

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.048

ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА СУШИ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА¹

© 2021 г. О. Н. Насонова^{а, *}, Е. М. Гусев^а, Е. Э. Ковалев^а, Е. А. Шурхно^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: olniknas@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.09.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

По материалам международного проекта ISI-MIP проведены глобальные расчеты составляющих водного баланса для всей поверхности суши земного шара (за исключением Антарктиды) с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ за период 1971–2099 гг. с использованием физико-математической модели SWAP, описывающей процессы тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с приземным слоем атмосферы, и суточных значений метеорологических элементов, полученных по пяти глобальным климатическим моделям (GCMs: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M) для каждого из четырех сценариев изменения климата семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5). Результаты 20 вариантов расчета послужили основой для вычисления в глобальном масштабе климатических значений годовых сумм атмосферных осадков, слоя стока и суммарного испарения для исторического и трех прогностических периодов (2006–2036, 2037–2067, 2068–2099), что позволило получить оценки возможных изменений составляющих водного баланса для каждого прогностического периода по отношению к историческому и оценить их неопределенности, обусловленные применением различных GCMs и RCP-сценариев.

Ключевые слова: составляющие водного баланса, модель SWAP, ISI-MIP, RCP-сценарии, прогностические оценки, неопределенности.

DOI: 10.31857/S0321059621040155

ВВЕДЕНИЕ

Предполагаемые изменения климата нашей планеты неизбежно окажут влияние на окружающую среду и различные сферы человеческой деятельности. В связи с этим поиск ответа на вопрос, какими будут последствия климатических изменений, представляет собой весьма актуальную задачу в области наук о Земле. Актуальность указанной задачи подчеркивает организация в 2012 г. международного проекта ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) [34], изначально ориентированного на координацию усилий, направленных на моделирование в глобальном масштабе влияния изменения климата на три важнейших сектора: сельское хозяйство, водные ресурсы и экосистемы. Впоследствии набор секторов был расширен, а глобальные исследования

дополнены региональными. Одна из задач водного сектора состояла в получении сценарных прогностических оценок (и их неопределенностей) климатически обусловленного изменения стока 12 крупных рек в различных районах земного шара (“Regional Water Sector”) [23] и составляющих водного баланса суши в глобальном масштабе (“Global Water Sector”) [17].

Данная работа – продолжение предыдущих исследований авторов [4, 18–20, 31, 32], выполненных в рамках и по материалам международного проекта ISI-MIP в региональном масштабе, в результате которых получены прогностические оценки изменения составляющих водного баланса и их неопределенности для 11 речных бассейнов с использованием разработанной в ИВП РАН физико-математической модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants) [2] и рядов суточных значений метеорологических элементов, рассчитанных по пяти глобальным климатическим моделям (GCMs: Global Climate

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (раздел “Методология”, тема 0147-2018-0001, государственная регистрация АААА-А18-118022090056-0) и при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-17-10039, раздел “Результаты”).

Models) до конца XXI в. для четырех климатических сценариев семейства RCP (Representative Concentration Pathway). В отличие от указанных публикаций в настоящей работе представлены результаты исследований в глобальном масштабе.

Цель работы – моделирование изменений составляющих водного баланса всей поверхности суши земного шара (за исключением Антарктиды) вследствие возможного изменения климата в XXI в. с оценкой неопределенности полученных результатов, обусловленных использованием различных GCMs и климатических сценариев семейства RCP, а также исследование закономерностей пространственного распределения изменений составляющих водного баланса и их неопределенностей.

МЕТОДОЛОГИЯ

Для расчета составляющих водного баланса суши в данной работе также использовалась модель SWAP.

Модель SWAP

Модель SWAP – физико-математическая, не гидрологическая, модель относится к классу моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой (Land Surface Models – LSMs). Детальное описание модели и результаты ее проверок можно найти в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях, в значительной мере представленных в монографии [2]. Отметим здесь лишь, что модель применялась для расчета характеристик тепло- и влагообмена для объектов, расположенных в различных физико-географических условиях и разных пространственных масштабах (от экспериментальной площадки до речных бассейнов разных размеров, а также для континентов и всей поверхности суши, за исключением Антарктиды).

Адаптация модели SWAP к проведению глобальных расчетов описана в [3]. Расчеты составляющих водного и теплового балансов для исторического периода по модели SWAP впервые проводились для одноградусных ячеек сетки, покрывающей всю поверхность суши земного шара (за исключением Антарктиды), в процессе участия в международном проекте GSWP-2 (Second Global Soil Wetness Project) [15] в рамках всемирной программы по исследованию климата (World Climate Research Programme – WCRP); полученные результаты представлены в [3, 10, 11, 30]. Смоделированные составляющие водного (сток и суммарное испарение) и теплового (потoki скрытого и явного тепла, радиационный баланс) балансов были сопоставлены с соответствующими оценками, имеющимися в литературе. Результаты сопоставления позволили сделать вывод о воз-

можности использования модели SWAP для глобальных расчетов [3, 30].

Именно эта версия модели SWAP использована в настоящей работе для расчетов составляющих водного баланса суши. При этом поверхность суши представлена совокупностью ячеек регулярной сетки с пространственным разрешением по широте и долготе $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Общее количество расчетных ячеек составило 67177, каждая из которых обеспечена исходной метеорологической информацией и параметрами подстилающей поверхности.

Глобальные данные по метеорологическим характеристикам

Метеорологическое обеспечение расчетов по модели SWAP включает в себя атмосферные осадки, температуру и влажность воздуха, интенсивность приходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, скорость ветра и атмосферное давление.

Для исторических (базовых) расчетов по модели SWAP для каждой ячейки расчетной сетки подготовлены ряды суточных значений метеорологических элементов за период 1969–2001 гг. с использованием базы данных WATCH [35], предоставленной организаторами проекта ISI-MIP. База данных WATCH создана на основе результатов реанализа ERA-40, гибридизированных для устранения систематических ошибок с месячными значениями данных наземных измерений из баз GPCC (Global Precipitation Climatology Center) и университета Восточной Англии CRU (Climatic Research Unit), включающих в себя температуру воздуха, количество дней с осадками, облачность и осадки. Достоверность базы данных WATCH проверялась на основе сопоставления с данными измерений, проводившихся на ряде малых водосборов и на экспериментальных площадках сети FLUXNET.

