1966 по 1994 год на 67 мм для бассейна Северной Двины и на 51 мм для бассейна Печоры. При этом до 1976 года наблюдалось достаточно заметное уменьшение испарения. В течение последующих 10 лет (до конца

1980-х) направленные изменения величины испарения практически отсутствовали в обоих бассейнах. Максимальное падение испарения отмечается с начала 1990-х годов: более, чем на 100 мм в бассейне Северной Двины и на 73 мм в бассейне Печоры.

В бассейне р. Нева наблюдения за испарением имеются до 2007 г., а в бассейне р. Западная Двина – только до 1994 г. Несмотря на такое различие доступных данных наблюдений характер изменения годовой величины испарения с суши на западе ЕЧР выявляется достаточно надежно для обоих бассейнов.

Изменения суммарного испарения бассейнах рек Нева и Западная Двина имеют различный характер (рис. 3, табл. 1). В бассейне Невы в целом за весь период отмечается уменьшение испарения почти на 46 мм. При этом до 1998 года наблюдается устойчивое падение величины испарения (более 55 мм), которое сменяется его явно выраженным ростом (почти на 29 мм с 1999 по 2007 год).

Изменения величины испарения в бассейне Западной Двины менее выражены и противоположны по тенденции изменениям на водосборе р. Нева (рис. 3). В целом за период наблюдений (1966-1994 гг.) испарение здесь выросло более, чем на 26 мм (табл. 1). При этом увеличение испарения до середины 1970-х годов составляет более 70 мм, а затем до середины 1980-х направленные изменения отсутствуют. Последующий рост величины испарения до 1992 ненамного превышает 28 мм. С 1992 года достаточно явно прослеживается тренд к уменьшению величины суммарного испарения (почти на 70 мм). К сожалению, делать выводы о продолжении этого тренда невозможно из-за отсутствия доступных данных наблюдений.

При этом для обоих бассейнов характерно резкое повышение величины испарения с суши в 1989 году, когда на фоне повышенной температуры воздуха отмечались обильные осадки.

Изменения годового испарения с суши в бассейнах Волга-1 и р. Кама имеют сходный характер как по величине межгодовой изменчивости, так и по тенденции (рис. 3, табл. 1). Отличие наблюдается только в последние годы (с 2003 г.). Благодаря этому в бассейне Волга-1 в целом за весь период (1966-2010 гг.) направленные изменения суммарного испарения с суши незначительны (почти 12 мм), а в бассейне Камы наблюдается рост его величины (немногим более 20 мм). В обоих бассейнах до 1980 г. отмечается уменьшение величины испарения на 30 мм в бассейне Волга-1 и на 20 мм в бассейне Камы. В продолжении последующих 14 лет направленные изменения величины испарения не очень заметны. Со второй половины 1990-х годов прослеживается рост годового испарения с суши как в бассейне Волга-1, так и в бассейне Камы. Изменения испарения в бассейне Камы (64 мм) при этом более интенсивны, чем в бассейне Волга-1 (17 мм).

В южной части ЕЧР (бассейны р. Дон и Волга-2) характер изменения испарения отличается от остальной территории. В обоих бассейнах в целом за весь период (1966-2010 гг.) наблюдается рост величины суммарного испарения с суши: на 13 мм в бассейне Волга-2 и на 94 мм в бассейне р. Дон (рис. 3, табл. 1). При этом в бассейне Волга-2 рост испарения (на 30 мм) до 1975 г.

сменяется его некоторым уменьшением (немного менее 20 мм) до 1993 г. С 1994 года в бассейне отмечается интенсивный рост испарения (почти 77 мм).

В бассейне р. Дон рост величины испарения характерен для всего рассматриваемого периода. Однако интенсивность этих изменений различна: с 1966 по 1981 год испарение увеличилось всего на 14 мм, с 1982 по 2000 год - более, чем на 60 мм. С начала 2000-х годов здесь отмечается даже некоторое уменьшение величины испарения (на 18 мм).

