Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным

Т. Б. Титкова

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия

E-mail: titkova@yandex.ru

В комплексе рассматривается изменение формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона с использованием спутниковых и наземных данных. Оценена степень значимости и влияния климатических параметров на зимний сток в конце XX – начале XXI вв. Показаны сроки становления, схода и продолжительность залегания снежного покрова в верховьях Дона. На фоне отсутствия трендов осадков в бассейне Верхнего Дона тренд водного эквивалента снега отрицательный во все зимние месяцы. Уменьшение водного эквивалента снега обусловлено значимым увеличением числа дней со среднесуточной температурой выше нуля, особенно в начале и конце зимы. Также рост числа положительных среднесуточных температур влечёт за собой уменьшение промерзания почвы, что способствует усилению просачивания влаги в грунт. В результате увеличение речного стока преобладает во всём бассейне Верхнего Дона в декабре – феврале. Проведённый корреляционный и регрессионный анализ зависимости речного стока от климатических параметров за декабрь – март периода 1981–2014 гг. подтверждает отмеченные выше связи. Для каждого месяца на первый план значимого влияния на сток выходит свой параметр. Таким образом, увеличение водного режима рек в зимний период в бассейне Верхнего Дона при отсутствии значимых трендов осадков обусловлено смягчением температурного режима зим. Этот процесс ведёт к уменьшению глубины промерзания зоны аэрации и сокращению запасов воды в снежном покрове.

Ключевые слова: бассейн Верхнего Дона, водный эквивалент снега, зимний речной сток, дни с положительными температурами, осадки, снежный покров, температура почвы

Одобрена к печати: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157

Введение

На большей части южного макросклона Русской равнины в последние десятилетия сток весеннего половодья уменьшился вследствие климатически обусловленного увеличения стока в зимние месяцы. Практически во всех ландшафтно-климатических зонах Европейской России отмечается значимый рост зимнего стока (Джамалов и др., 2015, 2017а; Титкова, 2018).

Существенные изменения зимнего стока обусловлены, прежде всего, влиянием оттепелей, которые снижают величину снегозапасов, пополняя ресурсы подземных вод. Скорость зимнего потепления в Европейской России в период 1976–2006 гг. составила 0,68 °C/10 лет. При этом в последнее десятилетие наблюдается определённое замедление глобального потепления, при котором зимняя температура колеблется на уровне достигнутых высоких значений. Скорость зимнего потепления в 1976–2012 гг. понизилась до 0,43 °C/10 лет (Второй..., 2014).

На большей части Европейской России наблюдается уменьшение максимального за зиму запаса воды в снеге (Булыгина и др., 2011; Второй..., 2014). При этом в бассейне Дона статистически значимого изменения осадков для холодного периода с 1978 по 2015 г. не наблюдается (Джамалов и др., 2017б).

Устойчивый снежный покров отмечается только в бассейне Верхнего Дона, который входит в лесостепную зону. Длительность залегания снежного покрова здесь колеблется от 2 до 4 мес. В нижнем течении Дона он неустойчив, может устанавливаться не каждый год, с периодом залегания меньше 50 дней (Климат..., 2001; Титкова, Виноградова, 2016). Поэтому

изменение зимнего стока в бассейне Верхнего Дона во многом зависит от условий залегания снежного покрова и от запасов воды в нём.

Цель данной работы состоит в исследовании региональных особенностей изменений климата в холодный период в бассейне Верхнего Дона с использованием спутниковых и наземных данных, а также в комплексном выявлении значимости и влияния климатических параметров на зимний сток в конце XX – начале XXI вв.

Данные и метод

Наземных данных о снежном покрове не всегда достаточно для получения достоверных сведений о его распределении и изменении. Перспективность применения данных дистанционного зондирования связана с их непрерывностью, широким пространственным охватом и высоким разрешением.

Для оценки становления, схода и продолжительности залегания снежного покрова были использованы спутниковые данные Европейского космического агентства (ESA) и Национального центра данных льда и снега (National Snow and Ice Data Center (NSIDC), USA). Продукт (Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent, Version 4, <http://nsidc.org/data/NSIDC-0046>) предоставляет еженедельную информацию о снежном покрове Северного полушария. Данные представлены в полярной стереографической проекции при размере ячейки сетки 25×25 км. Этот массив генерируется из данных яркостной температуры с датчиков SMMR, DMSP-F8, -F11 и -F13, SSM/Is и SSMIS. Массивы информации масштабируются и сохраняются в двоичном коде.