Для прогностических расчетов составляющих водного баланса по модели SWAP использовались суточные значения метеорологических элементов за период 2006–2099 гг., рассчитанные по пяти глобальным климатическим моделям (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M) для четырех климатических сценариев семейства RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5), подготовленных для 5-го оценочного доклада IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Числа при аббревиатуре семейства сценариев соответствуют приращению значений приходящей радиации ($Вт/м^2$) в 2100 г., вызванному увеличением эмиссии парниковых газов в атмосферу по сравнению с доиндустриальным периодом. RCP8.5 представляет собой наиболее агрессивный сценарий, обусловленный

повышенной эмиссией парниковых газов в атмосферу и слабыми мерами по ограничению их выбросов. Помимо прогностических значений, в работе использовались рассчитанные по пяти указанным GCMs значения метеорологических элементов для исторического периода (1971–2005 гг.). Поскольку расчеты по GCMs далеки от совершенства и могут содержать систематические ошибки, в рамках проекта ISI-MIP была проведена постпроцессинговая коррекция (bias-correction) смоделированных значений метеорологических характеристик по данным WATCH [22].

Параметры подстилающей поверхности

При использовании модели SWAP каждая расчетная ячейка должна быть обеспечена параметрами подстилающей поверхности, включая параметры почвы и растительности. Для этого была подготовлена база данных с полуградусным разрешением по широте и долготе с использованием экосистемной базы данных ECOCLIMAP, разработанной Национальным центром метеорологических исследований CNRM/GAME (Météo-France, Тулуза, Франция) [25].

ECOCLIMAP – глобальная база параметров подстилающей поверхности суши с разрешением 1 × 1 км, полученная путем объединения существующих карт растительного покрова земной поверхности и климатических карт, а также дополненная спутниковой информацией высокого разрешения (Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR). В основу ECOCLIMAP положена классификация из двухсот пятнадцати экосистем. Для расчетов по модели SWAP параметры подстилающей поверхности из ECOCLIMAP агрегированы для каждой полуградусной ячейки сетки; при этом нереальные значения скорректированы по методике, приведенной в [3]. Полученная полуградусная база данных дополнена рядом специфических параметров растительного покрова, необходимых для расчетов по модели SWAP, оценка которых проводилась по аналогии с [3].

Помимо параметров растительности, для каждой ячейки сетки необходимы гидрофизические параметры почвы (в частности пористость, наименьшая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации, а также потенциал почвенной влаги при насыщении и В-параметр, идентифицирующие почву на основе связи ее капиллярно-сорбционного потенциала с влажностью в рамках модели Клэппа и Хорнбергера [13]). Поскольку указанные параметры в ECOCLIMAP отсутствовали, они рассчитаны по данным о механическом составе почвы (CLAY и SAND) на основе уравнений, приведенных в [14].

Сценарные оценки изменений составляющих водного баланса в XXI в. и их неопределенности

Скорректированные ряды метеорологических элементов использованы для расчета стока и суммарного испарения по модели SWAP. В результате для каждой расчетной ячейки получено 20 вариантов (5 GCMs × 4 сценария) динамики составляющих водного баланса за период с 1971 по 2099 г. Расчеты проводились с суточным шагом, однако в данной работе будут рассматриваться только годовые климатические (осредненные за ~30 лет) значения. Для этого расчетный период был разделен на четыре части: исторический период P_H и три прогностических P_i ($i = 1, 2, 3$ соответственно для периодов 2006–2036, 2037–2067 и 2068–2099 гг.). Годовые значения составляющих водного баланса (стока R , суммарного испарения E и атмосферных осадков Pr) осреднялись по каждому периоду для получения климатических значений. Изменения климатических значений каждой переменной $\Delta X_{GCM RCP P_i}$ ($X = R, E, Pr$), полученные для каждой GCM, каждого RCP-сценария и каждого прогностического периода P_i , рассчитывались как разность между прогнозируемыми $X_{GCM RCP P_i}$ и историческими значениями $X_{GCM P_H}$ (рассчитанными для каждой GCM и осредненными за 1971–2005 гг.):

$$\Delta X_{GCM RCP P_i} = X_{GCM RCP P_i} - X_{GCM P_H}. \tag{1}$$

Относительные изменения определялись следующим образом:

$$\Delta X_{GCM RCP P_i} \% = \frac{\Delta X_{GCM RCP P_i}}{X_{GCM P_H}} \times 100\%. \tag{2}$$

Таким образом, для каждой ячейки расчетной сетки получено по 20 значений $\Delta X_{GCM RCP P_i}$ и $\Delta X_{GCM RCP P_i} \%$ (для каждой переменной и для каждого прогностического периода), по которым рассчитывались среднее по ансамблю значение M , стандартное отклонение STD и вариационный размах Range как разность между наибольшим и наименьшим значениями ΔX :

$$Range = \Delta X_{max} - \Delta X_{min}. \tag{3}$$

Вариационный размах характеризует разброс и связанную с ним неопределенность в оценках изменения составляющих водного баланса из-за различий в использованных в данном исследовании GCM-моделях и RCP-сценариях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

*Результаты расчетов по модели SWAP
для исторического периода
с использованием базы данных WATCH*

Прежде всего по модели SWAP были проведены расчеты для исторического периода с использованием суточных значений метеорологических характеристик из базы данных WATCH. На их основе получены климатические (осредненные за базовый 30-летний период) значения годовых сумм слоев стока R и суммарного испарения E для каждой расчетной ячейки. Глобально осредненные (средневзвешенные по площадям ячеек) значения составляющих водного баланса суши сопоставлены с соответствующими оценками из различных литературных источников. Результаты сопоставления приведены на рис. 1, где “WATCH” соответствует расчетам по модели SWAP с использованием базы данных WATCH. Как видно из рис. 1, оценки, полученные разными авторами, существенно различаются. Так, осадки варьируют от 712 [27] до 875 мм/год (по оценкам проекта “20 Century” из [5]), сток от 266 [12] до 348 мм/год [15], испарение от 420 [1] до 588 мм/год (“20 Century” из [5]), коэффициент стока от 0.33 (“20 Century” из [5]) до 0.42 [1, 15]. Эти различия связаны с разными периодами осреднения, разными методиками расчета, появлением новых данных измерений и т.п. Глобально осредненные климатические осадки в базе данных WATCH составили 872 мм/год, а соответствующие им рассчитанные по модели SWAP климатические значения слоя стока, испарения и коэффициента стока равны 390 мм/год, 475 мм/год и 0.45 соответственно. Как видно, в целом результаты расчетов по SWAP неплохо согласуются с оценками других авторов. Наиболее близкое соответствие получено с оценками, приведенными в [15], представляющими собой результаты осреднения по ансамблю 15 LSM-моделей (в том числе и SWAP), участвовавших в международном проекте GSWP2. Интересно, что при этом периоды осреднения существенно различаются: 10-летний период (1986–1995 гг.) в GSWP2 против 30-летнего (1971–2001 гг.) в настоящей работе.