В целом, в зоне избыточного увлажнения (бассейны Печоры, Северной Двины, Невы и, по всей вероятности, в бассейне Западной Двины) величина годового испарения с поверхности суши уменьшается на протяжении всего анализируемого периода (рис. 3). Этот вывод несколько условен, поскольку после 2000-х годов данные доступны только для бассейна р. Нева.

В зоне оптимального и достаточного увлажнения (бассейны Волга-1 и р. Кама) направленные изменения испарения за прошедший период минимальны. Только с начала 2000-х годов отмечается некоторый рост его величины (рис. 3).

В зоне недостаточного увлажнения (бассейны Волга-2, р. Дон) в течение всего периода отмечается рост суммарного годового испарения, наиболее заметный с 1990-х годов (рис. 3).

Таким образом, начиная с зоны оптимального увлажнения (зона широколиственных лесов) и к югу от нее со второй половины 1990-х годов отмечается рост суммарного испарения с суши. Величина этого роста и его интенсивность увеличиваются по мере продвижения на юг ЕЧР.

Вклад в суммарное испарение различных элементов ландшафта

Величина суммарного испарения по бассейну определяется вкладом испарения с различных элементов его ландшафта.

В бассейнах Печоры и Северной Двины основной вклад в величину испарения вносят лесопокрытые территории (рис. 4). В бассейне Печоры дополнительное (достаточно значительное) влияние оказывают заболоченные территории (включая тундру) общая площадь которых составляет здесь свыше 74 тыс. км^2. Несмотря на интенсивные изменения испарения с сельскохозяйственных земель в бассейнах Северной Двины и Печоры, их вклад в величину суммарного испарения по бассейну невелик, поскольку площадь этих земель мала и значительно сократилась к 1994 году (рис. 4, табл. 1).

В бассейне Невы вклад испарения с лесных территорий, озер и болот (рис. 4) в суммарное испарение практически сопоставим по величине. Однако общее уменьшение испарения с суши в бассейне определяется интенсивными изменениями испарения с земель сельхозназначения (-26 мм) и заболоченных земель (-23 мм) на фоне сокращения их площадей (табл. 1). Несмотря на рост лесопокрытых площадей изменения величины испарения для них незначительны (табл. 1).

В бассейне Западной Двины величину суммарного испарения определяет испарение с сельхозугодий (рис. 4, табл. 1): испарение незначительно растет

(на 31 мм) несмотря на уменьшение их площадей. Оно же определяет и тенденцию испарения в целом по бассейну. Уменьшение испарения с лесопокрытых территорий (-12 мм) на фоне роста их площадей несколько ослабляет влияние испарения с сельхозугодий, однако его вклад в испарение для бассейна в целом почти в два раза меньше. Вклад испарения с заболоченных земель и с поверхности водоемов мал по величине и не оказывает влияние на формирование тенденции испарения по бассейну в целом (рис. 4, табл. 1).

