

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук
Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена



ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ: НАУЧНЫЕ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

**к 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки,
доктора физико-математических наук,
профессора Льва Николаевича Карлина**

УДК 551.5+574
ББК 26.23:20.1
Т 78

Т 782

Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». К 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина. – СПб.: Аграф +, 2017. – 514 с.

ISBN 978-5-9529-0085-1

В сборнике трудов представлены доклады российских и зарубежных специалистов в области метеорологии, гидрологии, океанологии, экологии, управления морской деятельностью и образования в сфере гидрометеорологии. Особое внимание уделено результатам фундаментальных исследований и их внедрению при решении прикладных проблем, в том числе при разработке технологий мониторинга Мирового океана с целью исследования и освоения его ресурсов, совершенствованию технических средств и методов прогноза гидрометеорологических процессов для управления водными ресурсами и морской деятельностью. Рассмотрены проблемы наращивания потенциала в области образования в сфере гидрометеорологии.

Для научных работников и инженеров, а также широкого круга специалистов, интересующихся гидрометеорологией и экологией. Сборник будет полезен студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Организаторы конференции:

- Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук
- Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт
- Северо-Западное Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
- Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук
- Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена

При участии:

- Государственного гидрологического института

При поддержке:

- Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга
- Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга
- Морского совета при Правительстве Санкт-Петербурга

Соорганизатор:

- Государственное бюджетное учреждение «Конгрессно-выставочное бюро Санкт-Петербурга»

Оператор конференции:

- ООО «Инпроэкспо»

Программный комитет конференции: Ашик И.М. (ААНИИ), Бобылев Л.П.(ФОНД "НАНСЕН-ЦЕНТР"), Ерёмин Т.Р.(РГГМУ), Зацепин А.Г.(ИО РАН), Зимин А.В. (ИО РАН), Кондратьев С.А. (ИНОЗ РАН), Малинин В.Н. (РГГМУ), Мамаева М.А. (ГГИ), Плинка Н.Л. (РГГМУ), Родионов А.А. (ИО РАН), Рябченко В.А. (ИО РАН), Третьяков М.В. (ААНИИ), Угрюмов А.И. (РГГМУ), Филатов Н.Н. (ИВПС КарНЦ РАН), Цепелев В.Ю. (Северо-Западное УГМС), Шилин М.Б. (РГГМУ).

P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences

Federal State Budgetary Institution «Arctic and Antarctic Research Institute»

Federal State Budgetary Institution Northwest Administration
for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

Scientific Foundation «Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre»



**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN NATIONAL CONFERENCE
HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY:
SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL ACHIEVEMENTS
AND PERSPECTIVES**

to the 70-th anniversary of the birth of Lev N. Karlin

УДК 551.5+574
ББК 26.23:20.1
Т 78

Т 782

Proceedings of the Russian national conference "Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and perspectives" to the 70-th anniversary of the birth of Lev N. Karlin – СПб.: Аграф +, 2017. – 514 с.

ISBN 978-5-9529-0085-1

The book contains materials of the reports of the Russian and foreign experts in the field of meteorology, hydrology, oceanology, ecology, marine management and education in the hydrometeorology. Special attention is given to results of basic research and their implementation for solving applied problems including the development of technologies for monitoring the World Ocean in order to investigate and development of its resources, improvement of technical resources and forecasting methods for hydrometeorological processes for the management of water resources and marine activities. There are considered the problems of building up capability in education in hydrometeorology sphere.

For the researchers and engineers, specialized in hydrometeorology and ecology. This book is useful for students and postgraduates of relevant specialties.

Conference Organizers:

- P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences
- Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute"
- Federal State Budgetary Institution Northwest Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
- Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
- SCIENTIFIC FOUNDATION "NANSEN INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL AND REMOTE SENSING CENTRE"

With the participation:

- Russian Federal State Budgetary Organization "State Hydrological Institute"

Support of the Conference:

- Committee for Nature Use Environmental Protection and Ecological Safety
- Committee for Science and Higher Education
- St. Petersburg Maritime Council

Co-organizer:

- Saint Petersburg Convention Bureau

Conference operator:

- Ltd «InproExpo»

Program committee of the Conference: Ashik I.M. (AARI), Bobilev L.P. (NIERSC), Eremina T.R. (RSHU), Zacepin A.G. (IO RAS), Zimin A.V. (IO RAS), Kondrat'ev S.A. (IL RAS), Malinin V. N. (RSHU), Mamaeva M.A. (SHI), Plink N.L. (RSHU), Rodionov A.A. (IO RAS), Ryabchenko V.A. (IO RAS), Tret'yakov M.V. (AARI), Ugriumov A.I. (RSHU), Filatov N.N. (NWPI KarRC RAS), Cepelev V. Ju. (NW AHM), Shilin M.B. (RSHU).

