



Р.Г. Джамалов
д-р геол.-мин. наук
профессор
ИВП РАН¹
заведующий лабораторией
roald@iwp.ru



Т.И. Сафронова
ИВП РАН¹
ведущий инженер
tisafr@iwp.ru



Е.А. Телегина
ИВП РАН¹
научный сотрудник

Многолетняя квазипериодичность подземного и поверхностного стока рек России¹

¹Институт водных проблем РАН. Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3.

Рассмотрены различные варианты корреляционной связи речного стока с основными формирующими метеорологическими факторами за последние десятилетия, что дало возможность количественно обосновать изменения в генезисе водных ресурсов, среднего годового и сезонного стока. Это позволило установить не только синхронность, но и периодичность в изменении значений стока, суммы осадков и средней температуры

Ключевые слова: водные ресурсы; сток рек; климат; периодичность; цикличность; осадки; температура; снежный покров

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ и РНФ (проекты № 16-55-52008 МНТ; 17-17-01262)

Впервые выполнен анализ изменений условий формирования и динамики водных ресурсов по 348 водосборам европейской России (ЕЧР) за период с 1945 по 2013 гг. Наблюдаемые гидрофизические процессы приводят к увеличению возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод, значимый рост которых составляет от 15-30% для водосборов северных рек до 70-100% для рек южного склона ЕЧР. Выполненные исследования позволили количественно обосновать изменения в генезисе годового, сезонного и месячного среднего стока рек и водных ресурсов, а также определить степень значимости ведущих климатических факторов в их формировании [7].

Основные тенденции изменения стокообразующих характеристик климата

За период инструментальных наблюдений 15-летний период в начале XXI в. оказался самым теплым. На территории России скорость среднесноголетнего потепления составляет более 0,45 °C/10 лет. По данным метеостанций России и мира 2015 г. оказался самым теплым в глобальном масштабе за все время инструментальных наблюдений. Средняя температура климатической нормы за 1961-1990 гг. превышена в 2015 г. на 0,76 °C, тогда как предыдущий максимум 2014 г. составлял 0,57 °C. В ЕЧР в исключительно теплые зимние месяцы 2014/2015 гг. отклонение от нормы (свыше 3,56 °C) превысило предыдущий максимум 2007 г. на 0,5 °C [3, 5].

Исследования изменений приземной температуры как в глобальном, так и в региональном масштабах указывают на наличие долгопериодных квази-60-летних ее колебаний (с периодами 55-70 лет). Периодичность этих колебаний подтверждается как инструментальными наблюдениями за 150 лет, так и модельными реконструкциями температурных рядов длительностью до 2000 лет и более (включая IPCC, 2007) (*рис. 1*).

В рядах инструментальных наблюдений приземной температуры Земли и регионов Северного полушария за последние 150 лет проявляются экстремумы 60-летнего цикла для рассмотренных регионов и во все сезоны.

В числе основных физических причин изменчивости приземной температуры обычно рассматриваются:

- изменение концентрации парниковых газов в атмосфере;
- природная долгопериодная изменчивость многих земных процессов и явлений;
- вариации солнечной активности (периодичность солнечных пятен).

Следует отметить, что на фоне периодичных квази-60-летних температурных колебаний может быть прослежена краткосрочная цикличность в других природных процессах, обусловленных или генетически связанных с температурным фактором (твердые и жидкие осадки, речной и подземный сток).

В период 1976-2015 гг. по России в целом годовые атмосферные осадки растут со скоростью 2%/10 лет. При этом особенно быстро растут весенние осадки до 5,8%/10 лет. Именно за счет их интенсивного роста по России сумма годовых осадков за 1976-2010 гг. увеличивается быстрее, чем за весь исследуемый период с 1936-2010 гг. В 2015 г. также отмечалось небольшое превышение осадков: по России в целом 106% нормы за год (9-11 величина с 1936 г.), а зимой - 119% нормы (2-3 величина) [3, 5, 6].

Осредненные по России и ее регионам годовые количества осадков разных видов (твердых, жидких и смешанных) за 1976-2010 гг. по сравнению с периодом 1936-2010 гг. показывают уменьшение твердых, увеличение смешанных и в меньшей степени жидких осадков (*табл. 1*). Именно с повышением температуры воздуха связано увеличение количества жидких и смешанных осадков за счет уменьшения твердых.

Выделяют четыре градации продолжительности выпадения осадков (i , мм/ч): слабые ($i \leq 1,8$), умеренные ($1,8 < i \leq 6$), сильные ($6 < i \leq 60$) и очень сильные ($i > 60$ мм/ч) [1]. Продолжительность выпадения общего количества осадков и особенно слабых повсеместно уменьшается. Отчетливо также прослеживается рост продолжительности очень сильных осадков на большей части России по сравнению с осадками остальных градаций интенсивности (*рис. 2*).

