

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА ВОЛГИ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI вв.

© 2019 г. В. В. Попова*, Е. Д. Бабина, А. Г. Георгиади

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: valeria_popova@mail.ru, *e-mail: popova@igras.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2018 г.; после доработки 23.02.2019 г.; принята в печать 04.04.2019 г.

Рассматривается связь стока Волги с изменением значимых для речного стока климатических факторов с середины XX в. Полученные количественные оценки вклада аномалий осадков (с учетом твердой и жидкой фазы) в изменчивость годового стока Волги показывают, что ведущая роль твердых осадков отмечается в период, предшествующий современному потеплению (с начала 1950-х до середины 1970-х годов), а также с середины 1990-х годов, с наступлением паузы в потеплении. С середины 1970-х до 1990-х годов, в период роста зимней температуры наблюдается существенное увеличение вклада жидких осадков и их доминирование в изменчивости стока Волги. Различия между указанными периодами заметны и в структуре атмосферных осадков, выраженной в доле жидких осадков в годовой сумме, что, в свою очередь, оказывает неоднозначное влияние на весенний сток Волги. Совпадающие по знаку многолетние тенденции весеннего стока и доли жидких осадков (в годовой сумме) до и после середины 1970-х годов наблюдаются на фоне обратной зависимости между аномалиями этих параметров в межгодовом масштабе, что свидетельствует о снижении объемов стока половодья в годы увеличения доли жидких осадков.

Ключевые слова: атмосферные осадки, твердая и жидкая фаза, температура, бассейн Волги, годовой и сезонный сток, изменения, множественная пошаговая регрессия, вклад в изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>

ВВЕДЕНИЕ

Обобщение пространственных и временных вариаций климатических характеристик приводит к выводу о значительных изменениях, которые для территории России за последние 30–40 лет в целом характеризуются увеличением температурного фона зимы и лета более, чем на 1°C, и ростом количества осадков на большей части территории [4]. В то же время эти изменения связаны с существенной региональной и временной неоднородностью, обусловленной прежде всего вариациями режима крупномасштабной атмосферной циркуляции, которые достаточно четко проявляются в темпах современного потепления на севере Евразии в зимний сезон [10]. В изменениях средней температуры приземного воздуха на севере Евразии выделяются несколько этапов, включающих период, предшествующий потеплению – 1950–1970-е годы, затем быстрый рост зимней температуры с конца 1960-х – начала 1970-х годов и его замедление, или “пауза в потеплении” [14, 15, 18] – с середины 1990-х. С точки зрения крупномасштабной атмосферной циркуляции эти этапы связаны с процессами усиления или ослабления зональной циркуляции [10].

Активизация меридиональной циркуляции [10], наблюдавшаяся в 1950–1960 гг., сменилась в начале 1970-х годов ростом интенсивности зонального переноса, связанным с положительной фазой Североатлантического колебания. С середины 1990-х годов вновь возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, которая в этот период, в отличие от 1950–1960 гг., связана с полярными широтами Атлантики и прилегающим сектором Северного Ледовитого океана и арктического побережья. Об этом свидетельствует увеличение повторяемости арктических вторжений и аномально холодных зим на севере Евразии, которое связывают с сокращением площади арктических морских льдов [16, 17], а также с перераспределением температуры поверхности Тихого океана [14, 18]. Изменения режима крупномасштабной циркуляции, в свою очередь, сопровождаются аномалиями температуры и осадков [10, 11] и могут приводить к существенным трансформациям режима тепло-влажностной обеспеченности крупных регионов и повлечь за собой ощутимые последствия для природной среды и общества.

Бассейн Волги “интегрирует” климатические изменения на территории, охватывающей

большую часть Европейской России, и отражает вклад меняющихся климатических параметров в изменчивость стока и влияние на ее структуру в период потепления климата. Основным фактором изменчивости речного стока, безусловно, является приходная составляющая его баланса, т.е. атмосферные осадки. В климатических условиях умеренных широт, как известно, роль осадков в формировании речного стока может значительно различаться в зависимости от их состояния. Консервация осадков в виде снега в течение зимних месяцев и весеннее снеготаяние обеспечивает недостаточное увлажнение в удаленных от океана регионах России. Как правило, вклад снеготаяния, или твердых осадков, в формирование годового суммарного стока является основным для большинства крупных речных бассейнов России. Связанное с современным потеплением изменение термического режима, сопровождающееся частыми оттепелями, уменьшением промерзаемости почв и сокращением периода залегания снежного покрова, способно существенно изменить структуру стока. Об этом свидетельствует существенный, более 50%, рост зимнего стока на ЕТР от верхней части бассейна Северной Двины до низовьев Дона и Волги [4, 6]. Изучение влияния изменений климата на водный режим и сток Волги [1] показывает, что на фоне снижения стока весеннего половодья наблюдается рост (до 50–100%) межлетнего стока в южной части бассейна Верхней Волги в 1980–2005 гг., что вносит существенный вклад в увеличение водных ресурсов и не имеет аналогов в XX в. По результатам исследования однородности многолетних рядов зимнего стока Волги [3] сделан вывод о ее нарушении вследствие повышения температуры зимних месяцев и предложено использовать температуру в качестве предиктора для прогноза объемов зимнего минимального стока.

