

**Оценки современных изменений снегозапасов
в бассейне Северной Двины
по данным наблюдений и моделирования**

© 2021 г. В.В. Попова^{1*}, Д.В. Турков¹, О.Н. Насонова²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия;

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*valeria_popova@mail.ru

**Estimates of recent changes in snow storage
in the river Northern Dvina basin
from observations and modeling**

V.V. Popova^{1*}, D.V. Turkov¹, O.N. Nasonova²

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

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

*valeria_popova@mail.ru

Received November 26, 2020 / Revised February 4, 2021 / Accepted March 19, 2021

Keywords: Northern Dvina basin, snow water equivalent, observations, land surface models, trends, variability, spectral density, spring runoff.

Summary

The variability of snow accumulation in the Northern Dvina River basin at the end of March 1980-2016 was studied using data on the snow water equivalent of (SWE) obtained from archives of the Russian Institute of HydroMeteorological Information-World Data Center (RIHMI-WCD) as well as calculated by models of the local heat and moisture exchange SWAP and SPONSOR using the WATCH reanalysis (WFDEI) as input data. A possibility to use the SWE data from these sources to describe long-term variability of the SWE values, including trend, high-frequency component, quasi-decadal fluctuations, and spatial distribution, is evaluated. When describing the structure of the SWE variability, in particular, the contribution of trend and quasi-decadal fluctuations, as well as spatial characteristics, uncertainty remains associated with both the capabilities of the models under consideration and the imperfection of the observation network (insufficient density, measurement errors, etc.). Taking into account these uncertainties, the following conclusions can be made: the SWE variability in the Northern Dvina basin at the end of March has a low-frequency component (trend), as well as high-frequency, two- and five-year quasi-periodicities and quasi-decadal fluctuations. Long-lasting SWE anomalies in 1989–1995 and 1999–2005 and the absolute minimum in 1996 associated with quasi-decadal fluctuations are almost synchronously reflected in spring runoff anomalies. The informativeness of the considered data was also investigated from the point of view of the influence of SWE on the anomalies of the spring runoff of the Northern Dvina. The results of regression estimates and calculations of predictive values point to the advantage of the model SWE data for describing anomalies of spring river discharge compared to observations, which is primarily due to the high resolution of the model data. All the considered data sources indicate a long period of SWE deficits, starting from 2005 – 15-20%. Estimates of trend parameters are in a wide range. Depending on the data source, the rate of the SWE decrease over the basin, can vary from 4 mm per 10 years according to observations and up to 10 mm per 10 years according to calculations using the SPONSOR model.

Citation Popova V.V., Turkov D.V., Nasonova O.N. Estimates of recent changes in snow storage in the river Northern Dvina basin from observations and modeling. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 61 (2): 206–221. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020082.

Поступила 26 ноября 2020 г. / После доработки 4 февраля 2021 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: бассейн Северной Двины, водный эквивалент снега, наблюдения, модели тепло- и влагообмена, тренды, изменчивость, спектральная плотность, весенний сток.

Изменчивость снегозапасов в бассейне р. Северная Двина (1980–2016 гг.) исследуется на основе данных о водном эквиваленте снега (ВЭС), полученных из стационарных наблюдений и в результате расчётов на моделях тепло- и влагообмена. Обсуждаются оценки параметров тренда и вклада высокочастотных и квазидесятилетних колебаний, а также особенности пространственного распределения изменчивости ВЭС, полученные по сведениям из разных источников. В качестве критерия информативности наблюдений и модельных расчётов рассматриваются оценки вклада изменчивости ВЭС в конце марта в аномалии весеннего стока.

Введение

Значение мониторинга и оценки изменчивости снеготаяния в речных бассейнах Северной Евразии трудно переоценить, учитывая их практическую значимость и наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения. Резкий подъём речного стока в период снеготаяния, определяющего его годовые аномалии, ставит задачу прогноза весеннего стока в целях предотвращения негативных последствий аномально высокого подъёма воды и учёта водообеспеченности, необходимого для развития и экологической безопасности крупных регионов. В настоящее время основной источник информации о снежном покрове – данные метеорологических наблюдений и полученные на их основе сеточные архивы. Реанализы и данные спутниковых измерений пока не дают удовлетворительных результатов [1–3], особенно при оценках многолетних тенденций [4, 5]. Исключения представляют собой спутниковые данные, ассимилированные с реанализом и наземными измерениями [6, 7].

Для оценки и прогнозирования объёмов весеннего стока используется сеть снегомерной маршрутной съёмки Росгидромета [8], которая с 1966 г. проводит регулярные измерения толщины, плотности и водного эквивалента снега (ВЭС) в речных бассейнах. Однако наблюдаемые многолетние ряды характеристик снежного покрова нередко имеют разную длину, пропуски и прочие нарушения в наблюдениях, которые требуют восстановления непрерывности и однородности ряда. Кроме того, при переходе от данных наблюдений в точке к пространственному распределению характеристик снеготаяния на обширных территориях необходимо использовать методы интерполяции, имеющие ограниченную точность при редкой сети станций, что особенно характерно для северных регионов России. Другой способ получения подробной информации о снежном покрове и его изменениях – применение методов физико-математического моделирования, позволяющих установить данные о толщине и ВЭС с высоким пространственным и временным разрешением.

В настоящее время разработано и протестировано немало численных моделей формирования снеготаяния, отличающихся по степени сложности, детальности описываемых физиче-

ских процессов и набору входных параметров. В основе вычислительных схем таких моделей может быть динамическое и динамико-стохастическое моделирование [9, 10], математическое моделирование структуры снега [11, 12], а также моделирование локального тепло- и влагообмена [13–15]. Сравнение современных моделей снежного покрова в международных проектах SnowMIP и PILPS [16–18] показывает, что при наличии входных метеорологических данных высокого качества многие современные модели формирования снежного покрова способны воспроизводить его характеристики – прежде всего толщину и водный эквивалент – в различных природных зонах. К моделям, прошедшим тестирование в процессе международных проектов [19], относятся модели тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SPONSOR и SWAP.

Модель SPONSOR [3, 14, 20], разработанная в лаборатории климатологии Института географии РАН, содержит описание процессов, важных для исследования взаимодействия снежного покрова с атмосферой и почвой и вносящих наибольший вклад в формирование теплофизических характеристик снега. *Снежная модель SWAP* [13, 21] разработана в Институте водных проблем РАН и представляет собой часть гидрологической модели. Её отличительная особенность – сочетание физической обоснованности и рациональности с применением аналитических методов решения систем уравнений и стремлением к сокращению числа параметров. Обе модели дают возможность рассчитывать характеристики снежного покрова и их многолетнюю динамику с высоким пространственным разрешением, используя данные либо сети метеорологических наблюдений, либо сеточных архивов и реанализов.

Цель исследования – получение сравнительных оценок современных изменений снеготаяния в бассейне р. Северная Двина (1980–2016 гг.) по данным наблюдений и результатам моделирования с использованием разных вычислительных схем. В качестве критерия для такой оценки рассматривается величина вклада ВЭС в межгодовую изменчивость и многолетние тенденции весеннего стока, которая тесно связана с аномалиями и пространственным распределением снежного покрова в бассейне и чувстви-

тельна к точности их описания [5]. Основание для такого подхода даёт принадлежность Северной Двины к типу рек с преобладающим снеговым питанием. За зиму на её водосборе выпадает около одной трети годовой суммы осадков, но в результате формирования снегозапасов больше половины годового объёма стока приходится на два месяца, следующих после начала снеготаяния. Получение данных ВЭС в бассейне Северной Двины с высоким пространственным разрешением путём расчётов с применением моделей SPONSOR и SWAP входит в задачи исследования, наряду с анализом данных наблюдений и изучением особенностей пространственной и временной изменчивости ВЭС по материалам, полученным из разных источников.

Данные и методы

Источником многолетних рядов наземных измерений ВЭС послужили данные 29 станций маршрутной снегомерной съёмки из архива ВНИИГМИ [8] за период 1980–2016 гг. Расположение станций показано на рис. 1. Пропуски в наблюдениях обнаружены на семи станциях, их максимальное число не превышает четырёх лет.

Предварительный анализ показал, что в среднем за рассматриваемый период начало сезонного разрушения снежного покрова и уменьшения ВЭС в бассейне Северной Двины наблюдается уже в первой декаде апреля, поэтому при анализе рассматривались данные о ВЭС за последнюю декаду марта. Для сравнения с результатами моделирования стационарные данные были интерполированы в регулярную сетку с разрешением $0,5^\circ$ с расположением ячеек в тех же узлах, что и в случае модельных данных (см. рис. 1). Распределение ландшафтных особенностей снегомерной маршрутной съёмки (лес–поле) не учитывалось. Модельные расчёты ВЭС проводили на двух моделях – *SPONSOR* и *SWAP*, использующих разные подходы к описанию процессов в снежном покрове.