Ливневые осадки с интенсивностью более 0,5 мм/мин могут вызвать максимальные расходы дождевых паводков и быстрое повышение уровней малых рек. Причем расходы таких паводков могут превысить максимальные расходы от снеготаяния. Этот эффект весьма интересен с точки зрения его влияния на сток, но не вполне достоверен из-за очень малой продолжительности этих осадков и возможных случайных погрешностей их определения.

В связи с глобальным потеплением в последние годы происходит как сокращение, так и увеличение высоты снежного покрова. Максимальная высота снежного покрова (в северных регионах до 80 см и более) и его плотность определяют запас воды в снеге - важный гидролого-геологический фактор. На ЕЧР в северных, центральных и восточных областях наблюдается рост числа снегопадов большой интенсивности

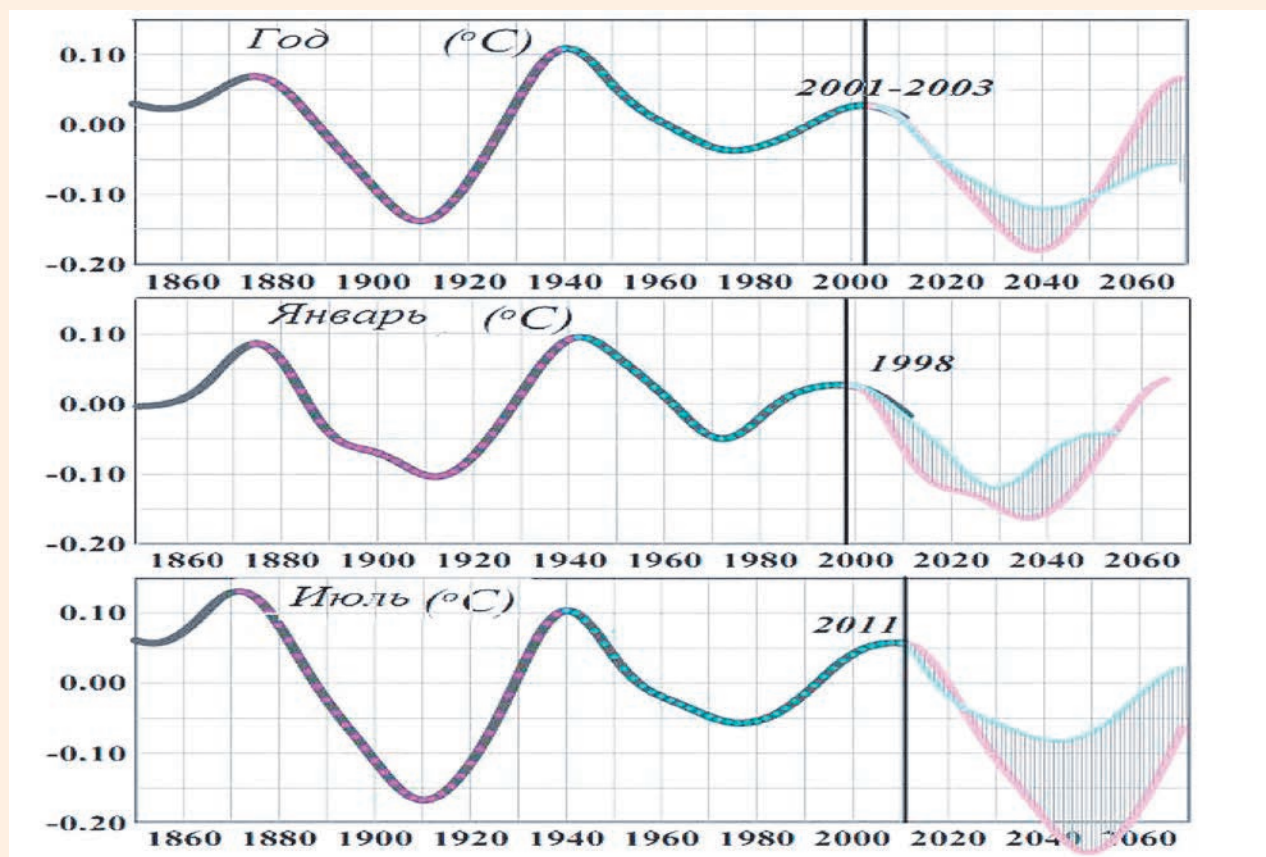


Рис. 1.