Остается открытым вопрос о сопоставлении вклада разных климатических факторов, прежде всего, осадков с учетом их количества в жидкой и твердой фазах, а также температуры в изменении стока Волги, наблюдаемые с середины прошлого столетия. Это составляет цель данной работы, ее достижение предполагает решение нескольких задач. В первую очередь, это получение сравнительных количественных оценок вкладов перечисленных климатических характеристик в изменчивость сезонного и суммарного (годового) стока. Получение таких оценок для разных временных отрезков позволяет проследить их возможные вариации в зависимости от этапа современного потепления климата. Важным аспектом этой задачи является оценка вклада твердых и жидких осадков в изменчивость стока разного временного масштаба, включая многолет-

ние тенденции, квазипериодические колебания и экстремумы. Особое место занимает изучение зависимости между многолетними изменениями и экстремумами максимального (весеннего) стока и аномалиями сумм жидких осадков, рост которых является закономерным следствием потепления зимнего сезона.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для изучения многолетней изменчивости стока Волги (в створе Волгограда) использованы многолетние ряды восстановленного условно-естественного годового и сезонного стока [5]. Они включают наблюдаемые многолетние данные, относящиеся к периоду до начала заметного воздействия антропогенных факторов, прежде всего водохранилищ, до 1930 г., и ряд восстановленных значений стока, т.е. “очищенных” от влияния антропогенных факторов, после 1930 г.

Для анализа годовых сумм жидких и твердых осадков рассматривались два варианта данных: I, скорректированный архив данных о твердых и жидких осадках с введением всех видов поправок, представленный на сайте ВНИИГМИ (<http://www.meteo.ru/data/506>), и II, рассчитанные непосредственно из суточных данных об осадках и температуре приземного воздуха из архива ВНИИГМИ (<http://www.meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>) за 1950–2010 гг. В случае архива I корректировка рядов стационарных данных об осадках проводилась по методике, описанной в [2], с целью устранения известных неоднородностей в измерениях на станциях (замена дождемеров на осадкомеры в 1950–1951 гг. и введение поправок на смачивание с 1966 г.), а также для учета ветрового перераспределения. Следует отметить, что если методика введения поправок, связанных с нарушениями однородности в рядах осадков, уже давно признана, то корректировка на ветровой недоучет связана с существенной неопределенностью и до сих пор вызывает дискуссии [4].

При формировании архива II для определения годовых сумм осадков в жидкой и твердой фазе осадки считались “жидкими”, когда средняя суточная температура превышала +1°C и затем суммировались по гидрологическому году, т.е. с октября по сентябрь. Пороговое значение температуры установлено по результатам моделирования снежного покрова и его верификации для разных физико-географических условий [13]. Очевидно, что осадки в твердом виде могут выпадать и при более высоких положительных температурах, но в этом случае чаще всего происходит одновременное снеготаяние. Таким образом, “двойной учет” осадков вряд ли возможен, или ничтожно мал.

Помимо осадков в разных фазах, оценивалась связь годового стока с температурой приземного воздуха в среднем за декабрь–март, а также для месячных значений с июля до октября из архива CRUTEM4.6.0.0 (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature), осредненной по площади бассейна.

Изучение связи многолетних рядов твердых и жидких осадков, а также средней летней температуры с годовым стоком проводилось методами статистического анализа, который включал несколько этапов. На первом этапе проводился расчет коэффициентов линейной корреляции многолетних колебаний годового стока с твердыми и жидкими осадками на каждой станции в пределах бассейнов. Построение полей этих коэффициентов (рис. 1) позволило выявить основные очаги связи, или “области влияния”, находящиеся в пределах статистически значимой (± 0.28 , при $p < 0.05$) корреляции. Сравнение полученных полей корреляции для двух, упомянутых выше архивов данных об осадках, обозначенных как I и II, свидетельствует о сходстве в распределении областей статистически значимой корреляции годового стока с годовыми суммами жидких осадков (рис. 1б, г) – в обоих случаях область питания располагается в восточной части бассейна, хотя в первом случае она уступает по площади и тесноте связи. Существенные различия отмечаются в случае твердых осадков (рис. 1а, в). Результаты, полученные с применением данных из архива I, показывают, что область влияния сосредоточена в северной части Верхней Волги, а в случае архива II она распространяется на большую часть водосбора, включая Среднюю и отчасти Верхнюю Волгу, а также целиком бассейны Камы и Белой, где наблюдается наиболее тесная корреляция. Известно, что именно эта часть бассейна, располагающаяся в предгорьях Уральских гор, благодаря рельефу и положению вблизи климатического максимума снеготопления [12], является основной областью питания Волги [7, 8]. В результате, исходя из распределения и тесноты корреляции осадков со стоком, был сделан вывод о том, что данные из архива II лучше описывают изменения осадков, значимые для формирования стока. Дальнейший анализ проводился с применением данных из архива II. Путем осреднения входящих в области влияния рядов метеостанций были получены многолетние ряды годовых сумм твердых и жидких осадков.

Вследствие значительных пространственных масштабов изменчивости температуры, вариации приземной температуры в пределах водосбора Волги оказались несущественными, поэтому при изучении влияния изменений температуры приземного воздуха на сток рассматривались осредненные по площади бассейна многолет-

ние ряды. Значимая корреляция была выявлена для температуры зимних месяцев (декабрь–март) и августа предшествующего года.

Следующий этап заключался в расчете регрессионных зависимостей между рядами стока (сезонного и годового) и климатическими параметрами. Устанавливались как индивидуальные зависимости для твердых, жидких осадков и температуры, так и множественные, позволяющие учитывать независимый вклад каждого из этих параметров. Для получения оценок независимого вклада разных климатических параметров применялся метод пошаговой множественной регрессии, которая позволяет оценивать общую изменчивость стока и каждого из рассмотренных факторов с учетом низкочастотной составляющей, т.е. тренда. Параметры множественной регрессионной зависимости рассчитывались для сезонного и годового стока. Для выявления изменений в соотношении вкладов твердых и жидких осадков и их влияния на изменчивость стока Волги в период потепления рассматривались оценки регрессионной зависимости годового стока от климатических параметров для разных временных отрезков, а также зависимости между объемами стока (годового и весеннего) и многолетними изменениями доли жидких осадков в годовой сумме.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОЦЕНКИ ВКЛАДА КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТОКА ВОЛГИ

Оценки корреляции изменений годового стока Волги с осадками разных фракций (см. рис. 1а, б) за 1950–2006 г. указывают на его более тесную связь с твердыми осадками, причем в этом случае область значимой статистической связи распространяется с востока почти до верхней Волги. В случае жидких осадков величина коэффициентов корреляции не превышает 0.3–0.4, а область “влияния” ограничивается бассейном Камы.