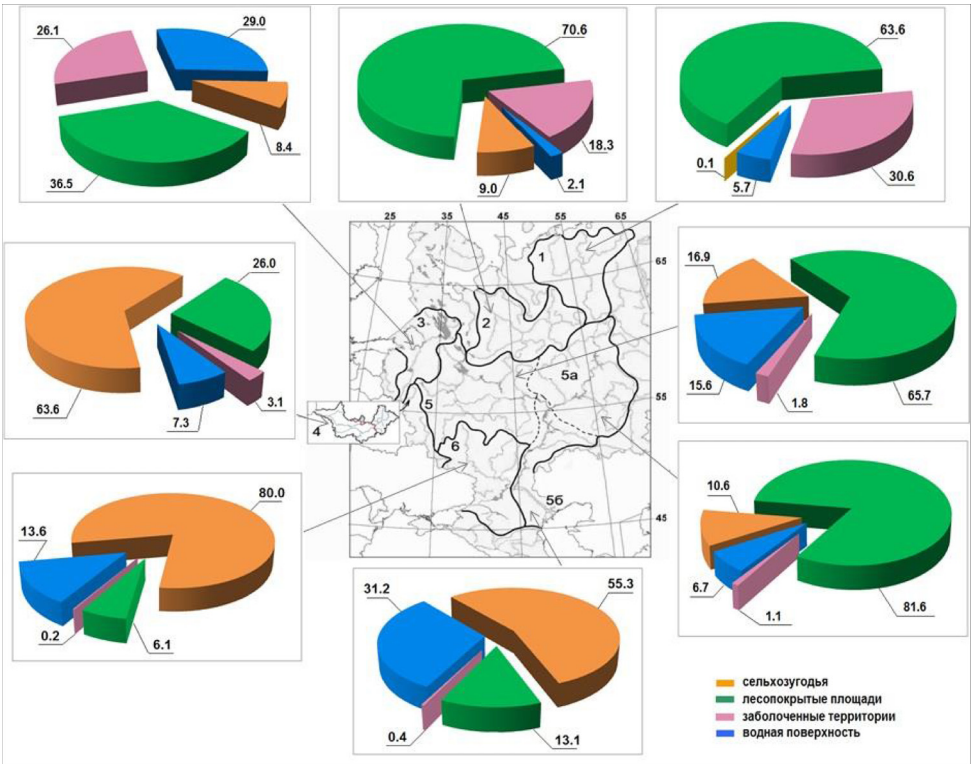

Рисунок 4. Вклад испарения с различных элементов ландшафта в величину суммарного испарения с поверхности водосбора для основных рек ЕЧР
1 - р. Печора, 2 - р. Северная Двина, 3 - р. Нева, 4 - р. Западная Двина, 5 - Волга-1, 5а - р. Кама, 5б - Волга-2, 6 - р. Дон

В бассейнах Волга-1 и р. Кама основной вклад в величину испарения вносят лесопокрытые территории (рис.4). Земли сельхозназначения также оказывают влияние на суммарное испарение, но менее заметное. При этом, в бассейне Волга-1 доля испарения с поверхности водохранилищ почти сравнима по величине с вкладом сельхозугодий. Изменения величины годового испарения с суши в обоих бассейнах в целом также определяются изменениями испарения с лесных массивов (15-20 мм) и водной поверхности (менее 30 мм) (рис. 4, табл. 1): величина испарения растет на фоне роста их площадей. Уменьшение испарения с земель сельхозназначения (-15 ÷ -22 мм) не оказывает заметного влияния на тенденцию изменения испарение по бассейну в целом, однако снижает величину его роста.

Таблица 1. Величина изменений площади элементов ландшафта, годового испарения с их поверхности и изменения испарения по бассейну в целом для всех водосборов ЕЧР

Изменения в %%								Изменения годового испарения по бассейну в целом, мм/%
сельхозугодья		лесопокрытая территория		заболоченная территория		водная поверхность		
площадь	величина испарения	площадь	величина испарения	площадь	величина испарения	площадь	величина испарения	
Бассейн р. Печора (1966-1994 гг.)								
-42	-59	7	-12	0	-18	0	-18	-50.9/-14
Бассейн р. Северная Двина (1966-1994 гг.)								
-46	-59	3	-14	0	-10	0.1	-11	-66.8/-17
Бассейн р. Нева (1966-2007 гг.)								
-51	-63	18	2	-5	-15	-0	-0.5	-45.8/-9
Бассейн р. Западная Двина (1966-1994 гг.)								
-24	8	18	-8	0	-8	3	-13	26.3/2
Бассейн Волга-1 (1966-2010 тг.)								
-13	-50	18	8	0	-13	38	34	11.6/5
Бассейн Кама (1966-2010 гг.)								
-8	-51	10	9	0	-15	36	30	20.3/7
Бассейн Волга-2 (1966-2010 гг.)								
-2	22	13	-3	0	-25	10	-11	13.5/3
Бассейн р. Дон (1966-2010 гг.)								
-3	34	9	6	0	-18	18	7	94.4/19