В качестве порогового значения наличия снежного покрова определено 50%-е превышение покрытия ячейки снегом, что соответствует требованию (Наставление..., 1985). Устойчивым считается снежный покров, который лежит непрерывно в течение зимы или не менее месяца с перерывами не более трёх дней подряд. Для приближения к принятому правилу датой начала установления снежного покрова принимаем в среднем 7-дневный период, когда наличие снега в данной ячейке прослеживается в течение последующих трёх 7-дневных сроков, что в сумме составляет 28 дней. Продолжительность залегания снежного покрова рассматривалась за каждый год периода 1981–2016 гг. как сумма дней, когда отмечался непрерывный снежный покров, и затем усреднялась. Для получения общей картины о наличии снежного покрова для бассейна Верхнего Дона построение карт было произведено с разрешением 0,5×0,5°.

Кроме того, использовались спутниковые данные о водном эквиваленте снега (ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (SWE), Version 2, <http://nsidc.org/data/NSIDC-0595>), опубликованные в Европейском космическом агентстве (ESA). Информация доступна для Северного полушария с 1979 г. по настоящее время. Запись SWE производится ежедневно, еженедельно и ежемесячно на основе методологии Дж. Пуллиайнен (Pulliainen, 2006; Takala et al., 2011). Алгоритм получения результата основан на объединении информации космического пассивного радиометра (SMMR, SSM/I и SSMIS) в диапазонах 19 и 37 ГГц и наземных данных о высоте снега. Материалы предоставляются в форматах HDF4 с пространственным разрешением около 25 км.

Обработка массивов данных о наличии снежного покрова и водного эквивалента снега, а также картографическое отображение результатов производилось в пакете анализа MatLab, для чего были созданы программы, в которых учитываются рекомендации Гидромета (Наставление..., 1985).

Изменение величины зимнего стока (за декабрь – март) рассчитывалось по среднемесячным значениям расходов воды (Q , м³/с) в 19 створах Верхнего Дона: Дон – Казанская, Дон – Лиски, Хопер – Бесплемяновский, Хопер – Новохоперск, Дон – Задонск, Хопер – Поворино, Сосна – Елец, Воронеж – Липецк-2, Хопер – Балашов, Ворона – Борисоглебск, Сосна – Беломестная, Медведица – Лысые Горы, Битюг – Бобров, Иловля – Александровка, Карай – Подгорное, Тихая Сосна – Алексеевка, Арчеда – Нижнянский, Подгорная – Калач, Хопер – Пановка.

Анализировалась информация 24 метеостанций, расположенных на территории бассейна Верхнего Дона (архив ВНИИГМИ-МЦД, <http://www.meteo.ru>): сумма осадков, температура воздуха, температура верхнего слоя почвы ($T_{\text{п}}$), данные снегосъёмок. По среднесуточной температуре рассчитывалось число дней с положительными температурами воздуха (дни $T > 0^{\circ}\text{C}$). Отдельно рассматривались месяцы декабрь, январь, февраль, март. Проведён статистический анализ влияния климатических параметров, в том числе водного эквивалента снега, на зимний сток в бассейне Верхнего Дона.

Результаты

Оценка ошибки воспроизведения спутниковыми данными характеристик снежного покрова в сравнении с наземными снегосъёмками в бассейне Верхнего Дона

Произведена оценка точности спутниковой информации о снежном покрове относительно станционных снегосъёмок в пределах бассейна Верхнего Дона. Данные снегосъёмок представлены с декадным разрешением примерно 10, 20 и 30 числа каждого месяца и имеют большое количество пропусков по срокам и годам, особенно в 1990-х гг. (период наибольших климатических изменений).

Так как сеть метеостанций намного реже, чем сеть спутниковой информации, то для исключения мезомасштабных ошибок все массивы данных были проинтерполированы в сетку $1 \times 1^{\circ}$ для каждого срока имеющихся наземных наблюдений. Погрешность Π определялась в узлах сетки: $\Pi = (P_{\text{с}} - P_{\text{н}})/P_{\text{н}}, \%$; $P_{\text{с}}$ и $P_{\text{н}}$ — характеристика снежного покрова соответственно по спутниковым данным и материалам наземных наблюдений.