Вклад 60-летнего колебания в изменение глобальной приповерхностной температуры в течение 1850–2011 гг. и оценка возможного его влияния в следующем 60-летнем цикле (до 2070 г.) [3]

и соответствующее увеличение мощности снежного покрова за зиму [2].

Полагают, что увеличение снегонакопления на севере ЕЧР связано с уменьшением ледового покрытия в арктических морях. Именно процессы сокращения ледового покрова морей обуславливают тенденции увеличения запаса воды в снеге на севере Восточно-Европейской равнины после 1976 г. (по данным маршрутных съемок). Однако для центральных областей ЕЧР преобладает тенденция к уменьшению продолжительности залегания снежного покрова, более раннего его схода (–2,6 дней/10 лет) и более

позднего появления снега (1,3 дня/10 лет). Эти тенденции сопровождаются уменьшением на 8%/10 лет максимального запаса воды в снеге [3].

Характеристики снежного покрова в 2015 г. практически не отличались от нормы. Вместе с тем, в период 1976–2015 гг. обнаружены тенденции уменьшения числа дней со снегом (–1,8 дней/10 лет) в среднем по территории России и увеличения максимальной высоты снежного покрова в центре ЕЧР, а запас воды в снеге в среднем выше нормы. Почти везде на севере России в период 1999–2015 гг. растет мощность

Таблица 1.

Изменение регионально осредненных годовых сумм осадков разных видов за 1976–2010 гг. в процентах от средней многолетней суммы осадков данного вида (мм/год) [3]

Регионы	Вид осадков					
	жидкие		твердые		смешанные	
	%	мм	%	мм	%	мм
РОССИЯ	5	385	1	158	18	33
ЕЧР	4	449	18	151	17	39