На рис. 2а, 2б показано пространственное распределение климатического годового стока, рассчитанного по модели SWAP с использованием базы данных WATCH и построенного по данным [16]. Последние представляют собой значения климатического композитного стока (“composite runoff”) в узлах сетки с полуградусным пространственным разрешением, полученные в результате комбинирования измеренного стока с рассчитанным по воднобалансовой модели WBM (Water Balance Model) климатическим стоком. По мнению авторов [16], построенные ими глобальные поля композитного стока на момент написания

ими статьи были наиболее точными. Визуальное сопоставление полученных карт показывает, что SWAP адекватно воспроизводит основные особенности пространственного распределения стока по земному шару. Глобально осредненные по 58140 расчетным ячейкам (с учетом площадей ячеек) климатические значения годового стока равны 300 и 375 мм/год соответственно по данным [16] и расчетам по модели SWAP. Расхождения могут быть связаны с разными периодами осреднения, ошибками измерений, ошибками расчета по моделям WBM и SWAP, разными исходными данными, использованными указанными моделями для расчетов стока.

На рис. 2в, 2г приведены глобальные карты климатических значений суммарного испарения, рассчитанного по моделям SWAP и GLEAM v3 (“Global Land surface Evaporation: the Amsterdam Methodology”, третья версия) [26, 29]. Модель GLEAM разработана с целью наиболее полного использования спутниковой информации для расчета испарения с поверхности суши в глобальном масштабе. В основе модели – уравнение испарения Пристли и Тэйлора, позволяющее проводить расчет испарения для трех подстилающих поверхностей (оголенной почвы, низкорослой и высокой растительности) с минимальным набором переменных, большая часть которых (в частности влажность почвы, температура подстилающей поверхности, плотность растительного покрова) может быть измерена со спутников. Глобальная база данных GLEAM содержит суточные данные по суммарному испарению с пространственным разрешением по широте и долготе 0.25° за период 1980–2017 гг. Сопоставление глобальных карт суммарного испарения, полученных по SWAP и GLEAM, показывает неплохое соответствие между ними. Глобально осредненные по 65644 расчетным ячейкам климатические значения годового суммарного испарения составляют 529 и 466 мм/год по GLEAM и SWAP соответственно. Опять же различия связаны с разными методиками расчета, исходными данными и периодами осреднения, но следует отметить, что оба значения находятся в диапазоне оценок (420–588 мм/год), найденных в литературных источниках.

Для выявления географических закономерностей полученных расхождений рассмотренные выше характеристики осреднены по гидрологическим поясам (“hydrobelts”), представленным в [28]. В соответствии с гидроклиматическими характеристиками суши и с учетом границ речных бассейнов в [28] выделено восемь гидрологических поясов: ледниковый (ICE), бореальный (BOR – Boreal), северные средние широты (NML – Northern Mid Latitude), северный сухой (NDR – Northern Dry), северный субтропический (NST – Northern Sub Tropical), экваториальный

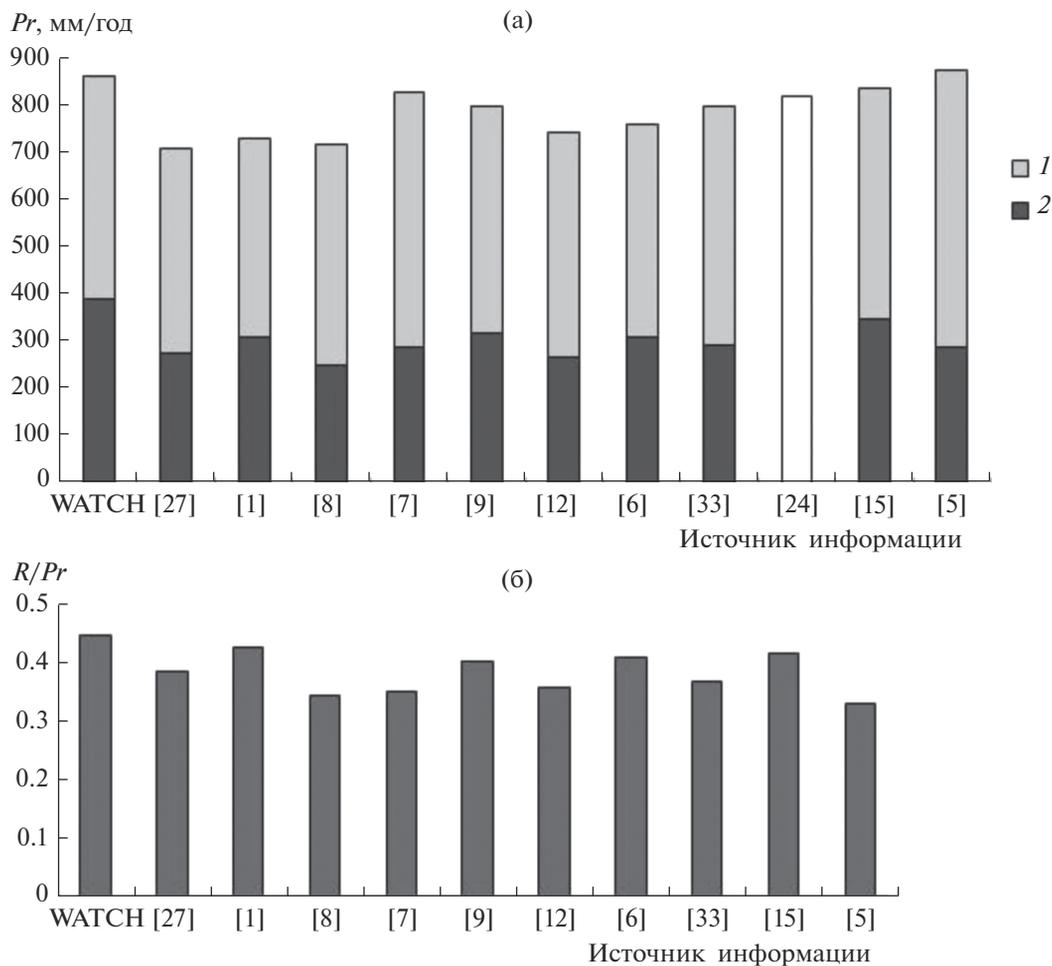


Рис. 1. Климатические (осредненные за базовый период) значения глобальных годовых сумм осадков Pr , содержащихся в базе данных WATCH, с разделением в соответствии с расчетами по модели SWAP на суммарное испарение E (1) и сток R (2) (а); климатические значения коэффициентов стока (б), а также данные из литературных источников.