В бассейнах Волга-2 и р. Дон максимальный вклад в величину испарения вносят земли сельхозназначения (рис. 4): несмотря на некоторое сокращение их площадей (табл. 1) отмечается интенсивный рост испарения (22 и 93 мм соответственно) с этих земель. Испарение с заболоченных территорий пренебрежительно мало (рис. 4). При этом в бассейне Волга-2 испарение с поверхности водохранилищ и озер также влияет на испарение по бассейну в целом (рис. 4 и табл. 1). Уменьшение величины испарения с лесопокрытых территорий и поверхности воды (5 мм для леса и 15 мм для воды) на фоне роста их площадей (табл. 1) снижают величину изменения суммарного испарения для бассейна.

В бассейне Дона рост величины испарения отмечается для всех основных типов ландшафта (см. табл. 1) вне зависимости от тенденций изменения их площадей. Уменьшение испарения фиксируются только для заболоченных территорий, влияние которых пренебрежимо мало.

Анализ изменений суммарного испарения по бассейнам основных рек ЕЧР показал, что на его межгодовую изменчивость оказывают влияние одновременно два процесса: а) многолетняя тенденция в изменении испарении с различных типов подстилающей поверхности с одной стороны и б) динамика

площадей элементов подстилающей поверхности – с другой. Результирующий эффект зависит от того, какой из указанных процессов имеет преобладающее воздействие.

Основные выводы

Анализ изменений основных элементов влагооборота на территории Европейской части России показал, что с 1966 г. произошли их существенные изменения.

В целом на ЕЧР отмечается рост годовых осадков. При этом в таежной зоне до середины 1990-х годов наблюдались периоды как уменьшения, так и роста их величины. После 1996 года для этой зоны характерно существенное увеличение годовых осадков. В зоне смешанных и широколиственных лесов незначительный рост осадков сменяется во второй половине 1990-х годов их некоторым уменьшением. Начиная с зоны лесостепи и к югу от нее продолжительное увеличение осадков с 2004 г. сменилось их падением.

Изменения суммарного испарения имеют ещё более сложный характер. На севере региона в таежной зоне наблюдается уменьшение годовых величин испарения с поверхности суши, особенно интенсивное с начала 1990-х годов. Причем в восточных областях это уменьшение более заметно, чем на западе. В областях преимущественного распространения смешанных и лиственных лесов направленные изменения испарения практически отсутствуют. Однако с 1990-х годов величина испарения здесь устойчиво растет (более интенсивно в восточной части). В зоне лесостепи и к югу от нее отмечается увеличение испарения. При этом в восточной части со второй половины 1990-х годов рост величины испарения максимален, а в западной части с начала 2000-х годов наблюдается даже его незначительное уменьшение.

Соотношение величины осадков и суммарного испарения, тенденции изменения этих компонентов влагооборота в конечном итоге повлияли и на режим годового стока рек ЕЧР.

Рост осадков и одновременное уменьшение испарения в бассейнах Печоры, Северной и Западной Двины в течение рассматриваемого периода обеспечили увеличение стока этих рек. В бассейне Невы существенный рост испарения на фоне снижения осадков в 1998-2007 гг. обусловили отрицательную тенденцию величины годового стока.

В бассейнах Волги и Камы более интенсивный рост осадков за 1996-2010 гг. по сравнению с незначительным увеличением испарения за этот же период сформировали в целом положительную тенденцию в изменении стока этих рек. В бассейне Дона, где в 2001-2010 гг. отмечалось резкое снижение осадков на фоне роста величины испарения, годовой сток уменьшился почти на 20 %.

Таким образом, полученные закономерности изменения осадков и испарения согласуются с данными наблюдений за стоком в исследуемых водосборах, что может служить подтверждением реалистичности предлагаемого подхода к оценке величины испарения с территории водосбора.