В бассейне Верхнего Дона даты установления снежного покрова обладают большой изменчивостью год от года. Погрешность определения этой даты по дистанционным данным на юге Европейской части России максимальная и может достигать 30 % (Титкова, Виноградова, 2017), так как в период становления снежного покрова микроволновые датчики (SMMR, SSM/I) стабильно показывают меньшую заснеженную площадь, чем по данным наблюдений.

Рис. 1. Изменение ошибки воспроизведения спутниковыми данными ESA GlobSnow (SWE) версии 2 водного эквивалента снежного покрова в сравнении с наземными снегосъёмками в период 1982–2016 гг. в пределах бассейна Верхнего Дона (49–54° с. ш., 35–47° в. д.): а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март

Снежный покров менее 5 см не обеспечивает сигнал рассеяния достаточной силы, чтобы его можно было обнаружить с помощью модельных алгоритмов. По мере того как снежный покров утолщается, соглашение между двумя типами данных улучшается (Armstrong et al., 2003). В весенний период ошибка спутниковой информации о дате схода снежного покрова относительно данных наблюдений сравнительно меньше и на Европейской части России составляет около 7 % (Титкова, Виноградова, 2017).

На *рис. 1* (см. с. 149) представлено изменение процента ошибки водного эквивалента снега в бассейне Верхнего Дона в пределах 49–54° с. ш., 35–47° в. д. по годам в зимние месяцы начиная с 1982 г. Максимальные ошибки (± 20 –30 %) наблюдались до середины 1990-х гг. В результате совершенствования модельных алгоритмов и смены радиометра ошибка спутниковых данных уменьшилась с течением времени, и с начала 2000-х гг. она в среднем составляет $\pm (5$ –20) % в зависимости от месяца.

Максимальная отрицательная ошибка водного эквивалента снега наблюдается в начале зимы (см. *рис. 1а*) и после 2000 г. составляет от –20 до –5 %. В январе ошибка колеблется от –20 до +20 % в зависимости от толщины снежного покрова. В феврале начиная с 2000-х гг. ошибка минимальна: от +5 до +10 %. В марте по мере таяния снега ошибка опять возрастает (от –20 до +20 %).

Изменение климатических параметров и стока бассейна Верхнего Дона

На *рис. 2* представлены карты средних дат установления, схода и продолжительности залегания снежного покрова за 1981–2016 гг. по дистанционным данным. В районе бассейнов Верхнего Дона снег ложится только в декабре. Сходит снежный покров в верхнем течении Дона во второй половине марта. Дольше всего (120–130 дней) снег лежит в верховьях самого Дона, на р. Красивая Меча, Сосна, в верхнем течении р. Воронеж, Ворона, Хопер, Медведица. Продолжительность залегания снежного покрова в Верховьях Дона уменьшилась на 10–15 дней по сравнению с данными, полученными до начала интенсивного потепления (Мишон, 1988). Южнее, в остальной части Верхнего Дона, снежный покров наблюдается в среднем от 100 до 120 дней.

Рис. 2. Снежный покров в бассейне Дона по спутниковым данным за период 1981–2016 гг.: *а* — дата установления; *б* — дата схода; *в* — продолжительность залегания. Серым выделена граница бассейна реки, красным — государственная граница

Осадки в зимние месяцы во всём бассейне Верхнего Дона за период 1981–2016 гг. характеризуются большой изменчивостью год от года: сумма стандартного отклонения составляет почти половину суммы самих осадков, что приводит к их незначимым трендам в декабре – феврале (*табл. 1*). В марте тренд значим в основном за счёт больших сумм осадков, которые стали чаще наблюдаться со второй половины 1990-х гг.

Таблица 1. Статистика климатических параметров в бассейнах Верхнего Дона и р. Сосны в месяцы со снежным покровом за период 1981–2016 гг.