Значение этой части водосбора в формировании стока Волги, обусловленное физико-географическими и климатическими особенностями, хорошо известно [7, 8]. Также известно, что существенная роль в формировании стока крупных водосборов принадлежит влагосодержанию грунтов и уровню грунтовых вод, которые отражают общее увлажнение бассейна, складывающееся под влиянием предшествующих лет. Об этом свидетельствует форма автокорреляционной функции стока Волги со значимым пиком на сдвиге 1 год [9]. Косвенно оценить это влияние позволяет значимая корреляция стока с осадками, а также температурой лета – начала осени предшествующего года. Для осадков

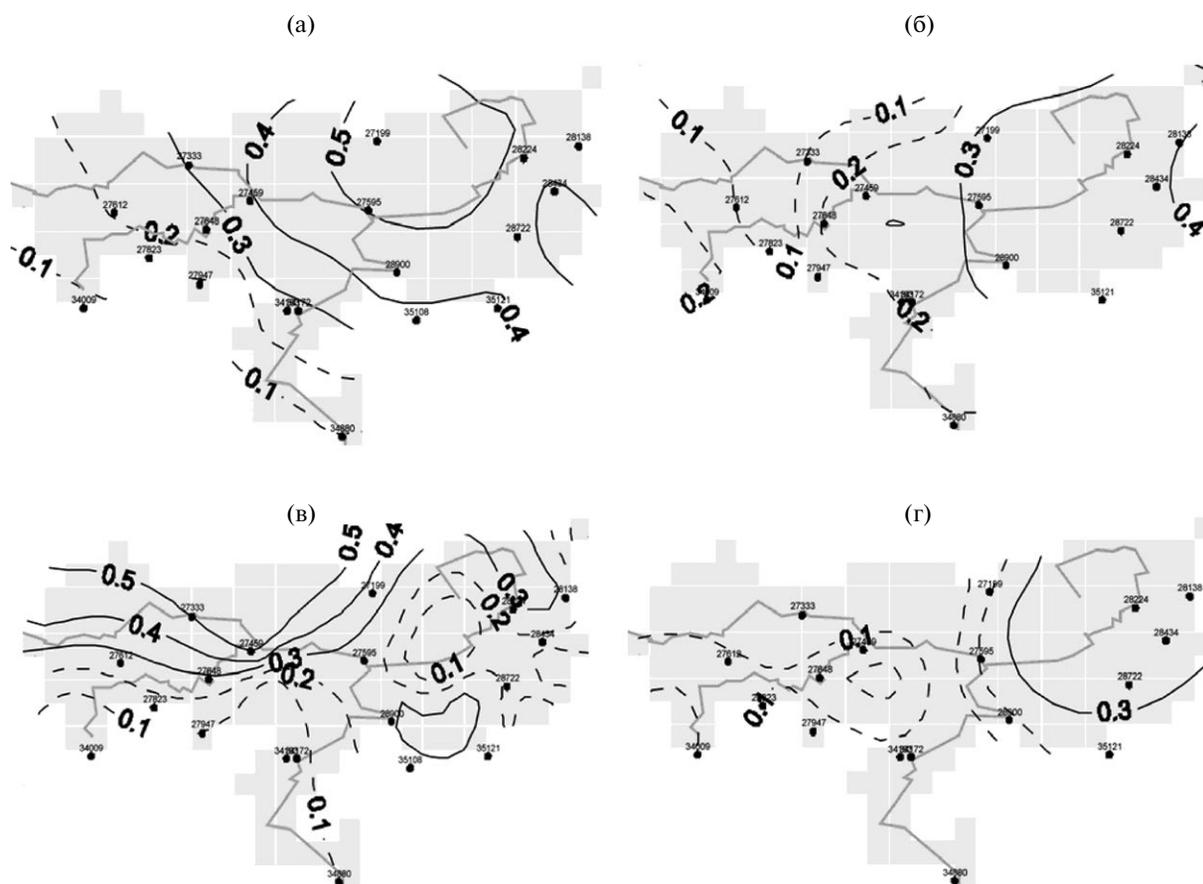


Рис. 1. Корреляция годового стока Волги с твердыми (а, в) и жидкими (б, г) осадками (1951–2006 гг.); в, г – получено по данным из архива I (скорректированные всеми видами поправок [2], ВНИИГМИ); а, б – получено по данным из архива II (рассчитанные на основе суточных данных об осадках и температуре из архива ВНИИГМИ). Пунктиром показаны статистически незначимые (при $p > 0,05$) коэффициенты корреляции.

(твердых и жидких) в целом за 1951–2006 гг. она не превышает 0.3–0.4 и отмечается на небольшой территории средней и нижней Камы.