В модели *SPONSOR* снежный покров рассматривается как многослойная среда, каждый слой которой характеризуется собственными температурой, массой (водным эквивалентом), толщиной, плотностью, влажностью, фазовым состоянием содержащейся воды, теплоёмкостью, теплопроводностью и максимальной водоудерживающей способностью. Модель содержит описание следующих процессов: образование нового слоя снега; изменение температуры слоя

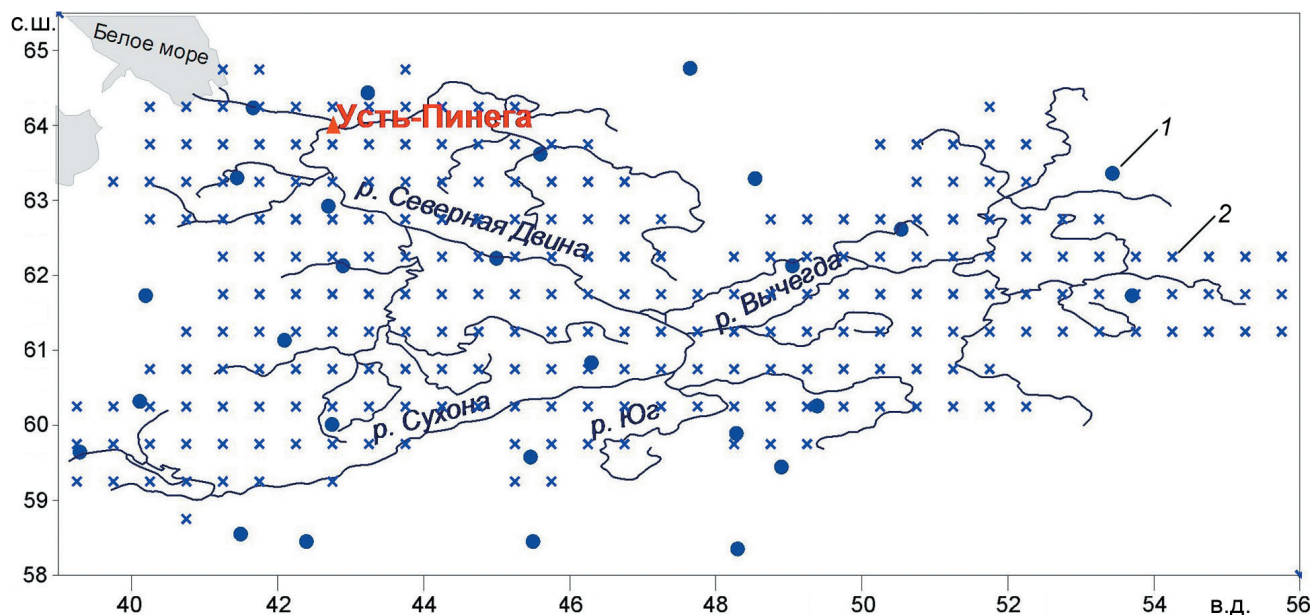


Рис. 1. Положение станций снегомерной маршрутной съёмки (1), узлов регулярной сетки (2) и гидрологического створа Усть-Пинега в бассейне Северной Двины

Fig. 1. Location of stations of the snow-measuring route survey (1), nodes of the regular grid (2) and the Ust-Pinega hydrological station in the Severnaya Dvina basin

Таблица 1. Статистические характеристики и параметры линейного тренда многолетних изменений водного эквивалента снега в бассейне Северной Двины по данным наблюдений (ВНИИГМИ) и расчётов на моделях локального тепло- и влагообмена SPONSOR и SWAP, 1980–2016 гг.

Источники данных	Статистические характеристики				Параметры линейного тренда*	
	среднее, мм	стандартное отклонение, мм	абсолютный максимум, мм (год события)	абсолютный минимум, мм (год события)	b , мм/10 лет	R^2 , %
Наблюдения (ВНИИГМИ)	165	22	221 (2003)	126 (1996)	-3,7	3
SPONSOR-GPCC	185	30	258 (1981)	139 (2006)	-10,0	12
SWAP-GPCC	168	27	236 (1981)	118 (2006)	-7,0	10

* b – скорость изменений; R^2 – доля тренда в общей дисперсии.

в результате теплообмена, поглощения солнечной радиации и фазовых переходов; изменение плотности, испарение (в том числе, метелевое); таяние, перенос талой воды и её вторичное замерзание, а также изменение альбедо снега, его теплопроводности, теплоёмкости и пр. Подробно модель SPONSOR снежного покрова, а также результаты её тестирования по данным нескольких полигонов описаны в работах [3, 14, 20].

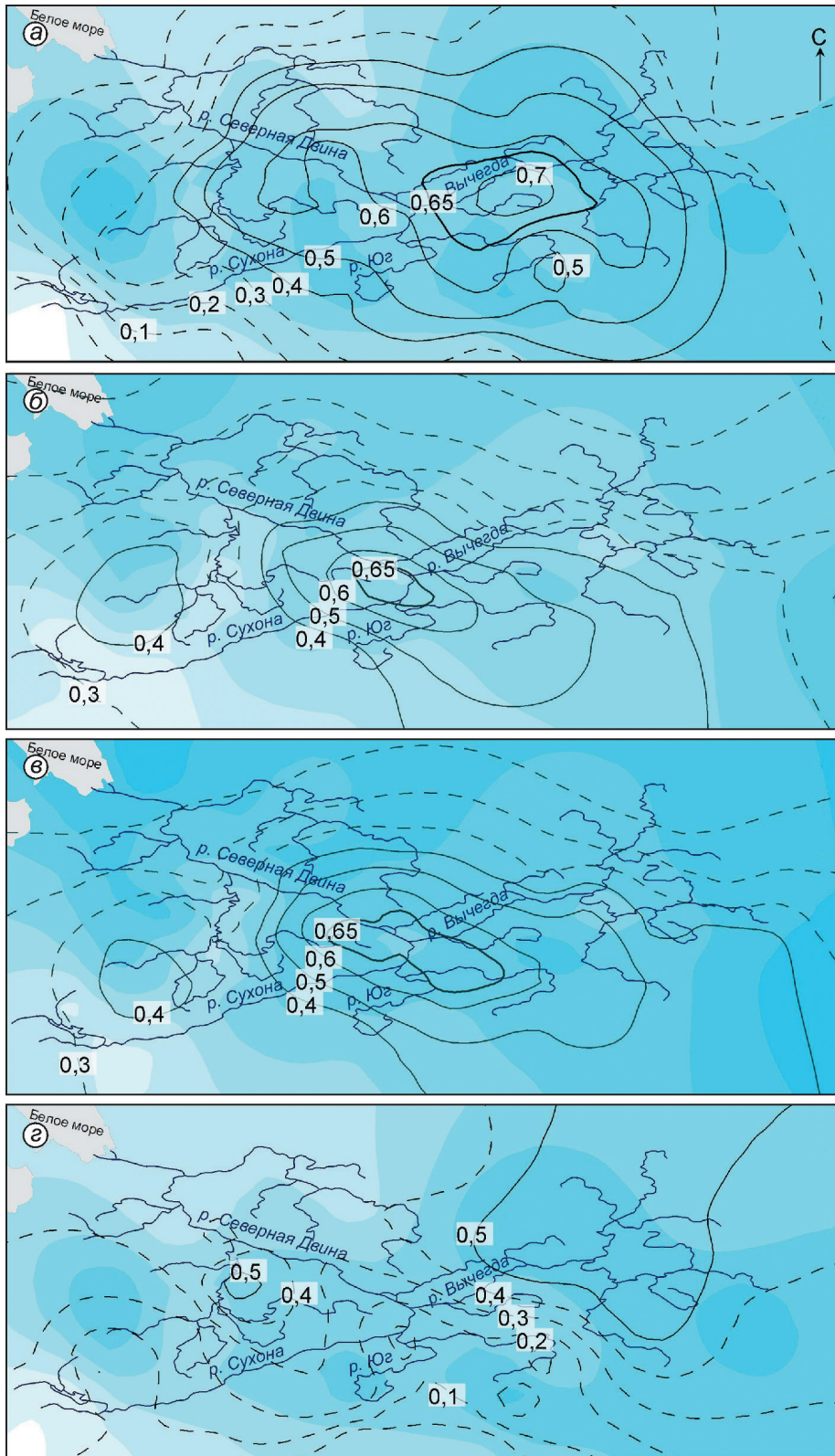
В модели SWAP снежный покров рассматривается как единая толща. Описывается просачивание талой воды в снег с учётом фазовых переходов и поступления на поверхность почвы. Альбедо, водоудерживающая способность и теплопроводность снега входят в вычислительную схему в параметризованном виде и зависят от плотности. Плотность снега задаётся как функция от снеготолщины и температуры снежного покрова. Учитывается перехват твёрдых осадков древостоем, включая особенности, связанные с выпадением жидких осадков в холодное время года, а также экранирующий эффект лесной растительности при поступлении солнечной радиации в период снеготаяния. Детально модель SWAP описывается в работах [13, 21].