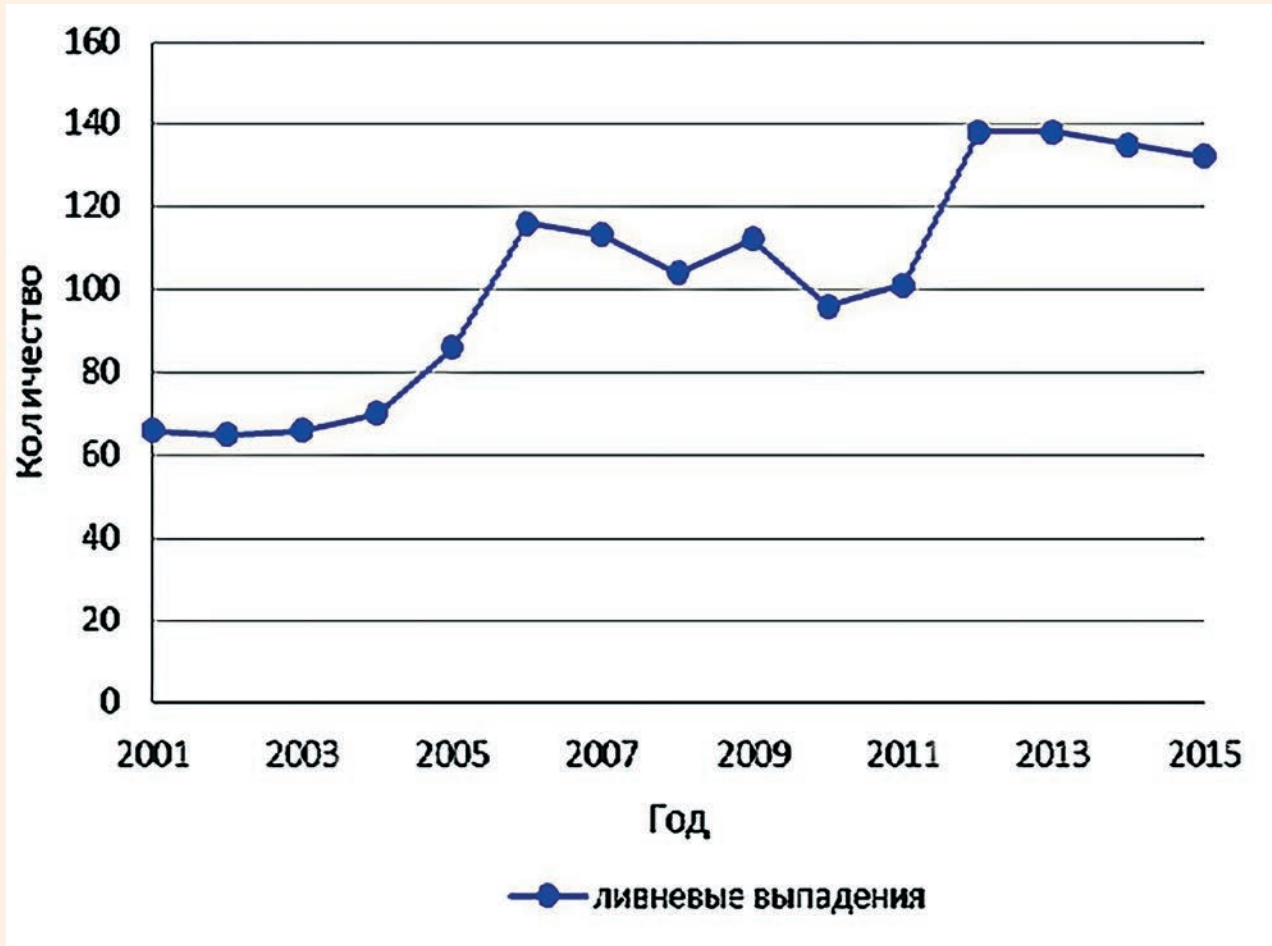


Рис. 2.
Количество ливневых выпадений на территории России с 2001 по 2015 гг. [14]

сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов [5].

Внутригодовое распределение стока рек

Анализ внутригодового распределения стока рек с оценкой роли зимней межени выполнен для бассейнов Верхней Волги, Оки, Камы, Дона, Урала. Выявление корреляционных связей между характеристиками стока и вариациями температуры воздуха и осадков проводилось как для всего имеющегося ряда наблюдений, так и отдельно для периодов 1945–1977 и 1978–2013 гг. Установлено, что осенние осадки (август–октябрь) оказывают влияние (до 0,55) на условия формирования стока ряда рек за период с 1936–1977 гг. В последующее тридцатилетие (1978–2013 гг.) потепление климата привело к повышению роли оттепелей (рост суммы положительных температур и жидких атмосферных осадков) в формировании стоковых характеристик зимнего периода. Коэффициент корреляции в этом случае возрос до 0,7 для многих рек европейской России. Эта зависимость наиболее отчетливо себя проявляет в бассейне Дона, для

которого характерно частое проявление оттепелей и сумма положительных температур за зимний период наиболее существенна. Однако этот вывод не всегда корректен при анализе изменений минимального месячного стока рек Северного края, Верхней Волги и Оки. Здесь его значения (до 0,6–0,7) указывают на более тесную связь минимального стока с суммой отрицательных температур воздуха. Этот вывод обусловлен физикой процесса формирования стока на водосборе в зимних условиях, когда низкие отрицательные температуры вызывают более глубокое промерзание зоны аэрации и практически полное сокращение поступления талых вод, что приводит к минимальным значениям месячного и декадного стока за конкретный холодный месяц зимнего периода.

Выполненный совместный анализ вариаций стокообразующих метеофакторов и характеристик стока позволил установить, что после 1978 г. выражена не только синхронность, но и периодичность в изменении значений зимнего стока, суммы осадков за осенние месяцы и средней температуры за период зимней межени (рис. 3).