(EQT – Equatorial), южный субтропический (SST – Southern Sub Tropical), южный сухой (SDR – Southern Dry) и южные средние широты (SML – Southern Mid Latitude). Результаты сопоставления составляющих водного баланса по указанным поясам приведены в табл. 1 и на рис. 3а, 3б.

Сопоставляя климатический сток R_w , рассчитанный по модели SWAP с использованием базы данных WATCH, и сток R_f , рассчитанный по данным [16], можно отметить, что очень хорошее соответствие (расхождение $\leq 8\%$) получено в ледниковом, бореальном и среднеширотных поясах обоих полушарий (пояса 0, 1, 2 и 8) (табл. 1, рис. 3а). В сухих поясах расхождения тоже невелики (20–24 мм/год), хотя в относительных единицах из-за малости стока они кажутся большими (64–68%). Наибольшее расхождение – в экваториальном поясе (5): $R_w > R_f$ на 343 мм/год (36%).

Смоделированное суммарное испарение E_w сопоставлено с испарением E_g из GLEAM и с испарением E_c , рассчитанным как разность между

климатическими осадками Pr_m из табл. 3 в [28] и климатическим стоком R_f , у которых периоды осреднения практически одинаковы. Следует отметить, что климатические значения E_c и E_g несколько отличаются друг от друга, максимальное различие (106 мм/год) получено в бореальном поясе (1), в этом случае полученное значение E_w занимает промежуточное положение. В целом, как наглядно видно на рис. 3б, величины испарения E_w , E_g и E_c неплохо согласуются между собой во всех поясах, несмотря на сдвиг периодов осреднения (табл. 1), за исключением экваториального. Остановимся на возможных причинах занижения моделью SWAP испарения и завышения стока в экваториальном поясе.

Как показано в [10, 30], наибольшее влияние на расчеты стока и испарения по модели SWAP оказывают заданные величины осадков, входящей радиации и гидрофизических параметров почвы. Как видно из табл. 1 и рис. 3а, климатические годовые осадки Pr_w из базы данных WATCH,

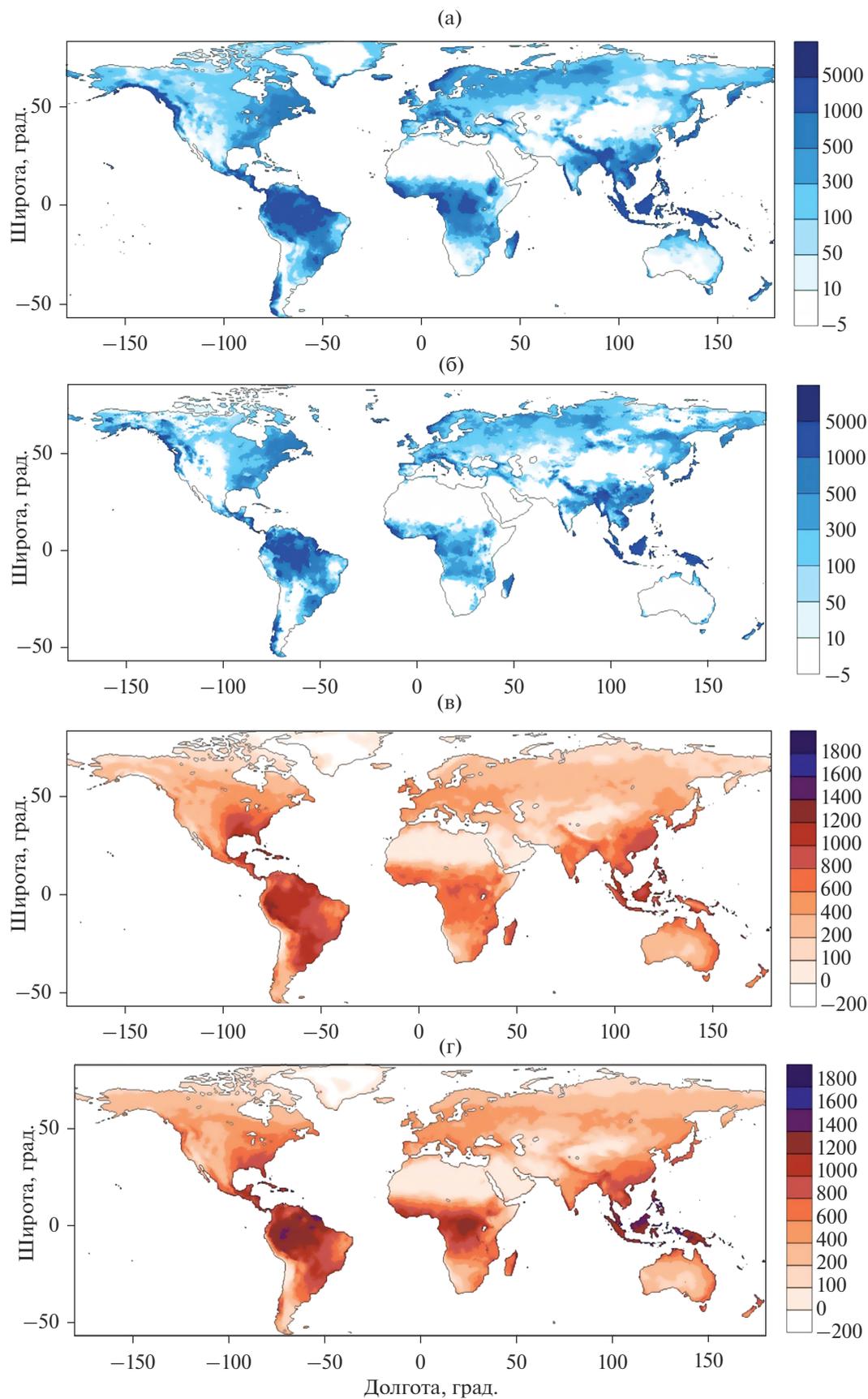


Рис. 2. Мировые карты климатических значений стока (а, б) и суммарного испарения (в, г), мм/год, рассчитанных по модели SWAP (а, в) и построенных по данным из [16] (б) и GLEAM (г).