В качестве входных данных в обоих случаях использованы сведения проекта WATCH (Water and Global Change), архив данных WFDEI (WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interimdata), пространственное разрешение 0,5°, шаг по времени 3 ч [22]. Данные об осадках в архиве проекта WATCH (WFDEI) приведены по двум глобальным архивам данных: GPCC (Global Precipitation Climatology Center) [23] и CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK) [24]. Для бассейна Северной Двины на каждой модели было проведено две серии экспериментов с использованием данных архивов

осадков CRU (1979–2013 гг.) и GPCC (1979–2016 гг.). Рассчитывались среднесуточные и среднемесячные значения ВЭС, на основе которых получены величины ВЭС, накопленные в бассейне Северной Двины к концу марта. В настоящей работе рассматриваются результаты расчётов, полученные для архива данных об осадках GPCC. Они отражают разброс статистических оценок между наблюдениями и модельными расчётами, а также между моделями, полученными в случае использования архива CRU.

Таким образом, приводится анализ трёх массивов данных о ВЭС за 1980–2016 гг.: ВНИИГМИ; наблюдения SPONSOR и SWAP. Каждый массив анализировался с точки зрения временной изменчивости, её пространственных особенностей, а также вклада в изменчивость весеннего (снегового) стока по единому алгоритму: 1) изменение средних по бассейну ВЭС за исследуемый период, параметры линейного тренда, вклад низкочастотной изменчивости и квазидесятилетних периодичностей (рис. 2, 3, табл. 1) с анализом функций спектральной плотности (по методу преобразования Фурье); 2) пространственное распределение корреляции между изменчивостью ВЭС, весеннего стока и основных зон влияния (см. рис. 2); 3) регрессионные оценки вклада ВЭС в аномалии весеннего стока и прогнозируемость весеннего стока на основе данных о ВЭС в конце марта (рис. 4, табл. 2).

В качестве показателя весеннего стока использованы сведения о средних месячных расходах Северной Двины за май–июнь в створе Усть-Пинега в 1980–2016 гг. Для восстановления пропусков в наблюдениях принимались во внимание данные об объёмах весеннего стока [25]. Заключение об информативности данных изменений ВЭС в бассейне Северной Двины в



конце марта, полученных из разных источников, наблюдений и четырёх вариантов модельных расчётов для оценки вклада снегозапасов в

аномалии весеннего стока и их прогнозирования, основывалось на регрессионных зависимостях, полученных за период 1980–2001 гг., кото-

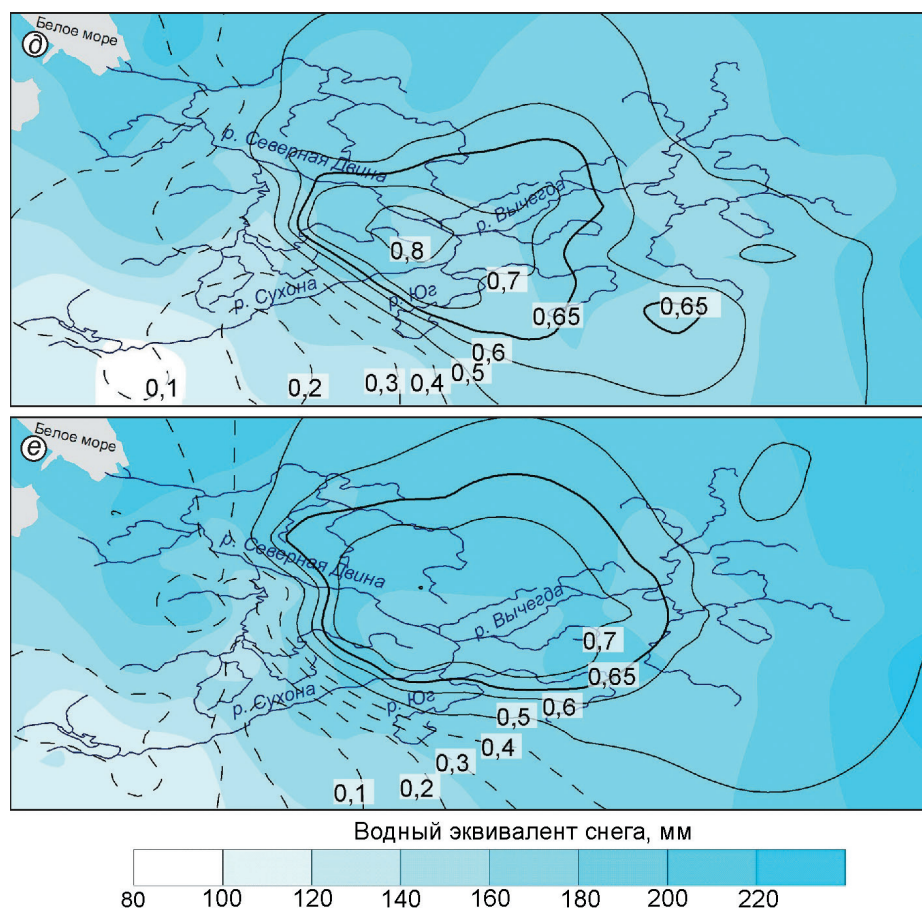


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между значениями водного эквивалента снега в конце марта и расходами Северной Двины (Усть-Пинега) в среднем за май–июнь (изолинии) за 1980–2016 гг. (а–в) и 2002–2016 гг. (г–е), полученные по данным наблюдений из архива ВНИИГМИ-МЦД (а, г), в результате расчётов на моделях SWAP-GPCC (б, д) и SPONSOR-GPCC (в, е).

Цветной заливкой показано распределение средних значений водного эквивалента снега, мм, в 1980–2016 гг. (а–в) и в 2002–2016 гг. (г–д). Пунктиром обозначены области статистически незначимой корреляции ($p < 0,05$), жирными изолиниями – зоны влияния ($r \geq 0,65$)

Fig. 2. Correlation coefficients between snow water equivalent, for the end of March, and the Severnaya Dvina discharge (at Ust-Pinega) in average for May–June in 1980–2016 (а–в), and in 2002–2016 (г–е) (isolines) obtained for the data of snow water equivalent from observations, RIHMI-WDC (а, г), and calculated using models SWAP-GPCC (б, д), and SPONSOR-GPCC (в, е).

The color fill shows the distribution of the snow water equivalent mean values, mm. Dotted lines indicate statistically insignificant correlation coefficients (at the $p < 0.05$), bold isolines indicate the zones of «influence» ($r \geq 0.65$)

рый был выбран в качестве обучающей выборки. При этом в регрессионных оценках учитывались временные ряды ВЭС в зонах «влияния», т.е. в ячейках, находящихся в пределах областей изокоррелят $r \geq 0,65$ (см. рис. 2). Затем на основе полученных регрессионных моделей по данным о ВЭС за 2002–2016 гг. (для стационарных данных, SPONSOR и SWAP) рассчитывались «прогностические» значения расходов в среднем за май–июнь с последующим анализом стандартной ошибки и качества воспроизведения.

Результаты

Изменения водного эквивалента снега по данным наблюдений и модельных расчётов. Средние за рассматриваемый период (1980–2016 гг.) снегозапасы в конце зимы (см. рис. 2, а–в) меняются по бассейну от 80–100 мм на юго-западе до 200–220 мм на востоке и северо-востоке. Эта климатически обусловленная закономерность [26] проявляется в поле средних ВЭС, полученных из данных наблюдений (см. рис. 2, а), и в большей или меньшей