Месяц	Параметр					
	Среднее значение		Стандартное отклонение		Тренд/10 лет	
	Верхний Дон	р. Сосна	Верхний Дон	р. Сосна	Верхний Дон	р. Сосна
	$Q, \text{м}^3/\text{с}$					
Декабрь	44	22	13	6	5	1
Январь	45	23	13	7	5	2
Февраль	47	27	14	13	7	3
Март	94	64	42	43	–2	–15
	SWE, мм					
Декабрь	20	28	13	15	–3	–5
Январь	47	60	18	21	–10	–9
Февраль	67	82	20	23	–12	–12
Март	56	72	26	29	–14	–14
	$\Sigma P, \text{мм}$					
Декабрь	42	46	20	30	1	–1
Январь	41	49	14	21	2	2
Февраль	34	41	14	15	2	1
Март	33	42	15	25	4	5
	Дни с $T > 0^\circ\text{C}$					
Декабрь	6,6	6	4,3	5	1,4	1,8
Январь	4,9	5	3,3	4	0,0	0,1
Февраль	4,8	5	4,3	5	1,1	1,6
Март	13,9	14	7,4	8	1,9	1,4
	$T_{\text{п}} 20 \text{ см}, ^\circ\text{C}$					
Декабрь	–0,2	0,4	1,2	1,3	0,7	0,9
Январь	–0,8	–0,2	1,1	1,0	0,3	0,7
Февраль	–0,9	–0,6	1	1,3	0,4	0,9
Март	–0,2	0	1	0,7	0,4	0,4

Примечание: Q — расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$); SWE — водный эквивалент снега (мм); ΣP — сумма осадков (мм); дни с $T > 0^\circ\text{C}$ — число дней с положительной температурой воздуха; $T_{\text{п}} 20 \text{ см}$ — температура почвы на глубине 20 см ($^\circ\text{C}$); полужирным шрифтом выделены тренды с уровнем значимости 0,05.

Тренд водного эквивалента снега отрицателен во все зимние месяцы (*рис. 3*, см. с. 152) и за десятилетие колеблется в пределах от –0,5 до –3 мм. Наибольшее и значимое уменьшение водного эквивалента наблюдается в западной части бассейна Верхнего Дона. Максимальные значения отрицательного тренда до –3 мм за 10 лет достигаются в феврале южнее р. Сосны.

Уменьшение водного эквивалента снега обусловлено увеличением числа дней со среднесуточной температурой выше нуля (см. *табл. 1*). В пределах всего бассейна Верхнего Дона положительные тренды (до двух дней) значимы в начале и конце зимы — в декабре и марте.

В феврале положительный тренд не достигает уровня значимости. В середине зимы (в январе) тренда не наблюдается. В западной части бассейна Верхнего Дона февраль становится более тёплым, и число дней с температурой выше нуля здесь имеет значимый положительный тренд, что вызывает ещё большее уменьшение водного эквивалента снега в этом районе.

Запасы почвенной влаги, обеспечивающей зимний сток, во многом зависят от промерзания почвы. Рост положительных среднесуточных температур влечёт за собой уменьшение промерзания почвы, что способствует увеличению просачивания влаги в грунт.

Рис. 3. Тренд водного эквивалента снега (мм/10 лет) в бассейне Верхнего Дона за период 1981–2014 гг. по месяцам: а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март. Тренд значим при значениях меньше $-1,5$ мм/10 лет с уровнем значимости 0,05 по критерию Стьюдента. Обозначения см. на рис. 1

Рис. 4. Тренды зимнего стока ($\text{м}^3/\text{с}$) в бассейне Верхнего Дона за период 1981–2014 гг. по месяцам: а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март. Обозначения см. на рис. 1

Во всём бассейне Верхнего Дона положительные тренды среднемесячной температуры почвы на глубине 20 см ($T_{\text{п}} = 20$ см, °C) наблюдались во все месяцы (см. табл. 1). В целом по бассейну положительные тренды температуры почвы значимы в декабре и марте (как и число дней с положительной температурой), тогда как в западной части Верхнего Дона они значимы во все месяцы.

На рис. 4 (см. 152) представлены линейные тренды стока ($\text{м}^3/\text{с}$) в бассейне Верхнего Дона за период 1981–2014 гг. в декабре – марте. Увеличение стока преобладает во всём бассейне Верхнего Дона в декабре – феврале (см. рис. 4а–в). Этому способствует рост числа дней с положительными температурами, что, в свою очередь, влияет на уменьшение промерзания почвы и увеличение просачивания влаги, аккумулированной в снежном покрове. В марте (см. рис. 4г) в начале половодья для западной части верхнего Дона в бассейнах малых рек Красивая Меча, Сосна и самого Верхнего Дона тренд стока отрицателен. В этом районе запасы воды в снеге интенсивно убывают начиная с 2000-х гг., что напрямую связано с увеличением числа дней с положительной температурой в начале весны (рис. 5а). В восточной части бассейна верхнего Дона рост числа дней с положительной температурой происходит медленнее (рис. 5б). На р. Воронеж, Ворона, Хопер, Медведица запасы воды в снеге достаточно, чтобы тренд стока в марте ещё оставался положительным.