Проведенные исследования показали необходимость учета различных ландшафтов водосбора и величину испарения с их территорий, что может в

значительной степени повлиять на его итоговою величину для бассейна в целом. Для получения реалистичных оценок испарения крайне важно также обеспечить проведение натурных наблюдений за испарением с водной поверхности и поверхности суши. Отсутствие таких наблюдений или их недостаточность в различных природных зонах могут привести к невозможности реальной оценки водообеспеченности территорий.

Список литературы

Альбедо и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков /под ред. Кондратьева К.Я. 1981. – Л., Гидрометеоиздат, 232 с.

Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. 1967. – Л., Гидрометеоиздат, 200 с.

Голубев В.С., Цыценко К.В. 1995. Структура и динамика потерь речного стока в низовьях Волги. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 85-93.

Голубев В.С., Сперанская Н.А., Цыценко К.В. 2002. К оценке суммарного испарения в бассейне Волги по данным режимных наблюдений на сети водно- и почвено-испарительных станций. – Метеорология и гидрология, № 4, с. 74 - 84.

Голубев В.С., Сперанская Н.А., Цыценко К.В. 2003. Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость. – Метеорология и гидрология, № 7, с. 89-99.

Груза Г.В., Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я. и др. 2001. Об изменении температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке. – В кн.: Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. – М., Наука, с. 18-39.

Золина О.Г. Булыгина О.Н. 2016. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. – Фундаментальная и прикладная климатология, том 1, с. 84-103.

Каган Р.Л. 1979. Осреднение метеорологических полей. – Л., Гидрометеоиздат, 214 с.

Коронкевич Н.И. 1990. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М., Наука, 205 с.

Крестовский О.И., Книзе А.А. 1993. Определение влияния структуры лесного фонда на водность рек. Методические рекомендации. – СПб., СпбНИИЛХ, 73 с.

Кузьмин П.П. 1953. К методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. – Труды ГГИ, вып. 41 (95), с. 34-52.

Мещерская А.В., Ильин Б.М., Богданова Э.Г., Голод М.П., Гетман И.Ф., Драгомилова И.В. 2004. Анализ скорректированных рядов осадков на водосборе Волги и Урала за 1961-1990 гг. – Метеорология и гидрология, № 7, с.46-63.

Пивоварова З.И. 1977. Радиационные характеристики климата СССР. – Л., Гидрометеоиздат, 335 с.

Романов В.В. 1961. Гидрофизика болот. – Л., Гидрометеоиздат, 359 с.

Романов В.В. 1962. Испарение с болот Европейской территории СССР. – Л., Гидрометеоиздат, 228 с.

Сперанская Н.А., Цыценко К.В. 2008. Суммарное испарение в бассейне Дона и его изменчивость. – Метеорология и гидрология, № 4, с. 89-100.

Сперанская Н.А., Цыценко К. В. 2013. Суммарное испарение в бассейнах рек Северная и Западная Двина и его изменчивость. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 77-87.

Сперанская Н.А. 2016. Испарение с поверхности почвы с травяным покровом: доступные наблюдения и восстановленные данные. – Известия РАН. Серия географическая, № 2, с. 49–60.

Шлычков В.А. 2004. Численное моделирование тепловлагообмена в системе атмосфера – почва в засушливый период. – Вычислительные технологии, том 9, № 1, с. 105-112.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements – In: FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56. – FAO, Rome, Italy, 300 p. – Электрон. дан. Режим доступа: http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm. – Загл. с экра-на. – Англ. яз.

Bouchet R.J. 1963. Evapotranspiration reelle et potentielle, signification climatique. – In: Symposium on Surface Waters. – IAHS Publication, No 62, pp. 134–142.

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Groisman P.Ya. 2007. Climate variations and changes in extreme climate events in Russia. – Environ. Res. Lett., vol. 2, No 4, 045020, 7 p.

Choudhury B.J. 1999. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. – J. Hydrol., vol. 216, iss. 1-2, pp. 99-110.

Droogers P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. – J. Hydrol., vol. 229, iss. 1-2, pp. 50-58.