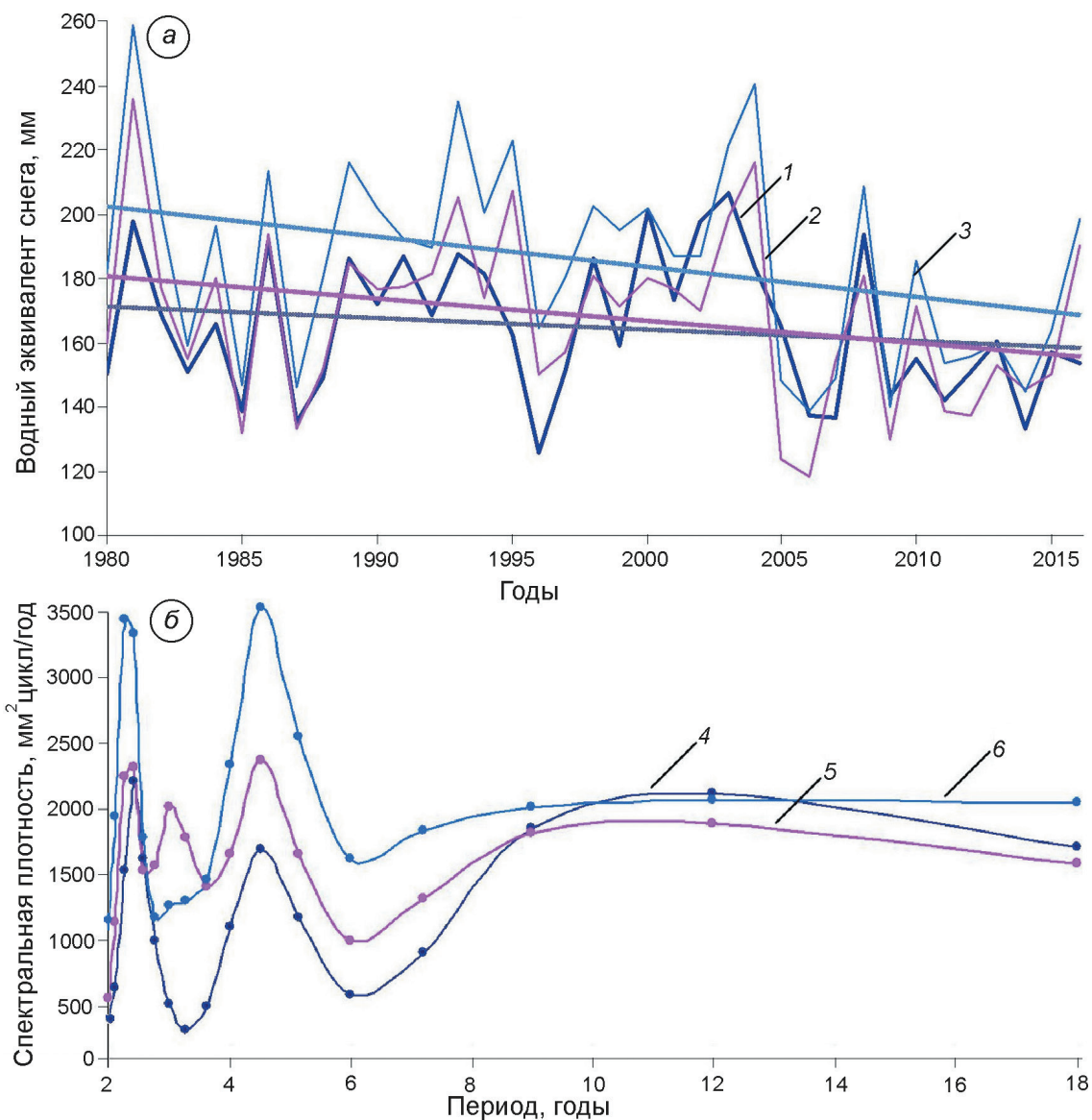


Рис. 3. Многолетняя изменчивость среднего по бассейну Северной Двины значения водного эквивалента снега, мм, (а) и функция её спектральной плотности (после удаления тренда), мм²цикл/год, (б), по данным наблюдений из архива ВНИИГМИ-МЦД (1, 4) и модельных расчётов SWAP-GPCC (2, 5) и SPONSOR-GPCC (3, 6). Прямими линиями на рис. а показаны линейные тренды

Fig. 3. Multiyear variability of the snow water equivalent, mm, spatially averaged over the Severnaya Dvina basin, mm, (a), and its spectral density (after detrending), mm²cycle/year, (b) according to the data of observations, RИИМІ-WDC (1, 4) and modelling, SWAP-GPCC (2, 5) and SPONSOR-GPCC (3, 6).

Straight lines, fig. a, show the linear trends

степени для модельных данных (см. рис. 2, б, в). Кроме того, для всех рассмотренных полей средних ВЭС можно выделить два локальных максимума—около 200–220 мм на западе и востоке бассейна, но в модельных данных очаги максимумов на востоке сдвинуты за пределы бассейна (см. рис. 2, б, в). В распределении минимумов ВЭС (около 80–100 мм) в данных наблюдений (см. рис. 2, а), как

и в полях модельных ВЭС, выделяются две области: положение одной из них, на юго-западе в верховьях р. Сухона, примерно совпадает для всех полей (см. рис. 2, а–в); другой минимум в поле средних ВЭС из данных наблюдений находится на северо-западе в среднем течении р. Пинега (см. рис. 2, а). В случае модельных данных (см. рис. 2, б, в) он располагается южнее – в среднем течении

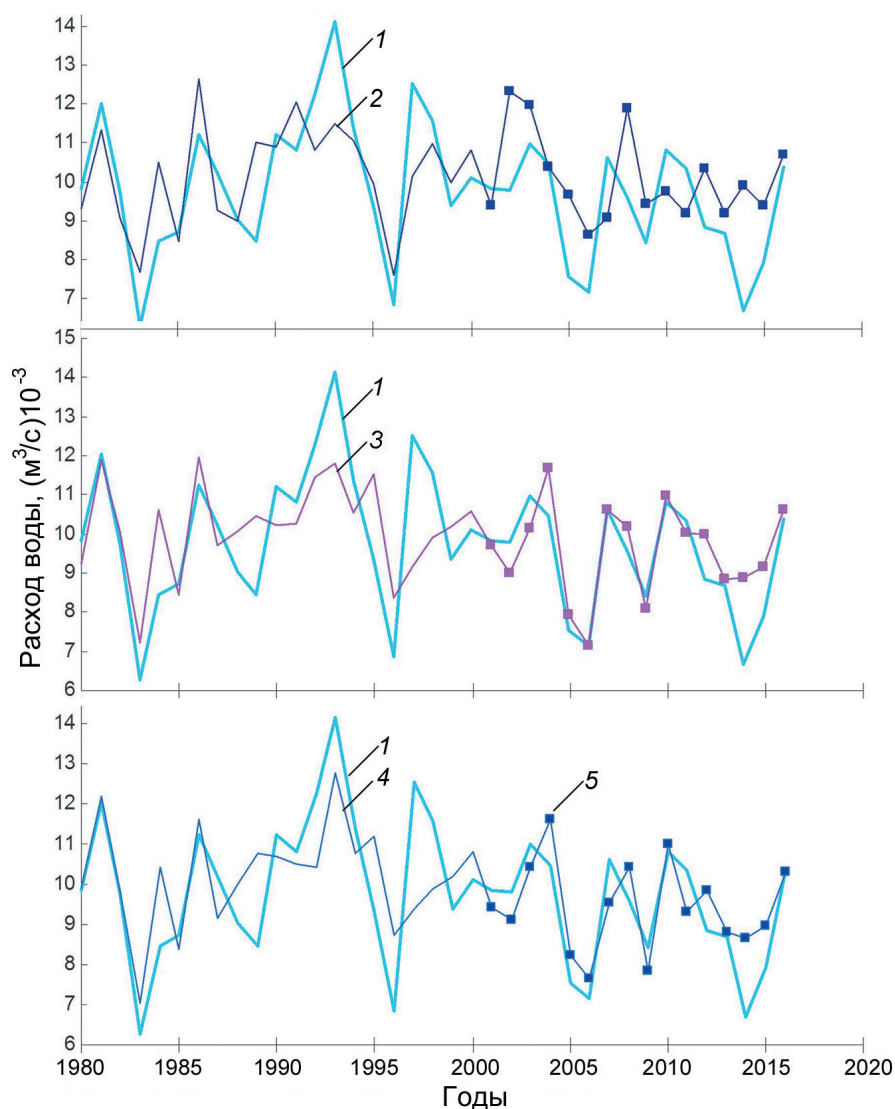


Рис. 4. Изменения средних за май–июнь расходов Северной Двины (Усть-Пинега), $(\text{м}^3/\text{с})10^{-3}$, по данным наблюдений (1) и расчётов с применением регрессионной зависимости (см. табл. 2) на основе данных о водном эквиваленте снега в конце зимы из архива ВНИИГМИ-МЦД (2) и рассчитанных на моделях SWAP-GPCC (3) и SPONSOR-GPCC (4).

Кривыми без маркера показаны расчёты, выполненные для обучающей выборки (1980–2001 гг.); кривыми с маркером (5) – расчёты «прогностических» значений, 2002–2016 гг.

Fig. 4. Severnaya Dvina discharge variation (at Ust-Pinega) in average for May–June, $(\text{m}^3/\text{sec})10^{-3}$, according to observations (1) and calculations using regression (see Table 2) on the base of the snow water equivalent data, to the end of March, from observations, RIIHMI-WDC (2) and modelling, SWAP-GPCC (3) and SWAP-CRU (4).

Curves without marker show Severnaya Dvina discharge value estimates obtained for the «learning» period, 1980–2001; curves with marker (5) indicate the estimates for the «prediction» values, 2002–2016.

р. Вага, при этом для ВЭС, рассчитанных на модели SPONSOR-GPCC, её площадь незначительна.

Сравнение *многолетних изменений* ВЭС по бассейну Северной Двины, полученных из наблюдений и в результате модельных расчётов (см. рис. 3, а), показывает сходство многолетнего хода в общих чертах, хотя есть и расхождения.