Таблица 1. Сравнение осредненных по гидрологическим поясам климатических значений составляющих водного баланса, рассчитанных с использованием базы данных WATCH по модели SWAP и полученных по данным из литературных источников (пояса: ICE – ледниковый (Гренландия), BOR – boreальный, NML – северные средние широты, NDR – северный сухой, NST – северный субтропический, EQT – экваториальный, SST – южный субтропический, SDR – южный сухой, SML – южные средние широты)

Характеристики	Гидрологический пояс									Вся суша
	ICE	BOR	NML	NDR	NST	EQT	SST	SDR	SML	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Площадь, 10 ³ км ²		25995	24199	30234	10579	16826	10599	8677	4008	131117*
Число ячеек	195	18210	10799	11430	3593	5472	3605	3177	1570	58051
Сравнение осадков Pr_w из WATCH (1970–2001 гг.) и Pr_m [28] (1960–1990 гг.)										
Pr_w , мм/год	463	491	884	264	1142	2210	1122	366	908	840*
Pr_m , »		437	809	253	1112	2124	1035	318	872	789*
$\Delta = Pr_w - Pr_m$, »		54	75	11	30	86	87	48	36	51*
Pr_w/Pr_m		1.12	1.09	1.04	1.03	1.04	1.08	1.15	1.04	1.06*
Сравнение рассчитанного стока R_w по WATCH (1970–2001 гг.) и R_f из [16] (1960–1990 гг.)										
R_w , мм/год	303	217	369	60	516	1303	369	51	299	376
R_f , »	286	224	342	36	384	960	233	31	289	299
$\Delta = R_w - R_f$, »	17	-7	27	24	132	343	136	20	10	76
R_w/R_f	1.06	0.97	1.08	1.68	1.34	1.36	1.58	1.64	1.04	26
Сравнение рассчитанного суммарного испарения E_w по WATCH (1970–2001 гг.) и E_g из GLEAM (1980–2017 гг.)										
E_w , мм/год	95	271	513	204	629	906	752	314	608	462
E_g , »	99	319	523	203	697	1165	735	286	571	508
$\Delta = E_w - E_g$, »	-3	-49	-9	0.3	-68	-259	17	28	37	-46
E_w/E_g	0.97	0.85	0.98	1.00	0.90	0.78	1.02	1.10	1.07	0.91
Сравнение рассчитанного суммарного испарения E_w по WATCH (1970–2001 гг.) и E_c по [28] (1960–1990 гг.)										
E_w , мм/год	95	271	513	204	629	906	752	314	608	463*
$E_c = Pr_m - R_f$, »		213	467	217	728	1164	802	287	583	512*
$\Delta = E_w - E_c$, »		57	46	-14	-99	-258	-50	27	25	-50*
E_w/E_c		1.27	1.10	0.94	0.86	0.78	0.94	1.09	1.04	0.90*

* Вся суша без ледникового пояса (без Гренландии).

Таблица 2. Климатические значения глобальных годовых сумм осадков Pr , содержащихся в базе данных WATCH и в результатах расчетов по пяти климатическим моделям GCMs, а также рассчитанные по модели SWAP с использованием данных WATCH и GCMs климатические значения слоя стока R , суммарного испарения E и коэффициента стока R/Pr

Гидрологические характеристики	WATCH	GCMs					
		GFDL	HadGEM	IPSL	MIROC	NorESM1	среднее по 5 GCMs
Pr , мм/год	872	855	866	846	870	868	861
R , »	390	418	396	376	419	400	402
E , »	475	430	464	463	443	462	452
R/Pr	0.45	0.49	0.46	0.44	0.48	0.46	0.47