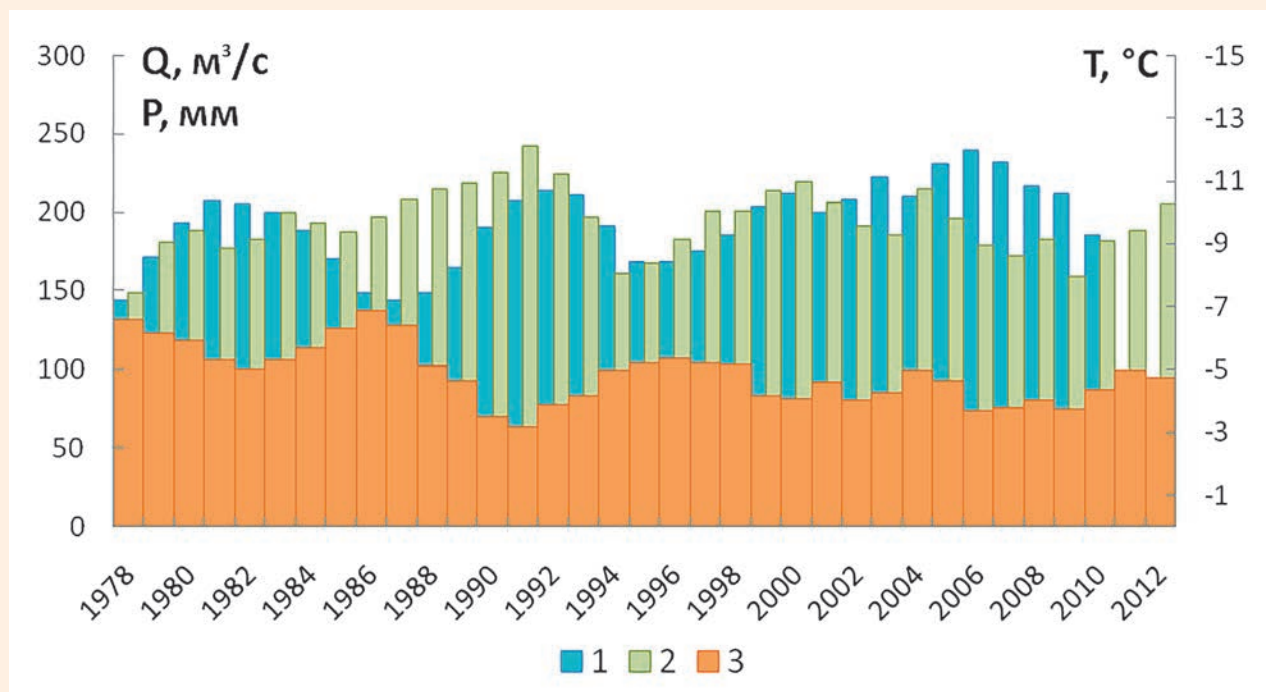


Рис. 3.

Изменения величин среднего стока за зимнюю межень (1), суммы осадков за 8–10 месяцев (2) и средней температуры за период зимней межени (3), сглаженные методом скользящего среднего с интервалом в 5 лет (р. Ока – г. Калуга)

При сопоставлении годового и среднего стока зимней межени также прослеживается не только синхронность в колебании этих величин, но и определенная периодичность с интервалом в 8–10 лет (рис. 4).

Тенденция квазипериодичности проявляла себя и до 1978 г., но в более сглаженном виде. Столь отчетливый отклик на вариации стокоформирующих факторов после 1978 г. может быть вызван увеличением суммы жидких осадков и повышением средних значений положительных температур, что приводило к оттепелям и значительному повышению зимнего стока и обусловило проявление ее более выраженной периодичности, чем в предшествующий период.

Расчет среднеквадратических отклонений подтверждает сделанные выводы. Увеличение их значений показывает, что после 1978 г. наблюдается больший разброс значений стока за зимнюю межень относительно средней его величины, чем до 1978 г., когда значения были сгруппированы ближе к среднему значению стока (рис. 5).

При рассмотрении синхронности между колебаниями водности и значениями метеорологических характеристик можно выявить некоторые закономерности и особенности для различных природных зон. Как и ожидалось, повышению водности рек в зимний период предшествует повышение количества осадков за осенний период и изменение температурного режима воздуха.

Например, для ряда постов, особенно в бассейне р. Ока, характерно синхронное чередование минимумов и максимумов разностно-интегральных кривых для величины зимнего стока и суммы отрицательных температур воздуха. Но оно часто нарушается из-за резкого снижения количества осенних осадков, или же в связи с продолжительными зимними оттепелями. Разнообразие и генетическая разнородность факторов формирования стока обуславливает трудности в определении синхронности и периодичности колебаний стоковых и метеорологических характеристик [7].

Генетическое расчленение составляющих речного стока в течение ряда лет проводят с помощью изотопных и химических консервативных трассеров. Подобные исследования позволяют более обоснованно выделить поверхностный, почвенный, подземный сток, а также установить вклад талой и дождевой воды с различных частей водосбора. Помимо этого, с помощью трассеров возможно выделить в гидрографе стока так называемые «старую» и «новую» воду, которые сформировались на водосборе до или в течение изучаемого гидрологического события – фазы стока (половодье, паводок, межень) [13].

По данным ряда детальных исследований показано, что в условиях малого водосбора вклад «новой» воды нередко оставляет всего 50% и менее объема половодья или паводка. Большая часть дренируемой в этот период воды