Корреляция изменений средних снеготпасов, измеренных на станциях снегомерной съёмки, с ВЭС, рассчитанными на модели SWAP, составляет 0,73; в случае SPONSOR она достигает 0,80.

Статистические характеристики многолетних изменений ВЭС, среднее значение, стандартное отклонение, оценки параметров линейного трен-

Таблица 2. Параметры регрессионной зависимости весеннего стока (средних за май–июнь расходов Северной Двины, Усть-Пинега) от аномалий снегозапасов в конце марта и оценки его воспроизведения на основе данных о водном эквиваленте снега, полученных из наблюдений (ВНИИГМИ) и расчётов на моделях локального тепло- и влагообмена SPONSOR и SWAP

Источники данных	Параметры регрессионной модели весеннего стока (1980–2001 гг.)*					Оценка результатов расчёта весеннего стока на основе регрессионной модели		
	<i>B</i>	<i>St. Err</i>	$R^2, \%$	<i>p-level</i>	<i>Err, \%</i>	Стандартная ошибка, % (2002–2016 гг.)	Ошибка воспроизведения тренда (1980–2016 гг.)	
							м ³ /с, за 10 лет	%
Наблюдения (ВНИИГМИ)	40,0	8,8	51	0,00	13	20	–280	91
SPONSOR-GPCC	34,7	8,9	49	0,00	12	8	–33	11
SWAP-GPCC	37,6	10,0	42	0,01	14	10	–105	34

**B* – коэффициент регрессии; *St. Err* – стандартная ошибка расчёта *B*; R^2 – доля объяснённой изменчивости; *p-level* – уровень статистической значимости; *Err* – средняя ошибка воспроизведения расходов Северной Двины регрессионной моделью за 1980–2001 гг., в % от многолетней нормы.

да, скорость изменений и доля тренда в общей дисперсии модельными расчётами SWAP воспроизводятся ближе к данным наблюдений по сравнению с моделью SPONSOR (см. табл. 1). Тренды ВЭС отрицательны, но их параметры не достигают уровня статистической значимости ($p \leq 0,05$). Скорость линейного сокращения ВЭС по данным наблюдений – 4 мм за 10 лет, а по данным расчётов SWA – 7 мм за 10 лет; вклад в общую дисперсию не превышает 10%. Частотно-временная структура изменений ВЭС, полученных из данных наблюдений, воспроизводится моделью SWAP только в общих чертах (см. рис. 3, а). Помимо нисходящего тренда за 1980–2016 гг., в период 1987–2007 гг. в ходе измерений ВЭС по данным наблюдений устанавливаются две десятилетние флуктуации с заметной аномалией ВЭС – в 1989–1995 и 1998–2004 гг., превышающей среднее значение ВЭС за 1980–2016 гг. на 10–15%. Анализ функции спектральной плотности изменчивости ВЭС, полученной из наблюдений, показал, что ей соответствует увеличение дисперсии в области 10–12-летних периодов (см. рис. 3, б), которое сопоставимо с пиком дисперсии в области высокочастотных колебаний – 2-х и 5-летних квазипериодичностей. Увеличение дисперсии в области 10–12-летних периодов отмечается и в спектре ВЭС, полученном для расчётов на модели SWAP, но оно несколько уступает максимумам в области высокочастотных колебаний, которые, в отличие от спектра, полученного по данным наблюдений, сливаются в сплошную полосу около периодов от двух до пяти лет (см. рис. 3, б).

Многолетние изменения ВЭС, полученные по результатам расчётов на модели SPONSOR, отличаются существенным трендом: –10 мм/10 лет (см.

табл. 1). Анализ разности между многолетними рядами ВЭС, рассчитанными на моделях SPONSOR и SWAP, и данными наблюдений показывает статистически значимые тренды на уровне $p \leq 0,05$. Это свидетельствует о статистически значимых различиях между трендами, выявленными для указанных рядов. Заметно отличаются колебания ВЭС в период 1987–2006 гг.: среднее значение за данный период превышает этот параметр, полученный по данным наблюдений и рассчитанный на модели SWAP, на 20–25 мм, что проявляется в большей, примерно на 20 мм, величине среднего значения ВЭС за рассматриваемый период в целом (см. табл. 1). По сути, согласно данным о ВЭС, рассчитанным на модели SPONSOR, в период 1987–2006 гг. в бассейне Северной Двины наблюдалась продолжительная аномалия, которая должна была отразиться в многолетнем ходе весеннего и годового стока. В спектральной структуре изменчивости ВЭС по данным модельных расчётов SPONSOR это проявляется в отсутствии роста дисперсии в области квазидесятилетних периодичностей (см. рис. 3, б) в отличие от данных стационарных наблюдений и расчётов на модели SWAP. 2-х и 5-летние периодичности, напротив, выделяются более чётко, с ними связаны два пика, описывающие значительную долю дисперсии. Спектры, как и статистические параметры (см. табл. 1), показывают, что ВЭС, рассчитанные на модели SPONSOR, отличаются наибольшей изменчивостью (см. рис. 3, б).

С конца 2000-х годов наблюдается период дефицита снегозапасов – около 10–15%, который на фоне сокращения межгодовой изменчивости показывают и данные наблюдений, и модельные расчёты (см. рис. 3, а).

Связь весеннего стока с аномалиями зимних снегозапасов. Поля коэффициентов корреляции между изменениями ВЭС и средними за май–июнь расходами Северной Двины (Усть-Пинега) позволяют судить о распределении областей, наиболее влияющих на формирование весеннего, т.е. талого стока. Сравнение областей статистически значимой ($p \leq 0,05$) корреляции $r \geq 0,40$, полученных для стационарных данных о ВЭС (см. рис. 2, а) и для модельных расчётов SWAP (см. рис. 2, б) и SPONSOR (см. рис. 2, в), показывает, что они сильно различаются как по площади, так и по локализации очагов наиболее тесной связи. Данные стационарных наблюдений демонстрируют обширную область статистически значимой корреляции (см. рис. 2, а), которая распространяется на бóльшую часть водосбора Северной Двины и почти целиком включает в себя основной приток р. Вычегда, в среднем течении которой локализованы очаг максимальной корреляции ($r \geq 0,70$) и зона влияния ($r \geq 0,65$).

Данные, полученные из модельных расчётов, как в случае SWAP, так и SPONSOR, показывают значительно меньшие по протяжённости области статистически значимой корреляции между ВЭС и весенним стоком – $r \geq 0,40$ (см. рис. 2, б, в). В случае SWAP (см. рис. 2, б) она ограничивается верховьями Северной Двины, включая водосборы левых притоков Вычегды и нижнее течение рек Сухона и Юг; очаг максимальной корреляции $r \geq 0,65$ (зона влияния) смещён по отношению аналогичного очага, полученного для стационарных данных (см. рис. 2, а), на юго-запад в область слияния рек Сухона и Юг. В случае расчётных данных SPONSOR (см. рис. 2, в) область максимальной корреляции между ВЭС и весенним стоком, т.е. зона влияния, где $r \geq 0,65$, располагается на бóльшей площади, распространяясь на северо-запад, на среднее течение Северной Двины, и на юго-восток, в междуречье рек Юг и Вычегда. Область статистически значимой корреляции $r \geq 0,40$ охватывает центральную часть водосбора Северной Двины, включая нижнее течение р. Сухона и бóльшую часть бассейнов рек Юг и Вычегда.

Регрессионные оценки вклада снегозапасов в аномалии весеннего стока и его прогнозируемость по данным о водном эквиваленте снега из разных источников. Параметры регрессионных зависимостей между снегозапасами в конце марта и ве-

сенним стоком, в качестве показателя которого рассматривался средний за май–июнь расход Северной Двины в створе Усть-Пинега, показывают, что наиболее полное описание его изменчивости в 1980–2001 гг. обеспечивается данными стационарных наблюдений (ВНИИГМИ), а также полученными в результате модельных расчётов SPONSOR (см. табл. 2). Для указанных источников доля объяснённой изменчивости достигает 51 и 49% соответственно; коэффициенты регрессии – 40,0 и 34,7 м³/с на 1 мм ВЭС. Ошибка воспроизведения стока регрессионной моделью при использовании ВЭС из данных наблюдений и рассчитанных на модели SPONSOR составляет 12–13%. В случае данных о ВЭС, полученных из расчётов SWAP, доля объяснённой изменчивости весеннего стока заметно ниже – 42%, а ошибка выше – 14%. Отметим, что для получения регрессионных оценок использованы временные ряды ВЭС в пределах областей влияния, т.е. $r \geq 0,65$. В случае модельных данных, особенно для расчётов SWAP, эти области ограничены достаточно небольшой площадью (см. рис. 2, б, в); для данных стационарных наблюдений она в несколько раз больше (см. рис. 2, а).