Сравнительный вклад указанных факторов стока в его изменчивость, выявленных путем регрессионного анализа (по методу пошаговой множественной регрессии), показывает, что наиболее полно, на 65%, можно объяснить колебания годового стока (табл. 1). Основная роль в формировании годового стока Волги, как большинства крупных речных бассейнов России, принадлежит зимней аккумуляции снега, т.е. твердым осадкам. Согласно регрессионным оценкам, их вклад в изменчивость годового стока составляет 40%, что существенно превышает вклад жидких осадков, который составляет 26% с учетом текущего и предшествующего года (16% и 10% соответственно).

Сравнение многолетнего хода годового стока Волги с рассчитанным на основе выявленной регрессионной зависимости (см. табл. 1) показывает достаточно близкое его воспроизведение (рис. 2). Наиболее точно регрессионная модель передает 5–10 летние флуктуации

и тренд 1952–2006 гг., хотя максимумы (1990, 1994, 2002 гг.) и минимумы стока (1975–1977, 1996 гг.), как правило, оказываются недооцененными. Вероятно, что частично эти расхождения связаны с нарушениями однородности в рядах, о которых упоминалось выше. Скорость роста объемов стока в 1975–1995 гг., в период резкого потепления, для рассчитанного ряда ($15 \text{ км}^3/10 \text{ лет}$) несколько ниже по сравнению с наблюдениями $18 \text{ км}^3/10 \text{ лет}$, но разница не выходит за пределы погрешности (см. табл. 1).

При рассмотрении хода наблюдаемого годового стока и его зависимости от выявленных выше основных факторов (см. табл. 1, рис. 2) для периодов, соответствующих разным фазам современного потепления, в соответствии с изменениями зимней температуры на севере Евразии (1951–1975, 1976–1995 и 1995–2006 гг.) показывает, что они различаются по соотношению вклада в изменчивость стока жидких и твердых осадков. Регрессионные оценки, выполненные для каждого из указанных периодов, показывают, что в 1976–1995 гг. доля вклада жидких

Таблица 1. Множественная регрессионная зависимость годового и сезонного стока Волги от климатических параметров в 1951–2006 гг.

| Климатические параметры | Параметры множественной регрессии | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------|--|--|-----------|------------------------|------------------------|
| | Коэффициент регрессии B | Погрешность | Коэффициент корреляции R (накопленный) | Доля объясненной изменчивости R^2 % (накопленная и индивидуальная) | | Критерий Стьюдента t | Уровень значимости p |
| Год (1951–2006) | | | | | | | |
| $P_{ТВ}$ | 0.47 | 0.08 | 0.63 | 40 | 40 | 5.59 | 0.00 |
| $P_{ж}$ | 0.23 | 0.05 | 0.75 | 56 | 16 | 4.58 | 0.00 |
| $P_{ж}(\tau = -1)$ | 0.17 | 0.05 | 0.81 | 65 | 10 | 3.19 | 0.00 |
| Год (1951–1975), (1996–2006) | | | | | | | |
| $P_{ТВ}$ | 0.50 | 0.09 | 0.72 | 52 | 52 | 5.52 | 0.00 |
| $P_{ж}$ | 0.24 | 0.07 | 0.80 | 64 | 12 | 3.33 | 0.00 |
| $T_{авг}(\tau = -1)$ | -7.48 | 2.67 | 0.85 | 73 | 8 | -2.80 | 0.01 |
| Год (1976–1995) | | | | | | | |
| $P_{ж}$ | 0.27 | 0.07 | 0.65 | 42 | 42 | 3.66 | 0.00 |
| $P_{ж}(\tau = -1)$ | 0.25 | 0.07 | 0.80 | 64 | 22 | 3.57 | 0.00 |
| $P_{ТВ}$ | 0.42 | 0.16 | 0.86 | 74 | 11 | 2.65 | 0.02 |
| Весна | | | | | | | |
| $P_{ТВ}$ | 0.39 | 0.08 | 0.61 | 37 | 37 | 5.01 | 0.00 |
| $T_{авг}(\tau = -1)$ | -4.99 | 2.32 | 0.67 | 45 | 8 | -2.15 | 0.04 |
| $P_{ж}(\tau = -1)$ | 0.06 | 0.05 | 0.69 | 47 | 2 | 1.36 | 0.13 |
| Лето–осень | | | | | | | |
| $P_{ж}$ | 0.16 | 0.02 | 0.74 | 55 | 55 | 8.24 | 0.00 |
| $P_{ж}(\tau = -1)$ | 0.05 | 0.02 | 0.78 | 60 | 5 | 2.90 | 0.01 |
| Зима | | | | | | | |
| $P_{ж}(\tau = -1)$ | 0.08 | 0.02 | 0.61 | 37 | 37 | 4.26 | 0.00 |
| $T_{зима}$ | 8.11 | 3.58 | 0.70 | 49 | 12 | 2.26 | 0.00 |
| $T_{авг}(\tau = -1)$ | -2.00 | 0.83 | 0.72 | 53 | 4 | -2.35 | 0.05 |

$P_{ТВ}$ – твердые осадки; $P_{ж}$, $P_{ж}(\tau = -1)$ – жидкие осадки текущего и предшествующего года; $T_{авг}(\tau = -1)$ – температура августа предшествующего года, $T_{зима}$ – средняя температура за декабрь–февраль.

осадков в изменчивость стока выросла до 42% и с учетом осадков предшествующего года (22%) существенно превысила вклад твердых осадков, который сократился до 11%. В период, предшествующий потеплению (1951–1975 гг.), а также в 1996–2006 гг., в период “паузы в потеплении”, ведущая роль в изменчивости стока (52%) принадлежит твердым осадкам, вклад жидких осадков составляет всего 12%. При этом состояние бассейна в предшествующий год проявляется не в аномалиях осадков, а в аномалиях средней по площади температуры воздуха в конце лета, хотя ее вклад в изменчивость стока невысок и составляет около 8%.