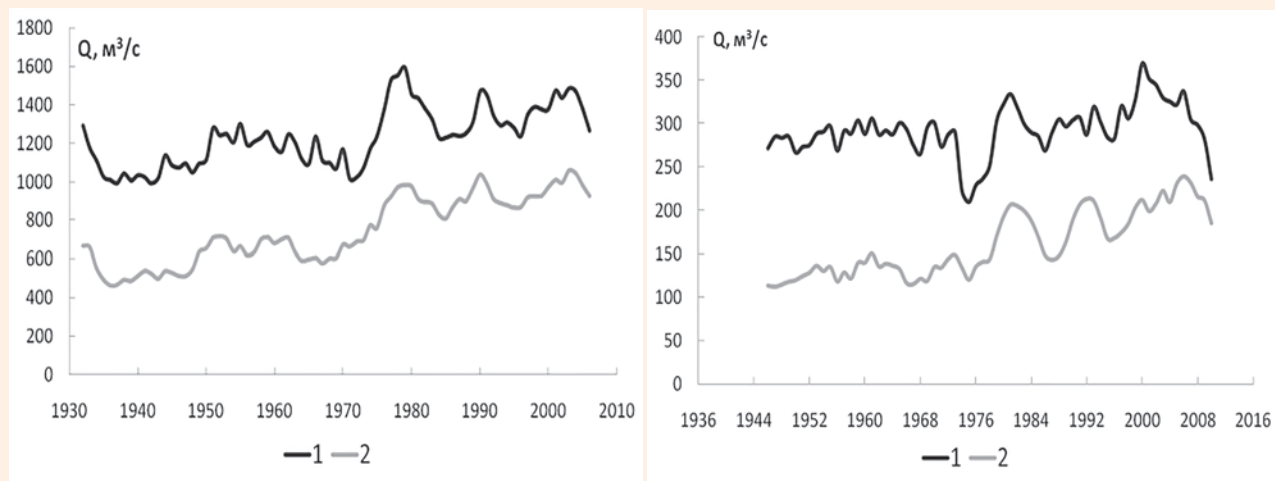


Рис. 4. Изменения величин годового стока (1) и среднего стока за зимнюю межень (2), сглаженные методом скользящего среднего с интервалом в 5 лет (слева р. Ока – г. Горбатов; справа р. Ока – г. Калуга)

сформировалась на водосборе до начала изучаемого гидрологического события. В частности, для отдельных водосборов с широким развитием многолетнемерзлых пород всего 20–50% весеннего половодья формируется талой водой снега текущего года [8]. Более того, в стоке воды летних паводков на мерзлотных водосборах доля «новой» воды составляет не более 20% [9, 10, 12].

Трассерными исследованиями установлено, что возраст воды в русловой сети может составлять нескольких десятилетий [11]. Такой средний возраст воды вполне реален, т.к. в русле доминирует «старая» вода, сформировавшаяся на водосборе до начала дождя или снеготаяния. Доля «старой» воды варьирует от 50 до 90% даже в случае быстрой реакции реки повышением уровня и расхода на текущее снеготаяние или выпадающие осадки.

Наблюдениями на Валдайском стационаре ГГИ установлено, что разгрузка подземных бассейнов в реки носит пульсирующий характер. Это обусловлено тем, что гидравлический импульс инфильтрационного питания водоносного горизонта (в весенний и осенне-зимний сезоны) вызывает гидравлический импульс поршневого вытеснения части подземных вод в реку. За счет передачи гидростатического давления происходит волновое вытеснение порции «старой» воды при сохранении баланса между объемами питания и разгрузки подземных и почвенных вод. Следовательно, изотопными исследованиями показано, что порция инфильтрационного питания подземных вод сохраняется (аккумулируется) в водоносном горизонте или зоне аэрации на месяцы и годы и вытесняется в речную сеть очередными импульсами питания [11].

Рассмотренная концепция степени участия различных генетических типов природных вод в формировании половодного и паводочного стока в бассейнах преимущественно малых рек подтверждается многочисленными детальными наблюдениями на небольших водосборах в различных ландшафтно-климатических зонах России. В результате установлено, что после снеготаяния в половодной волне доля подземного питания возрастает с 75 до 85% за счет снижения долей дождевого и почвенного питания, соответственно – с 20 до 15 и с 5 до 0%. С другой стороны, в последующий меженный период преобладает подземное питание. При последующем формировании паводков за счет затяжных дождей (осенний сезон или муссонный климат) вклад подземных вод снижается до 65% и менее с постепенным ростом дождевых и почвенных вод. На пике дождевых паводков доля подземной составляющей может снизиться до 5%, а почвенных вод возрасти до 65, дождевых – до 30% [4].