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ РОССИИ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ НАЗЕМНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ

Н.Л. Фролова¹, д-р геогр. наук, В.Ю. Григорьев^{1,2}, Л.В. Зотов³, канд. физ.-мат. наук, М.Б. Киреева¹, канд. геогр. наук, Д.В. Магрицкий¹, канд. геогр. наук

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

EVALUATION OF THE WATER BALANCE COMPONENTS OF RUSSIAN RIVER BASINS BASED ON MODERN GROUND AND REMOTE DATA

N.L. Frolova¹, Dr. Sc., V.Y. Grigor'ev^{1,2}, L.V. Zotov³, Cand. Sc., M.B. Kireeva¹, Cand. Sc., D.V. Magritsky¹, Cand. Sc.

¹Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

На основе совместного использования современной наземной информации и данных дистанционного зондирования (спутниковая система GRACE) проведено исследование пространственно-временной изменчивости составляющих водного баланса речных бассейнов России.

The spatial and temporal variability of the components of the water balance of river basins in Russia has been studied on the base of joint use of modern ground data and remote sensing data (GRACE satellite system).

Введение

На европейской территории России (ЕТР) в последние десятилетия происходят заметные изменения в стоке рек. Его колебания зачастую представляют в виде двух условно стационарных периодов. Временем нарушения стационарности для большинства рек является 1977 - 1978 гг. [1-3]. Подобный выбор даты нарушения стационарности обусловлен с одной стороны результатами статистической проверки, а с другой – наблюдаемым в середине 1970-ых годов «климатическим сдвигом» [4-5], выразившимся прежде всего в интенсивном росте температуры воздуха. При этом для метеорологических параметров (температура воздуха, количество осадков, дефицит влажности и др.), в отличие от речного стока, период с 1976 г. не рассматривается как стационарный. Целью данной работы является анализ изменения основных составляющих водного баланса: речного стока (R), осадков (P), испарения (E) и бассейновых влагозапасов (TWS - terrestrial water storage), а также потенциального испарения (PET).

Материалы и методы

В работе использованы данные 416 гидрометрических постов (с суточными данными по 27), 705 метеостанций (625 из которых находятся в пределах ЕТР), включающие срочные измерения и суточные величины, данные о запасах воды в снежном покрове по 284 снегомерным маршрутам по данным ВНИИГМИ – МЦД, влажность почвы по данным ре-анализа ERA-Interim, величины бассейновых влагозапасов по данным проекта GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), находящиеся в открытом доступе в сети интернет. Спутники-близнецы GRACE работают на орбите уже 15 лет, выполняя мониторинг гравитационного поля Земли. В 2017 г. им на смену последует миссия GRACE FO. Гравиметрические спутники предоставляют гидрологическую и геодинамическую информацию, позволяют отслеживать последствия изменений климата. Аномалии бассейновых влагозапасов рассчитываются по изменению гравитационного поля Земли [6-9]. Эти данные имеют разрешение порядка $1^\circ \times 1^\circ$, с временной дискретностью 1 месяц и доступны начиная с апреля 2002 г. Ошибка данных составляет порядка 20-25 мм и убывает при увеличении площади осреднения, для крупных речных бассейнов ($F > 1$ млн км²) она составляет 7-10 мм. Для сравнения слоя годовых осадков за 1945-1977 гг. и 1978-2010 гг. использован массив

откорректированных среднемесячных осадков [10-11], включающий, однако, лишь 163 станции.

Для расчета неравномерности речного стока и осадков внутри года и отдельных сезонов использованы такие показатели как средняя абсолютная разность (*MD* - mean absolute difference) (1) и относительная средняя абсолютная разность (*RMD* - relative mean absolute difference) (2).

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|}{n^2} \quad (1)$$

$$RMD = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|}{\bar{x} n^2} \quad (2)$$

где x_i, x_j - осадки или сток за i и j промежутков времени (дни, месяцы), n – количество промежутков. Потенциальное испарение рассчитывалось по методике, представленной в [12]. Величина испарения за многолетний период рассчитывалась как разность между слоем осадков и стока и по формуле Шрайбера[13]. Осреднение по площади производилось методом полигонов (thiessenpolygons).

Результаты

Осадки. В целом для ЕТР за 1978 – 2010 гг. по сравнению с 1945 – 1977 г. произошел рост слоя осадков (табл. 1).