Рис. 5. Изменение водного эквивалента снега (SWE) (1) и числа дней с положительной температурой (дни $T > 0$ °C) (2) в марте для бассейнов: а — западная часть Верхнего Дона, р. Сосна, метеостанция Поньри (52,31° с. ш., 36,3° в. д.); б — восточная часть Верхнего Дона, р. Ворона, метеостанция Балашов (51,55° с. ш., 43,15° в. д.)

Статистический анализ зависимости речного стока от климатических параметров

Корреляционный анализ зависимости речного стока от климатических параметров за декабрь – март периода 1981–2014 гг. подтверждает отмеченные выше связи (табл. 2). Количество осадков положительно коррелирует со стоком, но, так как больших значимых трендов осадков в зимние месяцы не наблюдалось в исследуемый период, связь эта незначима. В течение всей зимы прослеживается обратная связь стока с водным эквивалентом снега

(SWE): чем больше сток, тем больше воды просачивается в почву и наблюдается меньший запас влаги в снежном покрове. Коэффициенты корреляции значимы в январе – феврале, когда запас влаги в снежном покрове максимален. В начале зимы прослеживается максимальная значимая положительная зависимость стока от числа дней с положительной температурой (0,4–0,5) и средней температурой почвы на глубине 20 см (0,4–0,6). Во второй половине зимы начиная с февраля коэффициенты корреляции связи стока с числом дней с положительной температурой понижаются, а связь стока с температурой почвы практически отсутствует.

Таблица 2. Корреляция речного стока с климатическими параметрами в бассейне р. Сосны (Верхний Дон)

Месяцы	ΣP , мм	SWE	Дни с $T > 0^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}$ 20 см, $^\circ\text{C}$
Декабрь	0,0	–0,1	0,5	0,4
Январь	0,3	– 0,4	0,4	0,6
Февраль	0,2	– 0,4	0,3	0,1
Март	0,1	–0,3	0,3	0,1

Обозначения см. в табл. 1.

Степень влияния климатических факторов на речной сток Верхнего Дона оценивалась с помощью параметра корреляции — коэффициента детерминации R^2 . Теснота зависимости считается удовлетворительной, если R^2 меняется от 0,3 до 0,5. Регрессионный анализ показал, что зависимость речного стока от климатических параметров (R^2) находится в пределах 31–56 %, что говорит о достаточной точности описания процесса стока данными параметрами (табл. 3). Для проверки правильности построенного уравнения регрессии применяется критерий Фишера. Уравнение регрессии подобрано верно и зависимость считается значимой и достоверной, если $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ при уровне значимости $p < 0,05$. Исследуемые параметры значимо и достоверно описывают сток в зимний период во все месяцы.

Таблица 3. Регрессионный и дисперсионный анализ зависимости стока (створ Дон – Казанский) от климатических параметров в бассейне Верхнего Дона

Месяц	R	R^2	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	P -значение уровня значимости			
					ΣP , мм	SWE	Дни с $T > 0^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}$ 20 см, $^\circ\text{C}$
Декабрь	0,56	0,32	14,16	2,53	0,041	0,249	0,03	0,049
Январь	0,75	0,56	39,86	2,53	0,62	0,055	0,03	0,258
Февраль	0,5	0,31	10,33	2,53	0,9	0,01	0,05	0,54
Март	0,57	0,32	14,92	2,53	0,54	0,04	0,006	0,04

Обозначения см. в табл. 1. R — коэффициент линейной корреляции; R^2 — коэффициент детерминации.

P -значение уровня значимости служит для проверки нулевой гипотезы о наличии или отсутствии парной корреляции при уровне значимости 0,05. Если вычисленный уровень значимости меньше заданного, то принимается гипотеза о значимом отличии p -коэффициента от нуля и влияние независимой переменной на исследуемую переменную считается значимым. Значения p -коэффициентов уровня значимости показывают, что на сток (Q , м³/с) оказывают влияние: число дней с положительными среднесуточными температурами (дни с $T > 0^\circ\text{C}$), средняя температура почвы на глубине 20 см ($T_{\text{п}}$ 20 см, $^\circ\text{C}$), сумма осадков (ΣP , мм) и водный эквивалент снега (SWE).