Приведенные непосредственные измерения степени участия различных генетических типов природных вод в формировании половодного и паводочного стока по репрезентативным бассейнам малых рек России согласуются с рассмотренными особенностями формирования годового и сезонного стока под влиянием современных климатических условий в различных ландшафтных зонах. Количественные соотношения различных по возрасту склонового, почвенного и подземного стока поступают в русловую сеть в импульсном режиме, что может служить обоснованием наблюдаемых особенностей формирования сезонного стока. В частности, существенное увеличение зимнего стока обусловлено именно таким режимом разгрузки

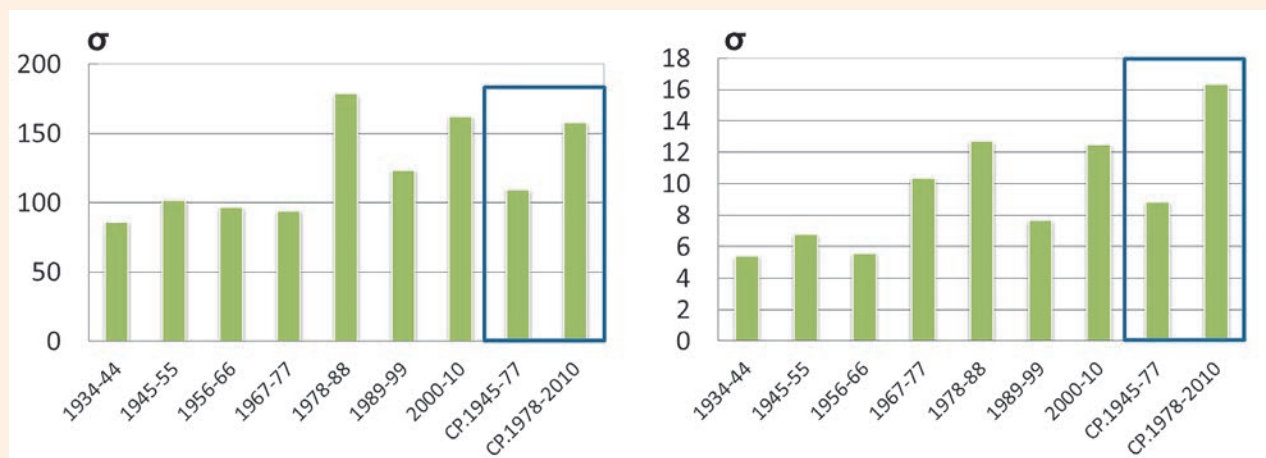


Рис. 5. Среднеквадратические отклонения за 11-летние периоды с выделением периодов до и после 1978 г.: слева – р. Ока – г. Горбатов; справа – р. Хопер – х. Бесплемяновский

почвенных и подземных вод, которые получают дополнительное питание при частых оттепелях и слабом промерзании зоны аэрации [7].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

- в последние десятилетия (с 1978 г.) происходят существенные увеличения стокообразующих климатических показателей (суммы положительных температур и количества осадков особенно жидких за холодный период), что неизбежно привело и скажется в дальнейшем на внутригодовой неравномерности стока рек и увеличении зимнего меженного стока;
- выполненный корреляционный анализ стоковых и метеорологических характеристик позволил выявить изменение физики формирования зимнего и минимального месячного стока в различных ландшафтно-климатических зонах за 30-летние и декадные периоды, прежде всего, за счет оттепелей, которые снижают величину снегозапасов, пополняя ресурсы подземных вод;

– наблюдаемые гидрофизические процессы приводят к увеличению за последние 25–30 лет естественных (возобновляемых) ресурсов подземных вод. Статистический анализ полученных величин свидетельствует о значимом их росте от 15–30% для водосборов северных рек до 70–100% для рек южного склона европейской России;

– рассмотрена степень участия различных генетических типов природных вод в формировании половодного и паводочного стока. Приведены количественные соотношения склонового, почвенного и подземного стока в определенные фазы гидрологического режима рек в различных ландшафтно-климатических условиях России. Данная концепция гидрологического режима стока согласуется с рассмотренными особенностями формирования годового и сезонного стока на малых водосборах в современных климатических условиях. Увеличение зимнего стока обусловлено именно импульсным режимом разгрузки почвенных и подземных вод, которые получают дополнительное питание при частых оттепелях и слабом промерзании зоны аэрации. ¹⁰⁰

Литература

1. Богданова Э.Г., Мещерская А.В. Оценка влияния потерь на смачивание на однородность рядов годовых сумм осадков // Метеорология и гидрология. 1998. № 11. С. 88–99.
2. Борзенкова А.В., Шмакин А.Б. Изменения толщины снежного покрова и суточной интенсивности снегопадов, влияющие на расходы по уборке магистралей в российских городах // Лед и снег. 2012. № 2. С. 59–70.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. 1008 с.
4. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шапов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. М.: Росгидромет. 2016. 67 с.
6. Кокорин А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2014. 80 с.
7. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование / Под ред. Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой. М.: ГЕОС. 2015. 320 с.