Таблица 1. Изменение слоя стока (R), осадков (P), испарения (E) и потенциального испарения (PET) за 1978–2014 гг. по сравнению с 1945–1977 гг., % (жирным выделены изменения значимые на 5% уровне (кроме испарения))

Река	Площадь бассейна, тыс. км ²	Изменение, %			
		<i>P</i>	<i>PET</i>	<i>E</i>	<i>R</i>
Урал*	82.3	-0.60	3.6	-0.66	7.4
Северная Двина	350	1.9	2.7	1.3	3.1
Печора	310	4.2	1.9	4.2	4.8
Онега	55.9	4.0	3.2	4	4.3
Мезень	56.4	-6.6	1.5	-4.0	-3.8
Нева	280	5.2	2.2	6.7	3.8
Ока	240	6.1	3.7	1.7	19
Белая	120	1.6	0.88	-1.8	5.2
Вятка	120	7.6	2.6	-0.34	19
Дон**	260	6.6	2.8	8.3	-2.3

Учтены потери воды на заполнение Ириклинского и Цимлянского водохранилищ***

Уменьшение слоя осадков (в пределах 3%) наблюдается лишь на Черноморском побережье, на севере между 40° и 50° восточной долготы и на юге Урала. На большей части ЕТР рост составил 6-9%. Наибольший рост (свыше 9%) имеет место на юге бассейна Дона, на севере бассейна Камы, в бассейне Волги между Казанью и Саратовом, некоторых районах Кубани, Терека, западе ЕТР и Кольского полуострова. Таким образом, единственным вододефицитным регионом, где произошло некоторое снижение слоя осадков является юг бассейна Урала.

Согласно [10] за 1976 - 2014 гг. на ЕТР наблюдается небольшой рост осадков (0,7%/10 лет), положительный во все сезоны, кроме летнего. При использовании массива откорректированных осадков величина тренда меньше, и для 1976-2010 гг. составляет - 2.16 мм/10 лет [14]. Неравномерность осадков теплого периода с 1976 г. в целом немного снизилась, увеличившись лишь на севере ЕТР и в районе Прикаспия. Уменьшение неравномерности осадков связано с уменьшением их количества. Максимальные суточные осадки, напротив, несколько выросли, хотя картина их изменений на ЕТР весьма пестрая. Наиболее значительные изменения произошли с количеством дней с осадками за теплый

период. Почти на трети станций (33.1%) наблюдаются значимые при $\alpha=5\%$ изменения (по коэффициенту корреляции Пирсона), причем лишь у 2.9% станций они положительные.

Испарение и потенциальное испарение (PET). В целом для ЕТР характерен небольшой рост испарения, наиболее существенный в бассейне Дона – более 8 % в створе Цимлянского гидроузла. Причиной такого значительного роста испарения является как рост *PET* в этом регионе, так и то, что в целом после 1978 г. величина водопотребления в бассейне была больше, чем в предшествующий период. Также выросло испарение в бассейнах рек Печора и Нева – на 4.2 и 6.7% соответственно. Единственным водосбором из 10 представленных, где испарение значительно снизилось, является бассейн р. Мезень, что связано как со снижением слоя осадков, так и небольшим снижением потенциального испарения в этой области.

Потенциальное испарение увеличилось практически на всей ЕТР в пределах 3%. При этом ряды *PET* не являются стационарными (имеется линейный тренд). На значительной части ЕТР годом перелома является 1977 г. Для востока и юго-востока ЕТР изменения произошли позже, в 1978-1993 гг. Максимальный рост ($>3\%/10$ лет) имеет место в бассейнах рек Дона, Верхней Волги, Оки, Западной Двины и частично Камы. При этом, в среднем для ЕТР, тренд за 1976 – 1993 гг. описывает лишь 3% изменчивости *PET*, в то время как для промежутка 1994 – 2014 гг. уже более 40%. Учитывая рост дефицита влажности воздуха в среднем с 1989 г., прямой солнечной радиации с начала 1990-ых и уменьшение скорости ветра, можно сказать, что рост *PET* на ЕТР начался с начала 1990-ых гг.