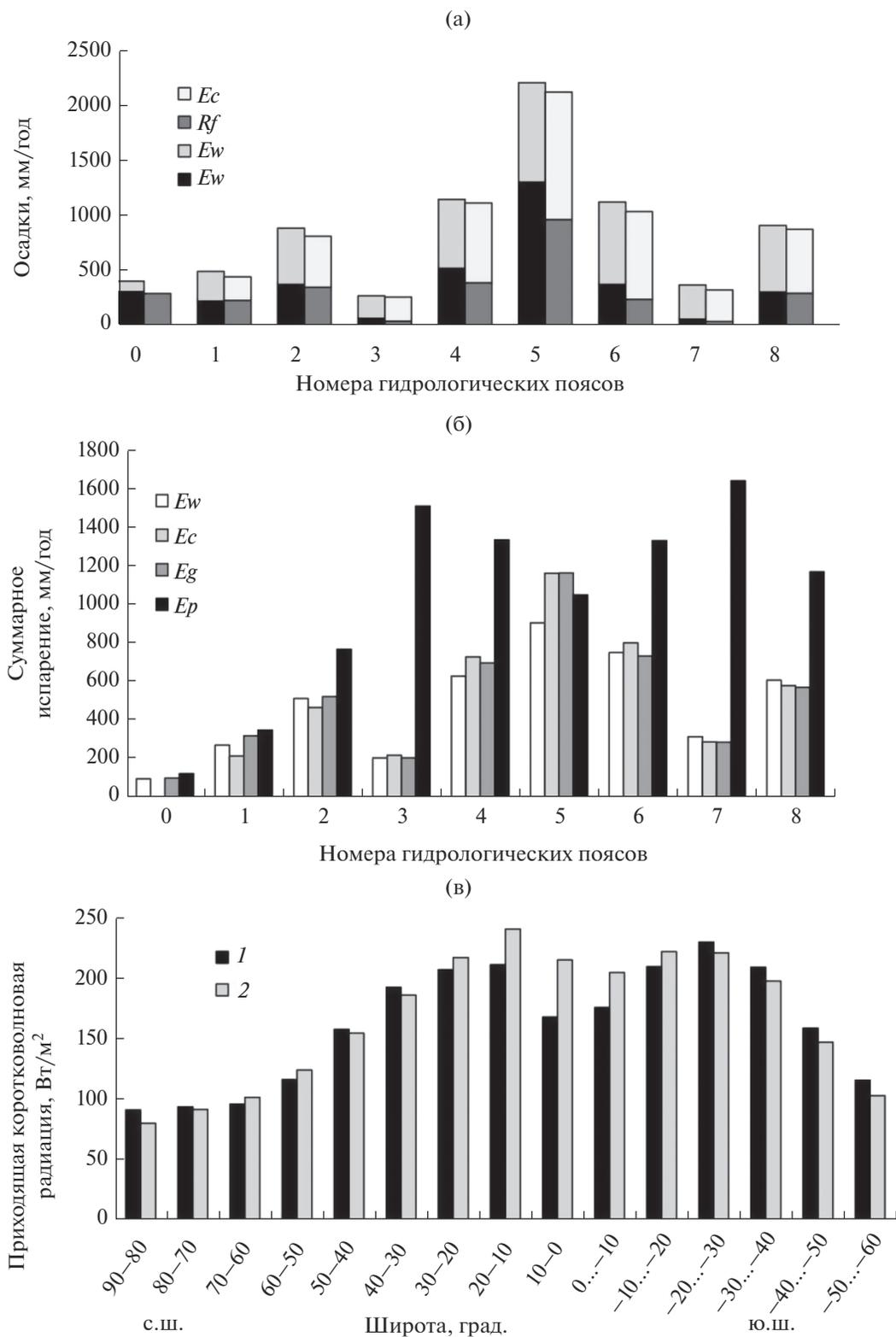


Рис. 3. Осредненные по гидрологическим поясам климатические значения осадков из WATCH с разделением в соответствии с расчетами по SWAP на Rw и Ew , а также климатические осадки из [28] с разделением на Rf и Ec (а); реального суммарного испарения (Ew , Eg , Ec) и потенциального испарения Ep (б); приходящей солнечной радиации из WATCH (1) и GSWP2 (2) (в). Обозначения приведены в тексте, номера поясов в табл. 1.

использованные для расчетов по модели SWAP, близки к климатическим осадкам Prm из [28]. Однако внутригодовой ход осадков, оказывающий значительное влияние на механизм формирования климатического стока, может существенно различаться для Prw и Prm .

Экваториальный пояс характеризуется самым большим количеством выпадающих осадков, поэтому реальное испарение не лимитируется влажностью почвы и должно быть близко к потенциальному. На рис. 3б наряду с реальным испарением приведены величины рассчитанного по модели SWAP потенциального суммарного испарения E_p . Видно, что потенциальное испарение минимально в ледниковом поясе, затем увеличивается, достигая максимальных значений в самых жарких сухих поясах (3 и 7), и снижается на 500–600 мм/год в экваториальном поясе, что в наибольшей степени связано с приходящей коротковолновой радиацией, которая коррелирует с E_p с коэффициентом корреляции 0.97. На рис. 3в хорошо виден “провал” в приходящей солнечной радиации в приэкваториальной широтной зоне (между 10° с.ш. и -10° ю.ш.), соответствующий снижению E_p в поясе 5 на рис. 3б. Кроме того, уменьшению потенциального испарения способствуют высокая влажность воздуха (в среднем ~80%) и низкая скорость ветра (минимальная в этом поясе). Однако наибольшее влияние на E_p оказывает приходящая радиация, поэтому остановимся на ней подробнее.

Климатические значения приходящей коротковолновой RS_{down} и длинноволновой RL_{down} радиации из WATCH сопоставлены с соответствующими значениями из базы данных SRB (Surface Radiation Budget), полученными в проекте GSWP-2 на основе 3-часовых данных по радиации, подготовленных Исследовательским центром НАСА/Лэнгли (NASA/Langley Research Center) для периода с 1986 по 1995 г. [3, 15], который попадает в используемый в настоящей статье климатический период, хотя отличается от него по продолжительности. Глобально осредненные значения RL_{down} по WATCH и SRB составляют 325 и 328 Вт/м² соответственно, различия между осредненными значениями по 10-градусным широтам $\leq 4\%$. Глобально осредненные значения RS_{down} из WATCH и SRB тоже довольно близки: 172 и 182 Вт/м² соответственно, в то время как среднеширотные значения различаются гораздо больше, причем в приэкваториальной зоне они максимальны: 29 Вт/м² в зоне $0^\circ \dots -10^\circ$ ю.ш. и 47 Вт/м² в зоне $0^\circ -10^\circ$ с.ш. (рис. 3в). В связи с этим есть основания полагать, что в низких широтах приходящая коротковолновая радиация в базе данных WATCH занижена, поэтому заниженными оказались рассчитанные значения потенциального испарения E_p . Так, рассчитанное

E_p в экваториальном гидрологическом поясе получилось на 112 мм/год ниже значений реального испарения E_g и E_c , которые здесь оказались равными, несмотря на разные периоды осреднения и разные методики расчетов. Это свидетельствует о том, что скорее всего E_g и E_c близки к потенциальному испарению и им можно доверять. Очевидно, что заниженное рассчитанное потенциальное испарение E_p привело к недооценке реального испарения E_w .

Наконец, гидрофизические параметры почвы и толщина корнеобитаемого слоя и почвенной колонки влияют на разделение выпадающих осадков между стоком и испарением. Завышенный сток свидетельствует о том, что выпадающие осадки не в должной мере задерживаются в почве, чтобы в дальнейшем расходоваться на испарение. В таком случае калибровка почвенных параметров могла бы улучшить результаты расчетов, но этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Таким образом, на основе сказанного можно сделать вывод, что модель SWAP в сочетании с информационным обеспечением из глобальных баз данных WATCH и ECOLIMAP в целом адекватно воспроизводит основные особенности пространственного распределения климатических слоев стока и суммарного испарения по земному шару, а полученные глобальные годовые значения составляющих водного баланса не противоречат оценкам других авторов. Несколько худшие результаты получены для экваториального пояса, но поскольку наибольшие изменения климата ожидаются в более высоких широтах, то можно сделать вывод, что модель SWAP в сочетании с указанными базами данных можно использовать для решения поставленной задачи, а именно для прогностических оценок суммарного испарения и стока.

*Результаты расчетов по модели SWAP
для исторического периода с использованием
метеорологических характеристик,
рассчитанных по пяти GCMs*

Как отмечалось выше, для прогностических расчетов по модели SWAP использованы ряды метеорологических элементов, рассчитанных по пяти GCMs до конца XXI в. Поскольку указанные ряды скорректированы по данным WATCH, есть основания полагать, что они пригодны для прогностических расчетов гидрологических характеристик. Однако для того, чтобы убедиться в этом, по модели SWAP проведены расчеты суммарного испарения и стока для исторического периода с использованием суточных значений метеорологических элементов, рассчитанных по каждой GCM. Полученные климатические значения гидрологических характеристик сопоставлены с соответствующими результатами расчетов с ис-

пользованием базы данных WATCH. Результаты сопоставления глобально осредненных данных приведены в табл. 2, из которой видно, что климатические значения годовых сумм составляющих водного баланса и коэффициентов стока, полученные с использованием данных GCMs, хорошо согласуются с оценками, сделанными на основе WATCH. Так, осредненные по пяти GCMs Pr , R и E равны соответственно 861, 402 и 452 мм/год, $R/Pr = 0.47$, в то время как при расчетах по WATCH соответствующие оценки составляют 872, 390, 475 мм/год и 0.45.