Для зимних условий Верхнего Дона эти параметры можно проранжировать по степени уменьшения влияния на сток. Для каждого месяца на первый план выходит свой параметр. В период становления снежного покрова, в декабре, первоначальное значение для стока имеют сумма осадков, количество дней с положительными среднесуточными температурами и температура почвы, которая колеблется около нулевых значений. В январе на сток в равной степени влияют количество дней с положительными среднесуточными температурами и водный эквивалент уже значительного снежного покрова. В феврале при максимальном снежном покрове на первое место выходит запас воды в снеге, затем число дней с $T > 0$ °С. В марте величина речного стока больше зависит от дней с положительными среднесуточными температурами и в равной степени от запасов воды в снеге и средней температуры почвы.

В целом для зимы при отсутствии больших значимых трендов осадков важнейшая роль в образовании зимнего стока принадлежит количеству дней со среднесуточными положительными температурами.

Выводы

Массивы спутниковой информации о снежном покрове удовлетворительно воспроизводят значения параметров относительно наземных наблюдений. В период становления снежного покрова в бассейне Верхнего Дона спутниковые данные занижают наличие снежного покрова и водного эквивалента снега. Во второй половине зимы спутниковая информация о снежном покрове достаточно достоверна (расхождение с данными наблюдения минимально).

Продолжительность залегания снежного покрова в верховьях Дона составляет 120–130 дней. В южной части Верхнего Дона снежный покров наблюдается в среднем от 100 до 120 дней.

Статистически значимого изменения осадков в бассейне Верхнего Дона для зимних месяцев в период 1981–2016 гг. не наблюдается в связи с их большой изменчивостью год от года. При этом тренд водного эквивалента снега отрицательный во все зимние месяцы. Уменьшение водного эквивалента снега обусловлено значимым увеличением числа дней со среднесуточной температурой выше нуля, особенно в начале и конце зимы. Также рост числа положительных среднесуточных температур влечёт за собой уменьшение промерзания почвы, что способствует увеличению просачивания влаги в грунт, и увеличение зимнего стока во всём бассейне Верхнего Дона в декабре – феврале.

Корреляционный анализ зависимости речного стока от климатических параметров за декабрь – март периода 1981–2014 гг. подтверждает отмеченные выше связи. Регрессионный анализ показал, что исследуемые параметры значимо и достоверно описывают сток в зимний период. Для каждого месяца на первый план значимого влияния на сток выходит свой параметр. В целом для зимы при отсутствии больших значимых трендов осадков важнейшая роль в образовании зимнего стока принадлежит количеству дней со среднесуточными положительными температурами.

Таким образом, увеличение зимнего стока в бассейне Верхнего Дона обусловлено, прежде всего, смягчением температурного режима зимы, которое привело к уменьшению глубины промерзания зоны аэрации и сокращению запасов воды в снежном покрове. В результате улучшились условия питания подземных вод и, как следствие, увеличился водный режим рек в зимний период.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00518 и 18-05-00440).

Литература

1. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н. Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966–2010 гг. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. 24. С. 211–227.

2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
3. Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Телегина Е. А. Изменение зимнего стока рек европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581–588. DOI: 10.7868/S0321059615060036.
4. Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И., Телегина Е. А. (2017а) Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 603–611. DOI: 10.7868/S0321059617060049.
5. Джамалов Р. Г., Киреева М. Б., Косолапов А. Е., Фролова Н. Л. (2017б) Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
6. Климат России / под ред. Н. В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655 с.
7. Мишон В. М. Подземный сток в период весеннего половодья и метод его определения // Труды 5-го Всесоюзного гидрологического съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1988. Т. 2. С. 413–419.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 92 с.
9. Титкова Т. Б. Динамика климатических характеристик с оценкой их влияния на зимний сток бассейна Оки // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 191–198. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-191-198.
10. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI века по спутниковым данным // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-25-33.
11. Armstrong R. L., Brodzik M. J., Kummerow C. D., Jiang J., Uratuka S. Twenty-four year record of northern hemisphere snow cover derived from passive microwave remote sensing // Conf. Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III. Bellingham. 2003. V. 4894. P. 373–380.
12. Pulliainen J. Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 101. P. 257–269.
13. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B. Estimating Northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3517–529.