Очевидно, обратная связь с температурой августа предшествующего года в этом случае отражает влияние увлажнения бассейна в конце

лета на формирование весеннего стока. Так же, как и для годового стока, оно оценивается в 8%. Основной вклад в изменчивость весеннего стока (37%) вносят твердые осадки, но в целом изменчивость весеннего стока может быть объяснена только на 45%.

В изменчивости зимнего стока влияние температурного режима наиболее заметно, его вклад достигает 12% (см. табл. 1). Это положительная связь, обусловленная, главным образом, состоянием бассейна в зависимости от степени промерзания. Основную роль в изменчивости зимнего стока играют жидкие осадки предшествующего года с вкладом 37%. Сток летне-осеннего сезона (см. табл. 1) на 55% зависит от жидких осадков, около 5% его изменчивости может быть связано с увлажнением бассейна в предшествующий

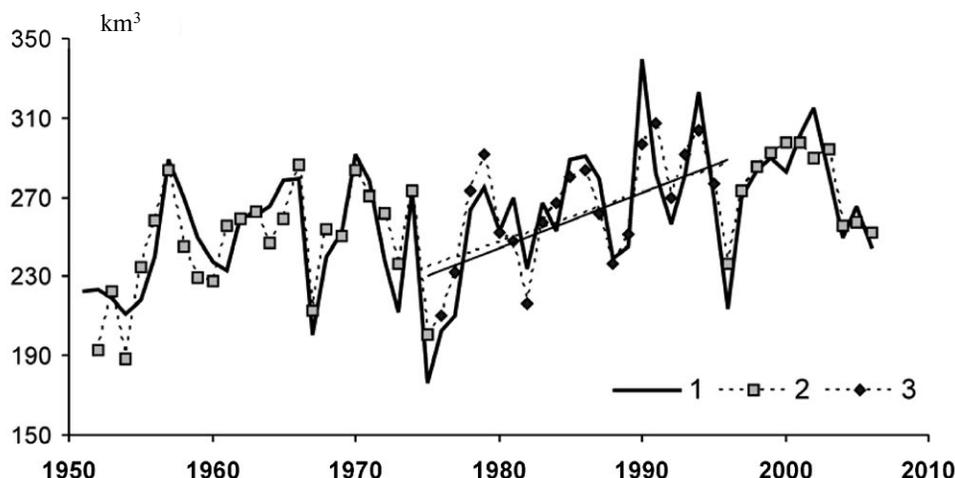


Рис. 2. Изменения наблюдаемого годового (условно естественного) стока Волги в 1951–2006 гг. (1) и рассчитанного на основе регрессионной зависимости (табл. 1) за 1951–1975, 1996–2006 гг. (2) и за 1976–1995 гг. (3). Прямыми линиями обозначены линейные тренды наблюдаемого и рассчитанного стока.

Таблица 2. Корреляция между соотношением годовых сумм жидких осадков к сумме твердых и жидких (P_L/P_S+P_L) и характеристиками стока Волги (Волгоград) – годовым стоком, R , весенним, R_{spr} , и их соотношением в 1951–2006 гг.

| Характеристики стока | R_{ann} | R_{spr} | R_{spr} / R_{ann} |
|----------------------|-----------|--------------|---------------------|
| P_L/P_S+P_L | –0.16 | –0.38 | –0.50 |

Выделены статистически значимые (при $p < 0.05$) коэффициенты корреляции.

теплый период. Влияние предшествующего холодного сезона, т.е. вклад твердых осадков, в летне-осеннем стоке не проявляется.

ИЗМЕНЕНИЕ ДОЛИ ЖИДКИХ ОСАДКОВ И ЕГО СВЯЗЬ С ФОРМИРОВАНИЕМ ЭКСТРЕМУМОВ СТОКА ВОЛГИ

Приведенные оценки (см. табл. 1) показывают, что вклад твердых и жидких осадков в изменчивость годового стока может меняться от периода к периоду в зависимости от температурного режима. В частности, об этом свидетельствует доминирование в изменчивости годового стока Волги жидких осадков – в период роста зимней температуры 1976–1995 гг., и твердых осадков – в период, предшествующий потеплению 1951–1975 гг. и относительного похолодания 1995–2006 гг. Зависимость между годовым стоком и долей жидких осадков в годовой сумме всех осадков имеет отрицательный знак, но статистически незначима (рис. 3а, табл. 2). Знак связи, по-видимому, отражает значительную долю весеннего стока в годовом стоке и его отрицательную зависимость от доли жидких осадков, которая отчетливо видна на рис. 3б.

Сравнение многолетних (от 10 лет и более) тенденций весеннего стока Волги и доли жидких осадков в годовой сумме (рис. 4) за рассматри-

ваемый период в целом позволяет говорить об их совпадении. Уменьшение средних пятилетних объемов стока с середины прошлого столетия до середины 1970-х годов происходило на фоне сокращения доли жидких осадков (по отношению к сумме твердых и жидких), которое в 1976–2001 гг. сменилось ростом и сопровождалось увеличением весеннего, а также годового стока, что отмечалось выше (см. рис. 2). С середины 1990-х годов тенденция вновь меняется на противоположную. Как в отношении доли жидких осадков, так и в многолетнем ходе максимумов (минимумов) стока наблюдается обратная зависимость, которая выражается статистически значимой (при $p = 0.01$) отрицательной корреляцией (–0.38) между этими параметрами (табл. 2), и еще более тесной связью того же знака (–0.50) между долей жидких осадков и соотношением весеннего и годового стока (табл. 2). Это означает, что в те годы, когда доля жидких осадков превышает среднее многолетнее значение (т.е. $P_L/P_S+P_L > 0.63$), повторяемость экстремально высоких объемов половодья (превышающих величину стандартного отклонения), в два раза ниже по сравнению с годами с дефицитом жидких осадков ($P_L/P_S+P_L \leq 0.63$).