Кроме того, сопоставлены климатические поля составляющих водного баланса (представляющие собой значения переменных в каждой из 67177 ячеек расчетной сетки). Визуальное сопоставление полученных мировых карт и рассчитанные статистические критерии показали хорошее соответствие между климатическими годовыми суммами составляющих водного баланса, полученными с использованием в качестве входной информации значений метеорологических характеристик, рассчитанных по пяти GCMs и по WATCH. Систематические отклонения ансамблевых средних от WATCH составили -1 , -6 и 5% для годовых сумм осадков, суммарного испарения и слоя стока соответственно.

Таким образом, смоделированные с помощью пяти GCMs ряды метеорологических элементов можно использовать в качестве входной информации для расчета климатических годовых значений составляющих водного баланса по модели SWAP.

Прогностические оценки изменения составляющих водного баланса в соответствии с RCP-сценариями изменения климата

Прогностические расчеты составляющих водного баланса суши проводились по модели SWAP с суточным шагом с использованием в качестве исходных данных результатов моделирования метеорологических характеристик по пяти GCMs для четырех климатических сценариев семейства RCP за период с 2006 по 2099 г. В результате для каждой ячейки расчетной сетки получено 20 вариантов суточных значений суммарного испарения, стока и осадков, которые использовались для расчета климатических годовых значений составляющих водного баланса для трех прогностических периодов P_i (2006–2036, 2037–2067, 2068–2099 гг.). Далее были оценены изменения климатических значений составляющих водного баланса для разных прогностических периодов по отношению к их историческим значениям (осредненным за 1971–2005 гг.), рассчитанным для каждой GCM по формулам (1) и (2).

На рис. 4 представлены осредненные глобально и по ансамблю GCM-моделей абсолютные и относительные изменения климатических годовых значений составляющих водного баланса суши для трех прогностических периодов и для каждого RCP-сценария изменения климата. При этом для каждого сценария изменения вертикальные отрезки показывают межмодельный разброс в оценках, определенный как вариационный размах Range (3), т.е. диапазон между максимальным и минимальным рассчитанными значениями. Этот разброс представляет собой неопределенность в прогностических оценках гидрологических характеристик, связанную с различиями структурных особенностей климатических моделей. В случае “Среднее” осреднились все 20 вариантов расчетов (5 GCMs \times 4 RCP-сценария) и разброс определялся по всем этим вариантам. В этом случае полученный разброс характеризует неопределенность оценок, связанную как с GCMs, так и с RCP-сценариями.

Как видно из рис. 4а, 4б, глобальные климатические осадки и неопределенность оценок их изменений в основном увеличиваются не только со временем, но и от RCP2.6 к RCP8.5. Лишь одна модель (GFDL) дает незначительное уменьшение осадков ($\sim 1\%$) для периода P_1 и сценария RCP4.5. В среднем по всем моделям и сценариям прирост осадков в 2068–2099 гг. составит 43 мм/год (5%), варьируя по 20 вариантам расчета от 2 до 91 мм/год (от 0.3 до 11%).

Отметим, что в среднем по 20 вариантам $\sim 70\%$ приращения осадков будет израсходовано на увеличение суммарного испарения (рис. 4д, 4е). Столь существенное увеличение испарения неудивительно, так как по всем сценариям ожидается возрастание приходящей суммарной радиации, приводящее к росту температуры воздуха и потенциального испарения E_p . Изменение E_p , рассчитанного по модели SWAP, показано на рис. 4ж и 4з. В среднем по всем климатическим моделям и сценариям увеличение потенциального испарения для периода P_3 составляет 112 мм/год (11%), а соответствующее приращение реального испарения равно 31 мм/год ($\sim 7\%$) (рис. 4д, 4е).

Глобальные климатические оценки изменения стока не столь однозначны, и если в среднем по моделям сток возрастает по всем сценариям и для всех прогностических периодов (до 17 мм/год, или 4%), то для отдельных GCMs практически по всем сценариям возможно незначительное уменьшение стока (рис. 4в, 4г). При этом неопределенность оценок существенно возрастает к концу XXI в.: разброс изменения стока по 20 вариантам расчета находится в диапазоне от -3 до 43 мм/год (от -1 до 11%).

На рис. 5 показано распределение по земному шару изменений (по отношению к историческому периоду) климатических значений (для перио-