Frank D.A., Inouye R.S. 1994. Temporal Variation in Actual Evapotranspiration of Terrestrial Ecosystems: Patterns and Ecological Implications. – J. Biogeography, vol. 21, iss. 4, pp. 401-411. Douglas et al., 1994 = > Frank, Inouye, 1994.

Gao G., Chen D., Xu C., Simelton E. 2007. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002. – J. Geophys. Res. vol. 112. D11120.

Groisman P.Ya. and Rankova E.Ya. 2001. Precipitation trends over the Russian permafrost-free zone: removing the artifact of pre-processing. – Int. J. Climatology. vol. 21. iss. 6. pp. 657-678.

Hobbins M.T., Ramirez J.A., Brown T.C., Claessens L.H.J.M. 2001. The complementary relationship in the estimation of regional evapotranspiration: The complimentary relationship areal evapotranspiration and advection-aridity models. – Water Resour. Res., vol. 37, No 5, pp. 1367– 1387.

Khoob A.R., Behbahani S., Nazarifar M.H. 2007. Developing pan evaporation to grass reference evapotranspiration conversion model A case study in Khuzestan province. – J. Applied Sci., vol. 7, No 6, pp. 936-941.

Kristensen K.J. Jensen S.E. 1975. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. – Nordic Hydrol., No 6, pp. 170-188.

Kondo J, Saigusa N., Sato T. 1990. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. – J. Applied Met., vol. 29, pp. 385–389.

Liu S., Bai J., Jia Z., Jia L., Zhou H., Lu L. 2010. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. – Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 14, No 3, pp. 573-584.

Milly P.C.D., Dunne K.A. 2001. Trends in evaporation and surface cooling in the Mississippi River basin. – Geophys. Res. Lett. vol. 28. No 7. pp. 1219-1222.

Morton F.I. 1965. Potential evaporation and river basin evaporation. – J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., vol. 91, No HY6, pp. 67-97.

Poulovassilis A., Anadranistakis M., Liakatas A., Alexandris S., Kerkides P. 2001. Semi-empirical approach for estimating actual evapotranspiration in Greece. – Agric. Water Manag., vol. 51, iss. 2, pp. 143-152.

Ramírez J.A., Hobbins M.T., Brown T.C. 2005. Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis. – Geophys. Res. Let., vol. 32, L15401.

Sorman A.U., Abdulrazzak M.J. 1994. Estimation of actual evaporation using precipitation and soil moisture records in arid climates. – Hydrological Processes, vol. 9, No 7, pp. 729-741.

Szilagyi J. 2001. On Bouchet's complementary hypothesis. – J. Hydrol., vol. 246, iss. 1-4, pp. 155-158.

Walter M.T., Wilks D.S., Parlange J.-Y., Schneider R.L. 2004. Increasing evapotranspiration from the conterminous United States. – J. Hydrometeorol., vol. 5, pp. 405–408.

Xinfa Qio, Yan Zeng, Qilong Miao, Qiang Yu. 2004. Estimation of annual actual evapotranspiration from nonsaturated land surfaces with conventional meteorological data. – Science in China Ser. D Earth Sciences, vol. 47, No 3, pp. 239-246.

Xu C-Y., Gong L., Tong J., Chen D., Singh V.P. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. – J. Hydrol., vol. 327, iss. 1-2, pp. 81–93.

Yang H., Yang D., Cong Z., Lei Z. 2009. Analysis of the dominant climatic factors of evaporation change over the main basins in mainland China based on Budyko and Bouchet hypotheses. - In: Hydrological Modelling and Integrated Water Resources Management in Ungauged Mountainous Watersheds. Proceedings of a symposium held at Chengdu, China (November 2008). - IAHS Publ. No 335, pp. 111-115.

Zhang Y., Liu C., Tang Y., Yang Y. 2007. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. – J. Geophys. Res. vol. 112. D12110.

Статья поступила в редакцию: 26 апреля 2017 г. *После переработки: 16.05.2017 г.*