Очевидно, выявленные зависимости свидетельствуют о снижении пиков половодья в период современного потепления, связанным с со-

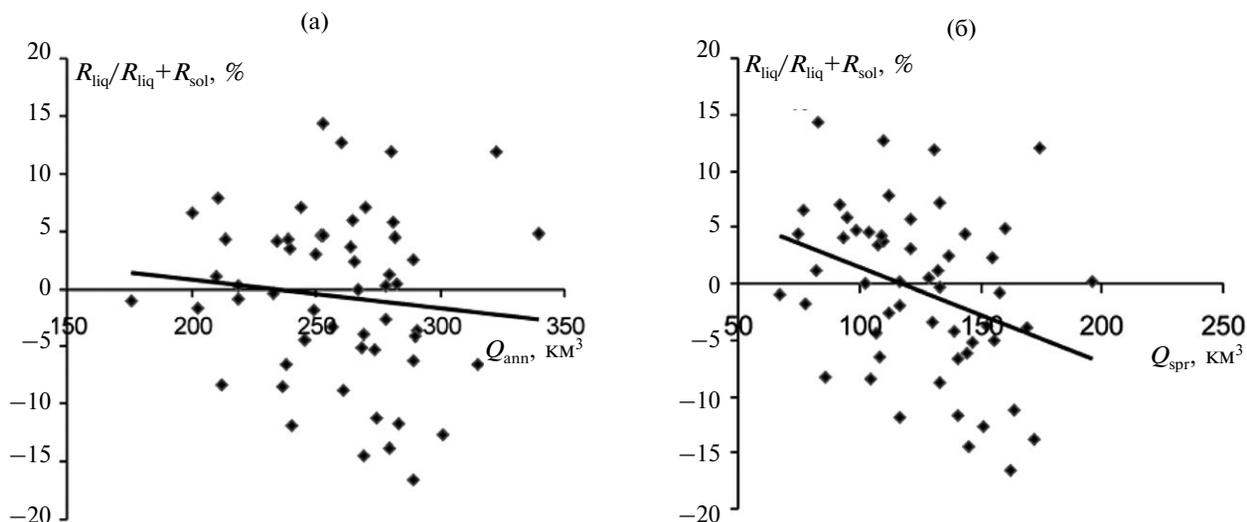


Рис. 3. Зависимость между аномалиями доли жидких осадков (% , относительно годовой суммы жидких и твердых осадков) и стоком Волги, км³, годовым (а) и весенним (б).

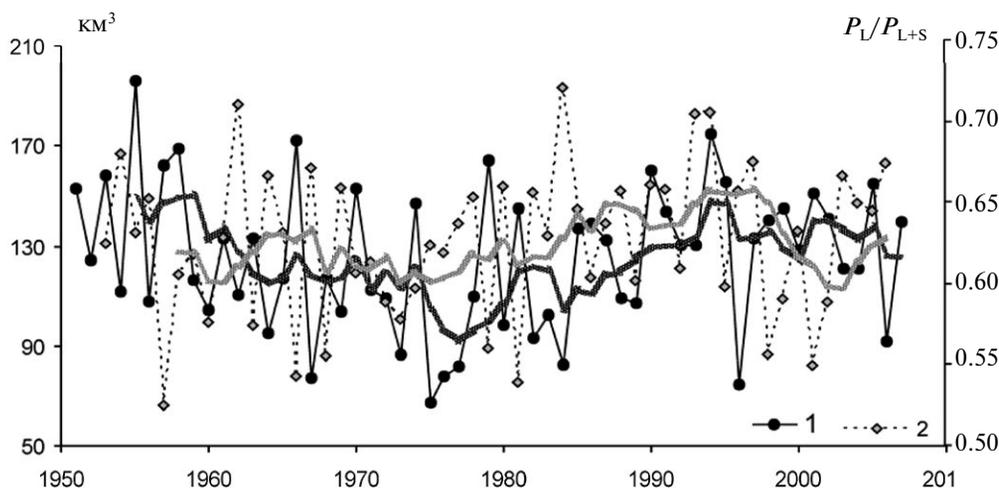


Рис. 4. Изменение условно естественного весеннего стока Волги, км³ (1) и доли годовых сумм жидких осадков по отношению к сумме твердых и жидких P_L/P_{L+S} , (2) в 1950–2006 гг. Показаны годовые (1, 2) и 5-летние скользящие значения стока (темная жирная кривая) и доли годовых сумм жидких осадков по отношению к сумме твердых и жидких (светлая жирная кривая).

крашением доли твердых осадков и их вклада в изменчивость весеннего и годового стока (и наоборот). Исключение составляют годы с аномалиями годовых сумм осадков, обусловленными избытком (дефицитом) осадков, как в жидкой, так и в твердой фазе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ связи изменчивости годового и сезонного стока Волги (в замыкающем створе) и основных, значимых для стока, климатических характеристик, выполненный с применением пошаговой множественной регрессии, позволяет получить сравнительные оценки вклада основных климатически обусловленных факторов

стока, в частности, осадков (с учетом их сумм в жидкой и твердой фазах) и температуры, в наблюдаемые с середины прошлого столетия изменения стока Волги. В целом за рассматриваемый период (1951–2006 гг.) изменчивостью указанных климатических характеристик можно объяснить 50–70% общей изменчивости стока, включая многолетние тенденции, флуктуации (с периодом менее 10 лет) и межгодовые колебания. Учитывая размеры водосбора и сложные процессы, связанные с подземным стоком и перераспределением поверхностного стока внутри бассейна, можно заключить, что, несмотря на усиливающееся с середины прошлого столетия влияние хозяйственной деятельности (в первую очередь, гидротехнических сооружений

и изъятия стока на водопотребление), многолетняя изменчивость стока Волги определяется климатическими изменениями. Очевидно, что основное влияние связано с колебаниями осадков, при этом оставался невыясненным вопрос о соотношении вкладов осадков в жидкой и твердой фазах. Проведенный анализ позволил получить сравнительные количественные оценки вклада указанных параметров.