Change in climatic conditions of winter runoff formation in the Upper Don basin revealed by satellite and ground data

T. B. Titkova

*Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: ttitkova@yandex.ru*

A change in the formation of winter runoff in the Upper Don basin is considered comprehensively using satellite and ground data. The importance and influence of climatic parameters on winter runoff in the late XX—the early XXI centuries are evaluated. The terms of formation and melting, the duration of snow cover in the Upper Don are described. The snow water equivalent trend is negative over the winter with no precipitation trends. The decrease of snow water equivalent is due to significant increase in the number of days with the daily average temperature above zero, especially at the beginning and end of winter. It also results in the decrease of soil freezing, thus increasing the moisture content of the soil. As a result, the river runoff increase prevails in the whole Upper Don basin from December to February. Correlation and regression analysis between river runoff and climatic parameters in the period from December to March 1981–2014 confirms the above-mentioned connections. The most significant parameter for the runoff differs in each month. Thus, the increase of hydrological regime in Upper Don basin in the winter without any significant precipitation trends is due to the winter temperature mitigation. This process leads to the decrease of soil freezing and snow water equivalent.

Keywords: Upper Don basin, snow water equivalent, winter runoff, days with the temperature above zero, precipitation, snow cover, soil temperature

Accepted: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157

Reference

1. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Snezhnyi pokrov na territorii Rossii i ego prostranstvennye i vremennye izmeneniya za period 1966–2010 gg. (Snow cover over the Russian territory and its spatial and temporal changes in 1966–2010), *Problemy Ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2011, No. 24, pp. 211–227.
2. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1009 p.
3. Dzhamalov R. G., Telegina E. A., Frolova N. L., *Izmenenie zimnego stoka rek Evropeiskoi chasti Rossii* (Winter runoff variations in European Russia), *Vodnye resursy*, 2015, Vol. 42, No. 3, pp. 758–765, DOI: 10.7868/S0321059615060036.
4. Dzhamalov R. G., Safronova T. I., Telegina E. A. (2017a), *Vnutrigodovoe raspredelenie stoka rek s otsenkoi roli zimnei mezheni* (Annual distribution of river runoff with estimated contribution of winter low-water season), *Vodnye resursy*, 2017, Vol. 44, No. 6, pp. 603–611, DOI: 10.7868/S0321059617060049.
5. Dzhamalov R. G., Kireeva M. B., Kosolapov A. E., Frolova N. L. (2017b), *Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie* (Water resources of the Don basin and their ecological state), Moscow: GEOS, 2017, 205 p.
6. *Klimat Rossii* (The climate of Russia), Kobysheva N. V. (ed.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001, 655 p.
7. Mishon V. M., *Podzemnyi stok v period vesennego polovod'ya i metod ego opredeleniya* (Underground runoff during the spring flood and the method of its determination), *Trudy 5-go Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s'ezda* (Proc. 5th All-Union Hydrological Congress), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, Vol. 2, pp. 413–419.
8. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam* (Guidance to hydrometeorological stations and posts), Issue 3, Part 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 92 p.
9. Titkova T. B., *Dinamika klimaticheskikh kharakteristik s otsenkoi ikh vliyaniya na zimnii stok basseina Oki* (Variability of winter runoff of the Oka River and its relationship with climate change), *Led i Sneg*, 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 191–198, DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-191-198.
10. Titkova T. B., Vinogradova V. V., *Sroki zaleganiya snezhnogo pokrova na territorii Rossii v nachale XXI veka po sputnikovym dannym* (Snow cover endurance, according satellites data, at the territory of Russia in the beginning of XXI century), *Led i Sneg*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 25–33, DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-25-33.
11. Armstrong R. L., Brodzik M. J., Kummerow C. D., Jiang J., Uratuka S., *Twenty-four year record of northern hemisphere snow cover derived from passive microwave remote sensing*, *Conf. Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment III*, Bellingham, 2003, Vol. 4894, pp. 373–380.
12. Pulliainen J., *Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations*, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, pp. 257–269.
13. Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B., *Estimating Northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements*, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 3517–3529.