Анализ наблюдаемых изменений расходов Северной Двины за май–июнь и рассчитанных с применением полученных регрессионных зависимостей на основе данных о ВЭС из разных источников (см. рис. 4, а–в) показывает, что по качеству воспроизведения весеннего стока в 1980–2001 гг., т.е. в обучающей выборке, данные наблюдений и модельных расчётов SWAP и SPONSOR почти не отличаются. Отметим, что в 1994–1996 гг. лучшее, практически точное описание резкого сокращения стока дают материалы стационарных наблюдений, а в 1982–1984 гг. – данные ВЭС из модельных расчётов. Рассчитанные «прогностические» изменения весеннего стока Северной Двины за 2001–2016 гг. на основе стационарных наблюдений показывают значительные расхождения и с ходом наблюждённого стока (см. рис. 4, а), и с «прогнозом» на основе модельных данных о ВЭС (см. рис. 4, б, в). Вычисление расходов в среднем за май–июнь в 2002–2016 гг. на основе данных о ВЭС на конец марта, полученных из модельных расчётов SWAP и SPONSOR, показывает хорошее воспроизведение межгодовых тенденций и абсолютных значений (см. рис. 4, б, в). На это указывает стандартная ошибка рассчитанных значе-

ний расходов воды в 2002–2016 гг. по сравнению с наблюдаемыми (см. табл. 2) – 8–10% для данных SPONSOR и SWAP и 20% – для данных стационарных наблюдений (для обучающей выборки стандартная ошибка для указанных источников данных составляет 12–14%). Таким образом, модельные расчёты ВЭС, SWAP и SPONSOR при вычислении прогностических значений дают более адекватное описание весеннего стока по сравнению с обучающей выборкой (1980–2001 гг.) в отличие от данных стационарных наблюдений, для которых в период 2002–2016 гг. стандартная ошибка возрастает почти в полтора раза.

Для объяснения этого эффекта вернёмся к анализу полей корреляции между весенним стоком и снегозапасами (см. рис. 2, *a–в*) и проведём сравнение с аналогичными полями, полученными за 2002–2016 гг. (см. рис. 2, *г–е*). Прежде всего отметим значительные отличия полей коэффициентов корреляции, построенных на основе данных стационарных наблюдений для разных периодов (см. рис. 2, *a, г*). На фоне общего существенно ослабления корреляции область статистически значимых коэффициентов корреляции смещается на северо-восток в бассейн р. Вычегда и её притоков (см. рис. 2, *г*); в этой области значения коэффициентов корреляции находятся в пределах $0,60 > r \geq 0,50$. Существенно, что в области зоны влияния ($r \geq 0,65$), выявленной за рассматриваемый период в целом, т.е. за 1980–2016 гг., (см. рис. 2, *a*), в период 2002–2016 гг. корреляция практически не достигает уровня значимости (см. рис. 2, *г*). В случае данных о ВЭС, полученных из модельных расчётов SWAP и SPONSOR (см. рис. 2, *д, е*), в этот период связь между снегозапасами и весенними расходами усиливается, а области статистически значимой корреляции значительно расширяются на восток, северо-восток, а в случае SWAP (см. рис. 2, *д*) – и на юго-восток. Таким образом, на основной части бассейна Северной Двины, включающей в себя нижнее течение р. Сухона и водосборы рек Вычегды и Юг, в период 2002–2016 гг. корреляция между снегозапасами и весенним стоком не опускается ниже 0,50–0,60, а в пределах зон влияния, выявленных за рассматриваемый период (см. рис. 2, *б, в*), значения коэффициентов корреляции возрастают до 0,70–0,75.

В многолетней изменчивости весеннего стока за 1980–2016 гг., как и в ходе средних по бассейну Северной Двины снегозапасов, устанавливается

нисходящий тренд – около $309 \text{ м}^3/\text{с}$ за 10 лет. Главным образом он обусловлен периодом маловодья 2005–2016 гг. (см. рис. 4), который соответствует периоду дефицита ВЭС, на что указывают все рассмотренные источники данных (см. рис. 3, *a*). В связи с этим встаёт вопрос о том, насколько многолетний ход весеннего стока, рассчитанный по регрессионным моделям на основе данных о ВЭС в конце марта, воспроизводит тренд наблюдаемого стока в 1980–2016 гг. Приведённые в табл. 2 оценки показывают, что в случае применения модельных данных о ВЭС для расчёта весеннего стока наблюдаемая нисходящая тенденция воспроизводится. SPONSOR даёт минимальную ошибку – около 11%, SWAP – 34%. Данные наблюдений при использовании их в регрессионной модели стока (см. табл. 2) практически не объясняют его линейное уменьшение за 1980–2016 гг.

Обсуждение результатов

Проведено исследование изменений снегозапасов в бассейне Северной Двины в 1980–2016 гг. с оценкой информативности данных о водном эквиваленте снега из разных источников, включая стационарные наблюдения (маршрутная снегомерная съёмка) из архива ВНИИГМИ-МЦД, а также полученные в результате расчётов на моделях локального теплообмена SWAP и SPONSOR с использованием данных о метеопараметрах из архива WATCH (WFDEI) (с архивом атмосферных осадков GPCC) в координатной сетке с разрешением $0,5^\circ$. В качестве критерия информативности рассматривался вклад снегозапасов, т.е. водного эквивалента снега, на конец марта в формирование весеннего стока Северной Двины, в качестве показателя которого выбраны средние за май–июнь расходы воды в створе Усть-Пинега.

Все рассмотренные данные указывают на уменьшение средних снегозапасов в бассейне Северной Двины в конце марта в 1980–2016 гг. Близкое сходство частотно-временной структуры их изменчивости, в частности трендовой составляющей, показывают данные наблюдений и модельных расчётов SWAP. Многолетние изменения ВЭС, полученные из модельных расчётов SPONSOR, отличаются существенным нисходящим трендом. Скорость сокращения снегозапасов по данным расчётов на модели SPONSOR в

1,5–2,5 раза выше по сравнению с данными наблюдений и расчётов на модели SWAP. Другое отличие связано с продолжительной аномалией ВЭС (в среднем по бассейну), которая, согласно расчётным данным на модели SPONSOR, наблюдалась в 1987–2006 гг., в то время как по данным стационарных наблюдений и расчётов на модели SWAP во второй половине 1990-х годов (1996–1997 гг.) ВЭС снижается до минимальных значений, а его среднее значение за 1987–2006 гг. на 15–20% ниже по сравнению с расчётами на модели SPONSOR. Данные модельных расчётов по-разному передают структуру изменчивости среднего по бассейну ВЭС, на что указывают результаты спектральных оценок. В частности, данные модели SPONSOR не отражают квазидесятилетние колебания, характерные для спектра ВЭС из стационарных наблюдений, но хорошо передают высокочастотные, 2-х и 5-летние квазипериодичности. В спектре изменчивости ВЭС по данным SWAP, напротив, лучше выделяются квазидесятилетние колебания; 2-х и 5-летние квазипериодичности сливаются с единой частотной областью от двух до пяти лет. «В пользу» данных стационарных наблюдений и расчётов на модели SWAP свидетельствует присутствие квазидесятилетних периодичностей в изменчивости весеннего стока Северной Двины, а также Волги [27], водосбор которой граничит с бассейном Северной Двины на северо-востоке.

Сравнение полей средних за рассматриваемый период снеготолщин в бассейне Северной Двины для всех источников данных о ВЭС показывает климатически обусловленный рост снеготолщин с запада и юго-запада на восток и северо-восток [26, 28]. В то же время распределение максимумов и минимумов и диапазон изменчивости по бассейну имеют заметные различия, что, по-видимому, свидетельствует о неопределённости в распределении зон влияния, т.е. областей, вносящих наибольший вклад в формирование аномалий весеннего стока. Это подтверждается анализом полей корреляции весеннего стока со снеготолщинами по территории водосбора Северной Двины, который показывает, что расположение и протяжённость областей корреляции, а также теснота связи различаются в зависимости от рассматриваемых данных о ВЭС. В случае анализа данных о ВЭС, полученных из модельных расчётов SWAP и SPONSOR, области статистически значимой корреляции, как и очаги с $r \geq 0,65$ (зоны

влияния), примерно совпадают по положению, но по данным SPONSOR они распространяются на большую площадь, как и области статистически значимой корреляции между стоком и ВЭС.

Согласно данным наблюдений, область статистически значимой корреляции распространяется на большую часть бассейна, включая все притоки. Очаг максимальной корреляции $-r \geq 0,70$ сосредоточен в среднем течении Вычегды. Зона влияния, в пределах которой корреляция $r \geq 0,65$, охватывает водоразделы крупных притоков и располагается на северо-северо-востоке относительно положения, которое показывают данные ВЭС из модельных расчётов. Такая картина более реалистична по сравнению с данными модельных расчётов.