Изменчивость осадков в жидкой фазе на 60% определяют колебания летне-осеннего стока. Она также играет основную роль (37%) в изменениях зимнего стока следующего года, наряду с температурой зимних месяцев, которая объясняет около 12% изменчивости зимнего стока. В случае зимнего стока оценка вклада температуры, очевидно, отражает косвенное влияние термического режима, обусловленное сокращением промерзания почвы и выпадением осадков в жидкой фазе, что характерно для юга и юго-запада бассейна Волги в условиях современного зимнего потепления.

В изменчивости годового стока за 1951–2006 гг. в целом вклад жидких осадков в изменчивость годового стока, с учетом осадков предшествующего года, составляет 26%, ведущая роль (40%) принадлежит осадкам в твердой фазе. Причем колебания весеннего стока только на 37% объясняются твердыми осадками, что кажется неожиданным результатом, поскольку формирование весеннего стока в первую очередь связано с аккумуляцией снега в течение зимы. По-видимому, это объясняется существенной зависимостью весеннего стока от условий снеготаяния (промерзания почвы, погодных условий), а также с неоднозначным влиянием жидких осадков, предшествующих сезонов, которое может быть положительным в случае многолетних тенденций и отрицательным в случае межгодовых колебаний. Многолетние тенденции весеннего стока соответствуют изменениям доли жидких осадков в годовой сумме, демонстрируя уменьшение с начала 1950-х годов, сменившееся ростом с середины 1970-х годов, и последующее с середины 1990-х падение стока и снижение доли жидких осадков. Вместе с тем, отрицательная корреляция между рядами этих параметров указывает на противоположный ход их межгодовых аномалий, что предполагает снижение пиков весеннего стока в годы положительных аномалий доли жидких осадков, и наоборот. Повторяемость экстремально высоких объемов половодья (превышающих величину стандартного отклонения) в годы, когда доля жидких осадков превышает среднее многолетнее значение, оказывается в два раза ниже по сравнению с годами с дефицитом жидких осадков.

Соотношение вклада твердых и жидких осадков в годовом стоке существенно меняется в разные периоды, в зависимости от фазы современного потепления зимнего сезона. В 1976–1995 гг. на фоне высоких темпов роста зимней температуры доля жидких осадков в изменчивости стока (с учетом осадков предшествующего года) возрастает до 64%, что существенно превышает вклад твердых осадков, который в этот период сокращается до 11%. В предшествующий период, 1951–1975 гг., а также в 1996–2006 гг., в период “паузы в потеплении”, вклад твердых осадков достигает 52% и превышает оценки, полученные за 1951–2006 гг. в целом.

Таким образом, можно говорить о трех периодах, значимых для суммарного (годового) стока Волги и связанных с фазами современного потепления зимнего сезона: сокращение стока в 1951–1975 гг., в период, предшествующий потеплению; подъем, наблюдавшийся с середины 1970-х до 1990-х годов, в период резкого роста температуры; относительное падение (наиболее заметное для весеннего стока), сопровождающее паузу в потеплении с середины 1990-х годов. Различия между этими периодами отчетливо проявляются в структуре атмосферных осадков, выраженной в соотношении жидких и твердых осадков в годовой сумме, что, в свою очередь, оказывает существенное и неоднозначное влияние на сток Волги. Если тенденции весеннего стока до и после середины 1970-х годов совпадают с тенденциями доли жидких осадков в годовой сумме, то в межгодовых аномалиях этих параметров наблюдается обратная зависимость, свидетельствующая о снижении объемов стока половодья в годы увеличения доли жидких осадков. Оценки вклада разных осадков указывают на существенное увеличение роли жидких осадков (за счет твердых) и ее доминирование в изменчивости стока с середины 1970-х до 1990-х годов. Влияние температуры проявляется в изменчивости зимнего стока; очевидно, что оно обусловлено зависимостью промерзания грунтов от термических условий, поэтому его вклад сравнительно невелик и уступает вкладу жидких осадков предшествующего года в три раза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0009 при поддержке РФФИ, проекты: 17-05-00555 (Региональные закономерности и оценки вклада климатических факторов на изменчивость стока Волги), 18-05-00891 (Изменение доли жидких осадков и его связь с формированием экстремумов стока Волги).

FUNDING

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-05-00555 (“Analysis of the regional peculiarities and evaluations of climatic factor impact on Volga runoff variability”), by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-05-00891 (“Analysis of change of the portion of liquid precipitation and its relationship with extremes of Volga runoff”), and within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, no. 0148-2019-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. 2013. № 4. С. 3–12.
2. *Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М.* Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 10. С. 706–714.
3. *Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А.* Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 3. С. 187–194.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
5. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях стока реки Волги // *Водное хозяйство России*. 2013. № 4. С. 4–19.
6. *Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л.* Гидрологический режим и водные ресурсы // *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. Гл. 2. / отв. ред. С.М. Семенов. М. Росгидромет, 2012. С. 53–86.
7. *Зайков Б.Д.* Многолетние колебания стока Верхней Камы. Труды по комплексному изучению Каспийского моря. Вып. XIII. Изд. АН СССР, 1940. 53 с.
8. *Зайцева И.С.* Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. М., 1990, 184 с.
9. *Исмайлов Г.Х., Федоров В.М.* Анализ многолетних колебаний годового стока Волги // *Водные ресурсы*. 2001. Т. 25. № 5. С. 517–525.
10. *Попова В.В.* Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 84–112.
11. *Попова В.В., Морозова П.А., Туткова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М.* Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на

севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // *Лёд и снег*. 2015. № 4 (130). С. 73–86.