8. Boucher J. L., and Carey S. K. Exploring Runoff Processes Using Chemical, Isotopic and Hydrometric Data in a Discontinuous Permafrost Catchment // Hydrology Research. 2010. V. 41. No. 6. P. 508–519.
9. Carey S.K, Quinton W.L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data // Nordic Hydrology. 2004. V. 35. P. 309–324.
10. Carey S.K, Quinton W.L. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment // Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 95–114.
11. Kirchner J.W. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry // Hydrological Processes. 2003. V. 17. P. 871–874.
12. McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D. Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques // Water Resources Research. 1997. V. 33 (70). P. 1707–1720.
13. Pinder G. F., Jones J. F. () Determination of the Groundwater Component of Peak Discharge from the Chemistry of Total Runoff: Water Resources Research. 1969. V. 5 № 2. P. 438–445.
14. Изменение климата России. Доступно на: <http://climatechange.igce.ru/> (обращение 29.03.2016).

UDC 556.3:556.338:556.182

R.G. Dzamalov, Doctor of Geology and Mineralogy Sciences, Head of Laboratory of the Institute of Water Problems RAS¹, roald@iwp.ru
T.I. Safronova, Lead Engineer of the Institute of Water Problems RAS¹, tisafr@iwp.ru
E.A. Telegina, Researcher of the Institute of Water Problems RAS¹

¹Institute of Water Problems RAS. 3 Gubrin street, Moscow, 119333, Russia.

Long-term Quasi-periodicity of the Underground and Surface Runoff of the Rivers of Russia

Abstract. Different variants of the correlation connection of the river runoff with the main forming meteorological factors over the past decades have been considered, which made it possible to quantify the changes in the genesis of water resources, the average annual and seasonal runoff. This made it possible to establish not only synchronism, but also the periodicity in changing the values of the runoff, the amount of precipitation and the mean temperature

Keywords: water resources; river runoff; climate; periodicity; cyclicity; precipitation; temperature; snow cover

References

1. Bogdanova E.G., Meshcherskaia A.V. *Otsenka vliianiia poter' na smachivanie na odnorodnost' riadov godovykh summ osadkov* [Assessment of the influence of losses on wetting on the homogeneity of the series of annual precipitation amounts]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1998, no. 11, pp. 88–99.
2. Borzenkova A.V., Shmakina A.B.. *Izmeneniia tolshchiny snezhnogo pokrova i sutochnoi intensivnosti snegopadov, vliiaushchie na raskhody po uborke magistrali v rossiiskikh gorodakh* [Changes in the thickness of the snow cover and the daily snowfall intensity, which affect the costs of cleaning the highways in Russian cities]. *Led i sneg* [Ice and snow], 2012, no. 2, pp. 59–70.
3. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniakh klimata i ikh posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences in the Territory of the Russian Federation]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2014, 1008 p.
4. Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. *Razdelenie gidrografa stoka na geneticheskie sostavliaiushchie* [Separation of drain hydrograph into genetic components]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2015, no. 3, pp. 97–108.
5. *Doklad ob osobennostiakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2015 god* [Report on the peculiarities of climate in the territory of the Russian Federation for 2015]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2016, 67 p.
6. Kokorin A.O. *Izmenenie klimata: obzor Piatogo otsenochnogo doklada MGEIK* [Climate Change: Review of the IPCC Fifth Assessment Report]. Moscow, WWF Publ., 2014, 80 p.
7. *Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod Evropeiskoi chasti Rossii: formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* [Modern resources of underground and surface waters of the European part of Russia: formation, distribution, use]. Edited by R.G. Dzhamalov, N.L. Frolova. Moscow, GEOS Publ., 2015, 320 p.
8. Boucher J. L., and Carey S. K. Exploring Runoff Processes Using Chemical, Isotopic and Hydrometric Data in a Discontinuous Permafrost Catchment. Hydrology Research. 2010. V. 41. No. 6. P. 508–519.
9. Carey S.K, Quinton W.L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data. Nordic Hydrology. 2004. V. 35. P. 309–324.
10. Carey S.K, Quinton W.L. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment. Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 95–114.
11. Kirchner J.W. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. Hydrological Processes. 2003. V. 17. P. 871–874.
12. McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D. Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques. Water Resources Research. 1997. V. 33 (70). P. 1707–1720.
13. Pinder G. F., Jones J. F. Determination of the Groundwater Component of Peak Discharge from the Chemistry of Total Runoff: Water Resources Research. 1969. V. 5 No. 2. P. 438–445.
14. *Izmenenie klimata Rossii* [Climate change in Russia.]. Available at: <http://climatechange.igce.ru/> (accessed 29 March 2016).