В то же время регрессионные оценки *вклада снеготолщин в изменчивость весеннего стока* за выбранный обучающий период (1980–2001 гг.) дают близкие результаты для данных наблюдений и модельных расчётов SWAP – 51 и 49% соответственно; в случае модельных расчётов SPONSOR они несколько меньше – 46%. Учитывая, что вклад в формирование весеннего речного стока, помимо снеготолщин, вносят такие факторы, как увлажнение бассейна в предшествующую осень, промерзание почвы, погодные условия в период снеготаяния и пр., воспроизведение стока по водоем гидрологическими моделями, как правило [29], сопряжено с наибольшей неопределённостью, поэтому полученный результат – около 50% изменчивости весеннего стока, объяснённых колебаниями снеготолщин, – можно признать реалистичным. Тем не менее, при использовании полученных регрессионных зависимостей для расчёта «прогностических» значений расходов Северной Двины в среднем за май–июнь в период 2001–2016 гг. на основе аномалий ВЭС в конце мая *данные стационарных наблюдений* (снеготолщинной маршрутной съёмки) показывают неудовлетворительный результат. *Данные о ВЭС, полученные из модельных расчётов*, напротив, в этот период более информативны, что указывает на возможность их использования для оценок весеннего стока. В случае прогноза с использованием полученных регрессионных зависимостей стандартная ошибка прогноза не превышает 10%.

Близкое к реальному воспроизведение тренда весеннего стока модельными данными SPONSOR можно считать подтверждением достоверности оценок тренда ВЭС, полученных по модельным

данным. В то же время нельзя не учитывать, что величина тренда в значительной степени определяется аномалиями ВЭС, связанными с квазидесятилетними флуктуациями, которые модельными расчётами SPONSOR не воспроизводятся. Это противоречие позволяет судить о параметрах тренда и вкладе квазидесятилетних колебаний в изменчивость снегозапасов лишь в интервале значений, определённых по данным из разных источников.

Не вполне ожидаемые результаты воспроизведения весеннего стока в период 2002–2016 гг., а именно: неудовлетворительное качество для ВЭС из данных наблюдений и более высокое (по сравнению с обучающим периодом 1980–2001 гг.) для модельных расчётов этого параметра в экспериментах SPONSOR и SWAP объясняются значительным изменением пространственной структуры корреляции между весенним стоком и снегозапасами в этот период. Смещение областей влияния, в пределах которых в 1980–2001 гг. выявлена наиболее тесная связь между ВЭС и стоком, и значительное ослабление связи как в этой области, так и по всему водосбору, по-видимому, показывают снижение информативности данных о снегозаписах, полученных из наблюдений.

Причиной этого, вероятно, может быть изменение зимних условий снегонакопления, в частности рост повторяемости зимних оттепелей, и как следствие – фазовые переходы внутри толщи снега, способные привести к росту вероятности погрешностей измерений. Известно, что образование ледяных прослоек, уплотнение и налипание снега, связанное с оттепелями, значительно осложняют соблюдение требований к отбору проб при проведении снегосъёмки [30]. О влиянии меняющихся климатических условий, по-видимому, свидетельствует и выявленное расширение областей значимой корреляции между снегозапасами и весенним стоком на север и северо-восток бассейна Северной Двины, которое показывают данные модельных расчётов ВЭС для периода 2002–2016 (2013) гг., но при этом в зонах влияния, полученных для 1980–2001 гг., корреляция усиливается. Формирование аномалий снегозапасов в условиях высокой повторяемости зимних оттепелей требует дополнительного изучения, предусматривающего анализ внутрисезонной динамики и метеорологических условий снегонакопления с учётом пространственного распределения и ландшафтных особенностей.

Выводы

Результаты оценки информативности рассмотренных данных о водном эквиваленте снега (ВЭС) с точки зрения описания аномалий весеннего стока Северной Двины позволяют говорить о преимуществе модельных данных по сравнению с материалами стационарных наблюдений, во всяком случае для изучаемого региона. По-видимому, это может быть обусловлено не только высокой разрешающей способностью, но и учётом комплекса метеорологических показателей, что, в отличие от наземных измерений, обеспечивает модельным расчётам ВЭС меньшую зависимость от погодных условий, влияющих на слоистую структуру толщи снега. Потепление климата и изменение условий формирования снегозапасов требуют дополнительного изучения этих вопросов. Очевидно, что основное условие успешности модельных расчётов – это качество входной метеорологической информации, которая в описываемых экспериментах представлена реанализом WATCH (WFDEI) и архивом атмосферных осадков GPCC. Данное утверждение в основном относится к межгодовым аномалиям ВЭС. В описании структуры изменчивости, в частности, вклада низкочастотной составляющей (тренда) и квазидесятилетних колебаний, а также пространственных особенностей распределения ВЭС, сохраняется неопределённость, связанная как с возможностями рассмотренных моделей (и используемых сеточных архивов данных об атмосферных осадках), так и с недостатками сети стационарных измерений (неравномерность и недостаточная плотность, погрешности измерений и пр.).

Суммируя результаты анализа изменений снегозапасов в бассейне Северной Двины в 1980–2016 гг. с учётом отмеченных неопределённостей, можно прийти к следующим выводам. В изменчивости водного эквивалента снега к концу марта в среднем по бассейну выделяются: низкочастотная составляющая, т.е. тренд; высокочастотная; 2-х и 5-летние квазипериодичности; квазидесятилетние колебания. В спектре изменчивости по данным стационарных наблюдений дисперсия ВЭС поделена примерно поровну между квазипериодичностями. В той или иной степени они проявляются в данных модельных расчётов SWAP, в данных SPONSOR выражаются только 2-х и 5-летние. С квазидесятилетними

колебаниями связаны продолжительные аномалии ВЭС 1989–1995 и 1999–2005 гг. и абсолютный минимум 1996 г., которые почти синхронно отражаются в аномалиях весеннего стока.

С 2005 г. все рассмотренные источники данных указывают на продолжительный период дефицита ВЭС – 15–20%, с которым связан нисходящий тренд снегозапасов в бассейне Северной Двины за рассматриваемый период в целом. Оценки параметров тренда находятся в широком диапазоне в зависимости от источника данных – в среднем по бассейну скорость уменьшения ВЭС может составлять от 4 мм по данным стационарных измерений до 10 мм за 10 лет по данным расчётов на модели SPONSOR; доля тренда в общей изменчивости, согласно полученным оценкам, – от 3 до 12%. Это – небольшие изменения, но они могут свидетель-

ствовать о переходе к новому режиму, связанному с продолжающимся потеплением переходных сезонов, которое на этом этапе приведёт к существенному сокращению периода накопления снегозапасов [31, 32]. Отметим, что до 2005 г. и данные наблюдений, и модельные расчёты указывают на рост снегозапасов в бассейне Северной Двины.

Благодарности. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0148-2019-0009 при поддержке РФФИ, проект № 18-05-60067.

Acknowledgments. The work was supported by the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, № 0148-2019-0009, and the Russian Foundation for Basic Research, projects № 18-05-60067.

Литература

1. *Brown R.D., Derksen C.* Is Eurasian October snow cover extent increasing? // *Environment Research Letters*. 2013. V. 8. № 2. P. 024006. doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
2. *Khan V., Holko L., Rubinstein K., Breiling M.* Snow Cover Characteristics over the Main Russian River Basins as Represented by Reanalyses and Measured Data // *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2008. V. 47. P. 1819–1833.
3. *Turkov D.V., Sokratov V.S., Titkova T.B., Semenov V.A., Popova V.V.* Snow Water Equivalent in Western Siberia as simulated by land-surface model, satellite data and from ERA-Interim reanalysis // *Proc. SPIE 10466, 23rd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017. V. 10466. P. 55. doi: 10.1117/12.2285333.
4. *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. Т. 55. № 4. С. 73–86. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
5. *Popova V., Babina E., Georgiadi A., Turkov D.* Snowfall and rainfall precipitation variation in European Russia: impact on river runoff under contemporary climate change // *Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences*. 2018. P. 506–512.
6. *Георгиевский М.В., Хомякова В.А., Паршина Т.В.* Оценка точности глобальных данных по влагозапасам в снежном покрове на примере бассейна р. Северная Двина // *Вестн. Санкт-Петербургского*

References

1. *Brown R.D., Derksen C.* Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environ. Research Letters*. 2013, 8 (2): 024006. doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
2. *Khan V., Holko L., Rubinstein K., Breiling M.* Snow Cover Characteristics over the Main Russian River Basins as Represented by Reanalyses and Measured Data. *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2008, 47: 1819–1833.
3. *Turkov D.V., Sokratov V.S., Titkova T.B., Semenov V.A., Popova V.V.* Snow Water Equivalent in Western Siberia as simulated by land-surface model, satellite data and from ERA-Interim reanalysis. *Proc. SPIE 10466, 23rd Intern. Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017, 10466: 55. doi: 10.1117/12.2285333.
4. *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. Ice and Snow*. 2015, 55 (4): 73–86. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86. [In Russian].
5. *Popova V., Babina E., Georgiadi A., Turkov D.* Snowfall and rainfall precipitation variation in European Russia: impact on river runoff under contemporary climate change. *Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences*. 2018: 506–512.
6. *Georgievsky M.V., Khomyakova V.A., Parshina T.V.* Accuracy evaluation of snow water equivalent global data: the case of the Northern Dvina River basin. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Bulletin of Saint Petersburg University*. 2020, 65 (3). doi: 10.21638/spbu07.2020.302. [In Russian].