12. *Шмакин А.Б.* Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // *Лёд и снег*. 2010. Т. 1. № 1. С. 43–57.
13. *Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю.* Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // *Криосфера Земли*. 2009. Т. XIII. № 4. С. 69–79.
14. *England M.H., McGregor S., Spence P., et al.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // *Nature climate change*. 2014. V. 4. P. 222–227. March. URL. www.nature.com/natureclimatechange.
15. IPCC. Climate change 2013: The Physical Science basis / Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
16. *Petoukhov V., Semenov V.* A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. of Geophys. Res. – Atmospheres*. 2010. V. 115. D21111. DOI:10.1029/2009JD013568
17. *Semenov V., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Env. Res. Let.* 2015. V. 10. 054020. DOI:10.1088/1748-9326/10/5/054020
18. *Trenberth K.E., Fasullo J.T.* An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*. 2013. № 1. P. 19–32. DOI:10.1002/2013EF000165

REFERENCES

1. Alekseevsky N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Climate changes impact on the regime and runoff of Volga basin rivers. *Voda: Khimiya i Ekol.*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).
2. Bogdanova E.G., Gavrilova S.Y., Il'in B.M. Time changes of atmospheric precipitation in Russia from the corrected data during 1936–2000. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 706–714.
3. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 3, pp. 187–194.
4. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2014. 1009 p.
5. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Climatic and anthropogenic factors in multiyear changes of Volga river runoff. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii*, 2013, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
6. Georgievsky V.Yu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. In *Metody otsenki posledst-*

- vii izmenenii klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for Assessing the Consequences of Climate Change for Physical and Biological Systems]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet Publ., 2012, ch. 2, pp. 53–58. (In Russ.).
7. Zaikov B.D. *Mnogoletnie kolebaniya stoka Verkhnei Kamy* [Multiyear Variation of Upper Kama River Runoff], vol. 13 of *Tr. po kompleksnomu izuch. Kaspiiskogo morya* [Letters on Complex Study of the Caspian Sea]. Akad. Nauk SSSR, 1940. 53 p.
 8. Zaitseva I.S. Perannual variations of Volga River run-off and global climate changes. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1996, no. 5, pp. 45–54. (In Russ.).
 9. Ismailov G.H., Fedorov V.M. Analysis of the long-term variation of Volga annual runoff. *Vodn. Resur.*, 2001, vol. 25, no. 5, pp. 517–525. (In Russ.).
 10. Popova V.V. Modern climate change in the north of Eurasia as a manifestation of macro-scale atmospheric circulation variation. *Fundamentalnaya i Prikl. Klimatol.*, 2018, no. 1, pp. 84–112. (In Russ.).
 11. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryayeva A.V., Kitaev L.M. Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led i Sneg*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 73–86. (In Russ.).
 12. Shmakin A.B. Climatic characteristics of snow cover of Northern Eurasia and their variation in the last decades. *Led i Sneg*, 2010, no. 1, pp. 43–57. (In Russ.).
 13. Shmakin A.B., Turkov D.V., Michailov A.Yu. Model of snow cover with inclusion of layered structure and its seasonal evolution. *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 69–79. (In Russ.).
 14. England M.H., McGregor S., Spence P., et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 222–227.
 15. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Eds. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
 16. Petoukhov V., Semenov V. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2010, vol. 115, no. D21. doi 10.1029/2009JD013568
 17. Semenov V., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012. *Environ. Res. Lett.*, 2015, vol. 10, no. 5, p. 054020. doi 10.1088/1748-9326/10/5/054020
 18. Trenberth K.E., Fasullo J.T. An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 2013, vol. 1, no.1, pp.19–32. doi 10.1002/2013EF000165

Climatic Factors of the Volga Runoff Variability in the Second Half of 20th – Early 21st Centuries

V. V. Popova*, E. D. Babina, and A. G. Georgiadi

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: valeria_popova@mail.ru, *e-mail: popova@igras.ru

Received September 27, 2018; revised February 23, 2019; accepted April 4, 2019

The relation of the Volga runoff to the change of climatic factors, significant for the river runoff, is considered since the middle of the last century. The quantitative estimates of the impact of precipitation anomalies (taking into account the solid and liquid phase) on the variability of the annual runoff of the Volga show that the leading role of solid precipitation is detected in the period preceding the current warming (from the early 1950s to the mid-1970s), and also from the mid-1990s, with the onset of warming hiatus. From the mid-1970s to the 1990s, during the period of winter temperature growth, a significant increase in the role of liquid precipitation and their dominance in the variability of the Volga's runoff is observed. The differences between these periods are also noticeable in the percentage of liquid precipitation in the annual amount, which in turn has an ambiguous effect on the spring runoff of the Volga. The long-term trends of spring runoff and the share of liquid precipitation (in annual amount) before and after the mid-1970s coincide in sign. In the same time, there is a negative correlation between the anomalies of these parameters in interannual scale. The last indicates a decrease in the volume of runoff in the years of increasing the proportion of liquid precipitation.

Keywords: atmospheric precipitation, solid and liquid phase, temperature, Volga basin, annual and seasonal runoff, changes, impact on variability.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>