Речной сток. В целом для ЕТР величина годового речного стока выросла с максимумом (15-30%) в полосе 53-60° с.ш. К югу и северу от этой полосы рост менее значителен, так на севере он не превышает 10%, а в бассейне Дона наблюдается даже сокращение, связанное, однако, вероятно, с антропогенным воздействием. Для рек Кавказа картина сложная и в силу сильного антропогенного воздействия в этом регионе не совсем ясная, но, видимо, имеет место рост годового стока, причем наиболее интенсивный для высокогорных водосборов. Как показали расчеты по формуле Шрайбера, практически на всей ЕТР главной причиной изменения речного стока является рост осадков. Вклад изменения *PET* в основном меньше 20%, хотя локально достигает 40-50%. Изменение величин минимальных среднемесячных расходов летней и особенно зимней межени куда значительней, для бассейнов Дона и частично Камы со Средней Волгой превышает 50-70%. В тоже время для северных рек изменения незначительны – в низовьях и среднем течении роста практически не наблюдается. Неравномерность речного стока внутри года (выраженная через *MD*) значительных изменений не претерпела. В целом реки севера и северо-запада ЕТР изменения находятся в пределах от -10 до 10%. Исключения составляют верховья Северной Двины (реки Луза и Вычегда) и низовья Онеги, где неравномерность стока выросла (в пределах 10-25%). В низовьях Печоры неравномерность стока, напротив, уменьшилась, хотя и не более чем на 10% (кроме р. Коткина). Для бассейнов рек Кама и Урал картина пестрая – есть бассейны, где происходит значительное увеличение неравномерности стока, а есть – где снижение. На левобережье Верхней Волги (выше впадения Камы) изменения в *MD* невелики, хотя в целом наблюдается рост. На правобережье Верхней Волги картина противоположная. Также снижение *MD* имеет место в бассейне Оки – на 10-20%. На большей части бассейнов Дона и Нижней Волги произошло снижение *MD*, более чем на 30%. Неравномерность стока за летнюю межень (июль-октябрь, по суточным данным) во второй период на несевверных реках значительно возросла. При этом практически везде относительно среднего за межень сток стал более равномерным. Вероятно, это связано с тем, что подземное питание, вследствие роста уровня подземных вод на начало межени, стало истощаться быстрее (рост *MD*) и его вклад в формирование меженного стока, по сравнению с паводками, возрос (снижение *MD*).

Бассейновые влагозапасы. Во второй половине XX в. на ЕТР произошел рост бассейновых влагозапасов, как за счет роста увлажненности почвы, так и подъема уровня грунтовых вод [1]. Средний рост влажности почвы в последнюю декаду сентября можно оценить в 50 мм, а рост запасов подземных вод в 100 мм. За 1966 – 2015 гг. максимальный запас воды в снежном покрове изменился незначительно, увеличившись на полевых маршрутах и уменьшаясь на лесных. При этом, за 2002-2015 гг. бассейновые влагозапасы (по данным GRACE) претерпели некоторое изменение. Минимальные за год влагозапасы (август на севере и октябрь на юге ЕТР) на севере практически не изменились. Рост более 5 мм/год наблюдается лишь на северо-

западе (местами) и северо-востоке (преимущественно в бассейне Печоры). Для бассейнов Камы, Урала, Верхней Волги и особенно Оки произошло некоторое уменьшение влагозапасов, в пределах 10 мм/год. Наиболее значимое снижение произошло в бассейне Дона (в меньшей степени в бассейне Хопра и Медведицы) и Кубани, где оно превысило 15 мм/год. Изменение максимальных влагозапасов (март-май), было не столь существенным – положительные тренды не превышают 10 мм/год а отрицательные 15 мм/год. Практически для всего северо-запада ЕТР и крайнего северо-востока наблюдается рост *TWS*. Области понижения максимальных влагозапасов на ЕТР во многом совпадают с таковыми для минимальных влагозапасов.

Выводы

За 1945-2014 гг. на ЕТР произошло изменение структуры водного баланса, выразившееся, прежде всего в росте величин годового стока (и в большей степени меженного), осадков, испарения и потенциального испарения. Неравномерность стока внутри года уменьшилась, но выросла за период межени. Рост бассейновых влагозапасов во второй половине XX в. на ЕТР для южной ее половины в XXI в. сменился снижением.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-17-00155 – статистический анализ гидрометеорологической информации) и РФФИ (проекты № 16-05-00753 а и № 17-05-41030 РГО_а - анализ влагозапасов и внутригодового распределения стока).

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование // Под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
2. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
3. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги//Метеорология и гидрология. 2014. №3. С. 75-85.
4. Trenberth K.E. Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere // Bulletin of the American Meteorology Society. 1990. Vol. 71. P. 988–993.
5. Полонский А.Б., Башарин Д.В. Влияние климатического сдвига 1976-1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // Метеорология и гидрология. 2008. № 5. С. 16–30.
6. Schmidt F.F., Meyer U. Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites // Surveys in Geophysics. 2008. Vol. 29. № 4, 5. P. 319–334.
7. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Харламов М. А. Использование спутниковой системы измерения поля гравитации (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов // Вестник Московского Университета, серия география. 2015. №4. С. 27–33.
8. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Телегина А.А., Гравитационные изменения в бассейнах крупных рек России // Альманах современной метрологии, ВНИИФТРИ. 2015. № 3. С. 142-158.
9. Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К. Гравитационные аномалии в бассейне крупных рек России // Природа. 2016. № 5. С. 3-8.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
11. Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М., Драгомилова И.В. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 68–94.
12. Hargreaves G.H., Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration // J. Irrig. Drain. Eng. 1982. Vol. 108. P. 225–230.
13. Важнов А.Н. Гидрология рек. М.: Изд-во Московского университета, 1976. С. 170.
14. Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М., Ранькова Э. Я. Глава 1.3. Атмосферные осадки // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 72–96.