- гос. ун-та. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 3. doi: 10.21638/spbu07.2020.302.
7. Калашникова О.Ю., Гафуров А.А. Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 507–517. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-507-517.
 8. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys#описание-массива-данных>.
 9. Brun E., Voinnet V., Boone A., Decharme B., Peyngs Y., Valette R., Karbou F., Morin S. Simulation of Northern Eurasian Local Snow Depth, Mass, and Density Using a Detailed Snowpack Model and Meteorological Reanalyses // Journ. of Hydrometeorology. 2013. V. 14. P. 203–219.
 10. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 2. С. 44–52. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-44-52.
 11. Гусева Е.В., Голубев В.Н. Математическая модель формирования строения и свойств снежного покрова // МГИ. 1989. Вып. 68. С. 18–25.
 12. Fierz C., Lehning M. Assessment of the microstructure-based snow-cover model SNOWPACK: thermal and mechanical properties // Cold Regions Science and Technology. 2001. V. 33. № 2–3. P. 123–131.
 13. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
 14. 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.
 15. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global and Planetary Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
 16. Krinner G., Derksen C., Essery R., Flanner M., Hagemann S., Clark M., Hall A., Rott H., Brutel-Vuilmet C., Kim H., Ménard C.B., Mudryk L., Thackeray C., Wang L., Arduini G., Balsamo G., Bartlett P., Boike J., Boone A., Chéruy F., Colin J., Cuntz M., Dai Y., Decharme B., Derry J., Ducharme A., Dutra E., Fang X., Fierz C., Ghattas J., Gusev Y., Haverd V., Kontu A., Lafaysse M., Law R., Lawrence D., Li W., Marke T., Marks D., Ménégoz M., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Raleigh M.S., Schaedler G., Semenov V., Smirnova T.G., Stacke T., Strasser U., Svenson S., Turkov D., Wang T., Wever N., Yuan H., Zhou W., Zhu D. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev. 2018. № 11. P. 5027–5049. doi: 10.5194/gmd-11-5027-2018.
 17. Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E. The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d) // Journ. of Hydrometeorology. 2001. V. 2. № 1. P. 7–25.
 7. Kalashnikova O.Y., Gafurov A.A. Water availability forecasting for Naryn River using ground-based and satellite snow cover data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (4): 507–517. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-507-517. [In Russian].
 8. <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>.
 9. Brun E., Voinnet V., Boone A., Decharme B., Peyngs Y., Valette R., Karbou F., Morin S. Simulation of Northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses. *Journ. of Hydrometeorology*. 2013, 14: 203–219.
 10. Gelfan A.N., Moreido V.M. Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 54 (2): 44–52. doi: 10.15356/20.76-6734-2014-2-44-52. [In Russian].
 11. Guseva E.V., Golubev V.N. Mathematical model of formation of structure and properties of snow cover. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1989, 68: 18–25. [In Russian].
 12. Fierz C., Lehning M. Assessment of the microstructure-based snow-cover model SNOWPACK: thermal and mechanical properties. *Cold Regions Science and Technology*. 2001, 33 (2–3): 123–131.
 13. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vla-goobmena poverhnosti sushy s atmosferoy*. Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with the atmosphere. Moscow: Nauka, 2010: 328 p. [In Russian].
 14. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Model of snow cover considering its layered structure and seasonal evolution. *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere*. 2009, XIII (4): 69–79. [In Russian].
 15. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements. *Global and Planetary Change*. 1998, 19 (1–4): 49–62.
 16. Krinner G., Derksen C., Essery R., Flanner M., Hagemann S., Clark M., Hall A., Rott H., Brutel-Vuilmet C., Kim H., Ménard C.B., Mudryk L., Thackeray C., Wang L., Arduini G., Balsamo G., Bartlett P., Boike J., Boone A., Chéruy F., Colin J., Cuntz M., Dai Y., Decharme B., Derry J., Ducharme A., Dutra E., Fang X., Fierz C., Ghattas J., Gusev Y., Haverd V., Kontu A., Lafaysse M., Law R., Lawrence D., Li W., Marke T., Marks D., Ménégoz M., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Raleigh M.S., Schaedler G., Semenov V., Smirnova T.G., Stacke T., Strasser U., Svenson S., Turkov D., Wang T., Wever N., Yuan H., Zhou W., Zhu D. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geosci. Model Dev*. 2018, 11: 5027–5049. doi: 10.5194/gmd-11-5027-2018.
 17. Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E. The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d). *Journ. of Hydrometeorology*. 2001, 2 (1): 7–25.
 18. Etchevers P., Martin E., Brown R. Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). *Annals of Glaciology*. 2004, 38: 150–158.

18. *Etchevers P., Martin E., Brown R.* Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project) // *Annals of Glaciology*. 2004. V. 38. P. 150–158.
19. *Snow and Climate / Eds. R.L. Armstrong, E. Brun.* Cambridge University Press, 2008, 222 p.
20. *Турков Д.В., Сократов В.С.* Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 3. С. 369–380. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
21. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Расчёты формирования снежного покрова на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // *Лёд и Снег*. 2019. Т. 59. № 2. С. 167–181. doi: 10.15356/2076-6734-2019-2-401.
22. Электронный ресурс: https://esg.pik-potsdam.de/search/isimip/?model=WFDEI&dataset_type.
23. Электронный ресурс: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>.
24. Электронный ресурс: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>.
25. Электронный ресурс: <https://rims.unh.edu/data/station>.
26. *Национальный Атлас Арктики / Ред. В.В. Абрамченко.* М.: Роскартография, 2017. 480 с.
27. *Попова В.В., Георгиади А.Г.* Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и Североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2017. № 2. С. 47–59. doi: 10.15356/0373-2444-2017-2-47-59.
28. *Шмакин А.Б.* Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // *Лёд и Снег*. 2010. № 1. С. 43–58.
29. *Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E.* Largebasin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015. № 19. P. 2737–2754. doi: 10.5194/hessd-12-2305-2015.
30. *Руководство по гидрологической практике (ВМО-№ 168).* Шестое издание. Т. I. Г. 3. Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, 2011. 33 с.
31. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год.* М.: Росгидромет, 2017. 70 с.
32. *Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А.* Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением Кriosфера Земли. 2018. Т. XXII. № 4. С. 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75)
33. *Snow and Climate / Eds. R.L. Armstrong, E. Brun.* Cambridge University Press. 2008: 222 p.
34. *Turkov D.V., Sokratov V.S.* Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (3): 369–380. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380. [In Russian].
35. *Gusev E.M., Nasonova O.N.* Simulating of snow cover formation by the model of interaction between the land surface and the atmosphere (SWAP). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (2): 167–181. doi:10.15356/2076-6734-2019-2-401. [In Russian].
36. https://esg.pik-potsdam.de/search/isimip/?model=WFDEI&dataset_type.
37. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>.
38. <http://www.cru.uea.ac.uk/data>.
39. <https://rims.unh.edu/data/station>.
40. *Natsionalnyy Atlas Arktiki.* National Atlas of the Arctic. Ed. V.V. Abramchenko. Moscow: Roskartografiya, 2017: 480 p. [In Russian].
41. *Popova V.V., Georgiadi A.G.* Spectral evaluations of the link between of Volga-river runoff and North Atlantic oscillation variability in 1882–2007. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya.* Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geogrphy Series. 2017, 2: 47–59. doi: 10.15356/0373-2444-2017-2-47-59. [In Russian].
42. *Shmakin A.B.* Climate characteristics of snow cover in Northern Eurasia and their changes in recent decades. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2010, 1: 43–58. [In Russian].
43. *Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E.* Largebasin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015, 19: 2737–2754. doi: 10.5194/hessd-12-2305-2015.
44. *Rukovdstvo po gidrologicheskoi praktike (VMO-№ 168), shestoe izdanie.* Guide to hydrological practice (WMO-№ 168), sixth edition. V. I. Ch. 3. Geneva: World Meteorological Organization, 2011: 33 p. [In Russian].
45. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2016 god.* Report on climate features in the Russian Federation for 2016. Moscow: Rosgidromet, 2017: 70 p. [In Russian].
46. *Popova V.V., Shiryayeva A.V., Morozova P.A.* Changes in the snow depth characteristics in the territory of Russia in 1950–2013: the regional features and connection with the global warming *Kriosfera Zemli.* Earth Cryosphere. 2018, XXII (4): 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75). [In Russian].