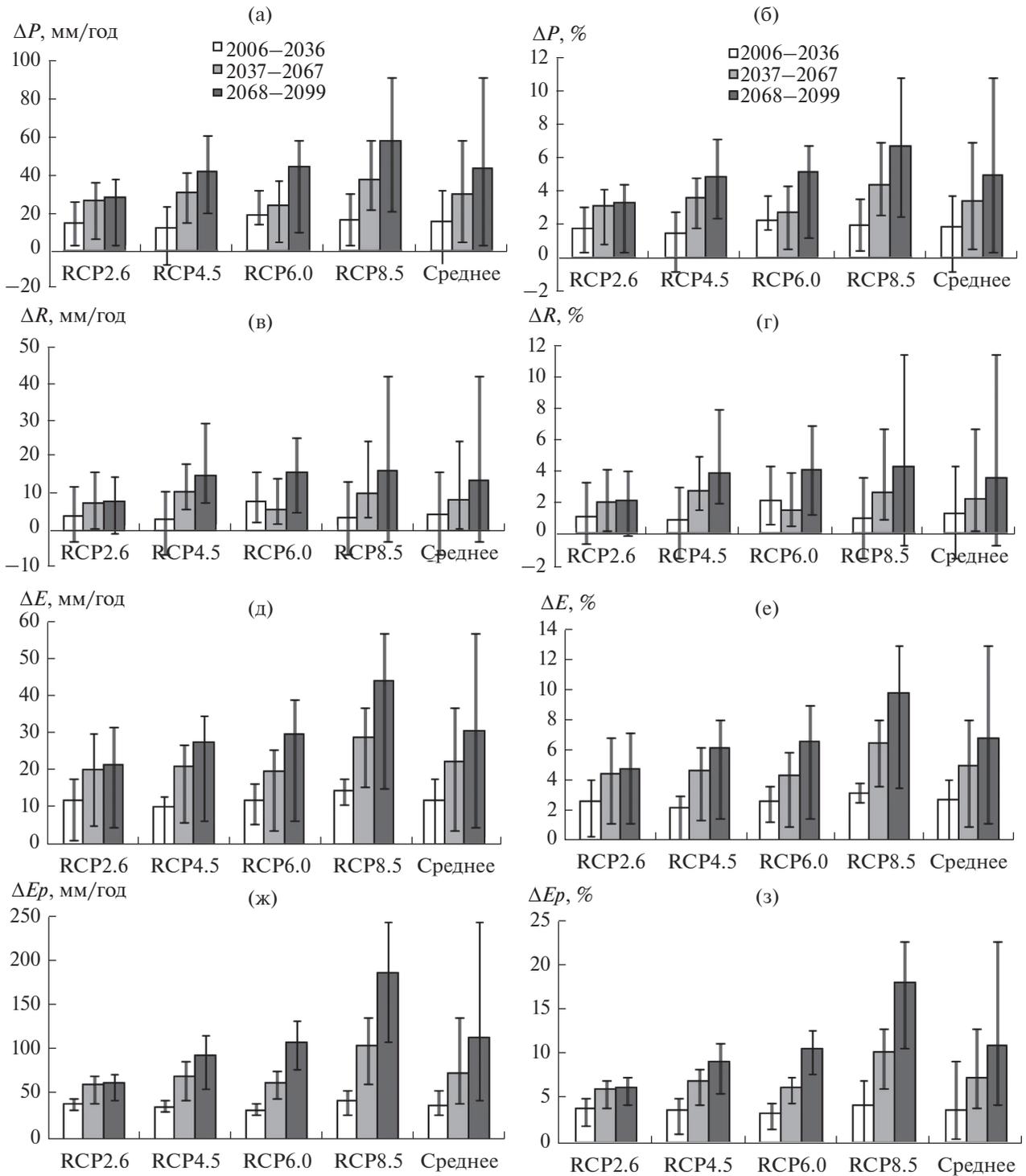


Рис. 4. Осредненные по пяти GCMs абсолютные (а, в, д, ж) и относительные (б, г, е, з) глобальные изменения климатических значений осадков (а, б), стока (в, г), реального суммарного испарения (д, е) и потенциального испарения (ж, з) для трех прогностических периодов и четырех RCP-сценариев изменения климата. Вертикальные отрезки представляют собой диапазон варьирования рассчитанных изменений.

да 2068–2099 гг.) температуры воздуха и годовых сумм составляющих водного баланса, осредненных по 20 вариантам расчета, т.е. по всем RCP-

сценариям и GCMs. Как видно из рис. 5а, температура воздуха повсеместно повышается, причем наибольшие изменения ожидаются в северных

Таблица 3. Осредненные по гидрологическим поясам изменения Δ (и их неопределенности STD) климатических значений осадков Pr , стока R , реального E и потенциального Ep суммарного испарения в 2068–2099 гг.

Характеристики	Гидрологический пояс								
	ICE	BOR	NML	NDR	NST	EQT	SST	SDR	SML
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Число ячеек мм/год:	2754	19153	10948	11522	3659	5579	3663	3245	1648
ΔPr	116	85	51	23	70	52	-20	-20	-20
ΔR	146	49	-3	7	26	-7	-17	-3	-19
ΔE	-1	40	56	16	42	60	0	-17	-1
ΔEp	1	64	121	137	134	128	137	130	90
STD $_{\Delta Pr}$	90	48	70	52	177	217	117	44	85
STD $_{\Delta R}$	138	39	56	29	143	200	84	13	51
STD $_{\Delta E}$	14	24	37	27	56	58	46	33	44
STD $_{\Delta Ep}$	16	45	65	82	102	80	100	85	64

районах. Что касается атмосферных осадков, то их увеличение будет происходить далеко не везде. Так, в Австралии, на севере и юге Африки, в Средиземноморье, на юге Северной Америки и на большей части Южной Америки ожидается уменьшение осадков (рис. 5б). Увеличение осадков в сочетании с ростом температуры воздуха почти повсеместно приводит к росту испарения (рис. 5г), за исключением Гренландии и ряда северных островов. Последнее обусловлено тем, что в этих районах потенциальное испарение, несмотря на рост температуры, в основном уменьшается (рис. 5д), что происходит из-за увеличения влажности воздуха. Пространственное распределение прогнозируемого изменения климатического слоя стока (рис. 5в) близко к распределению изменения осадков. В некоторых районах, несмотря на увеличение осадков, сток уменьшается (особенно это заметно в экваториальной Африке), что связано с потерями на испарение.

Полученное пространственное распределение изменений стока и испарения в целом неплохо согласуется с прогностическими оценками других авторов, в соответствии с которыми увеличение стока и испарения к концу XXI в. можно ожидать в высоких широтах и в некоторых районах средних широт, в то время как в Средиземноморье, на большей части Ближнего Востока, в юж-

ных частях Африки и Северной Америки, в южной и восточной Австралии и северо-восточной части Южной Америки сток и испарение уменьшатся по сравнению с историческим периодом [5, 21].

Для выявления пространственных закономерностей вышеописанных изменений в табл. 3 приведены осредненные (с весами) по гидрологическим поясам изменения осадков ΔPr , стока ΔR , реального ΔE и потенциального ΔEp суммарного испарения. Анализ приведенных в табл. 3 результатов показывает, что в среднем уменьшение осадков (~20 мм/год) ожидается в трех южных поясах (SST, SDR и SML), максимальное увеличение (~116 мм/год) – в ледниковом поясе. Изменения стока хорошо коррелируют с изменениями осадков (коэффициент корреляции $r = 0.80$). Интересно, что в ледниковом поясе увеличение стока может превысить приращение осадков на 30 мм/год, вероятно, из-за таяния снега и льда. В двух поясах (NML и EQT), несмотря на увеличение осадков, сток немного уменьшится, как отмечалось выше, в связи с потерями на испарение. Реальное суммарное испарение повысится практически везде, кроме трех поясов южного полушария, где ожидается уменьшение осадков, и ледникового пояса в связи с уменьшением потенциального испарения на большей части территории (рис. 5г).

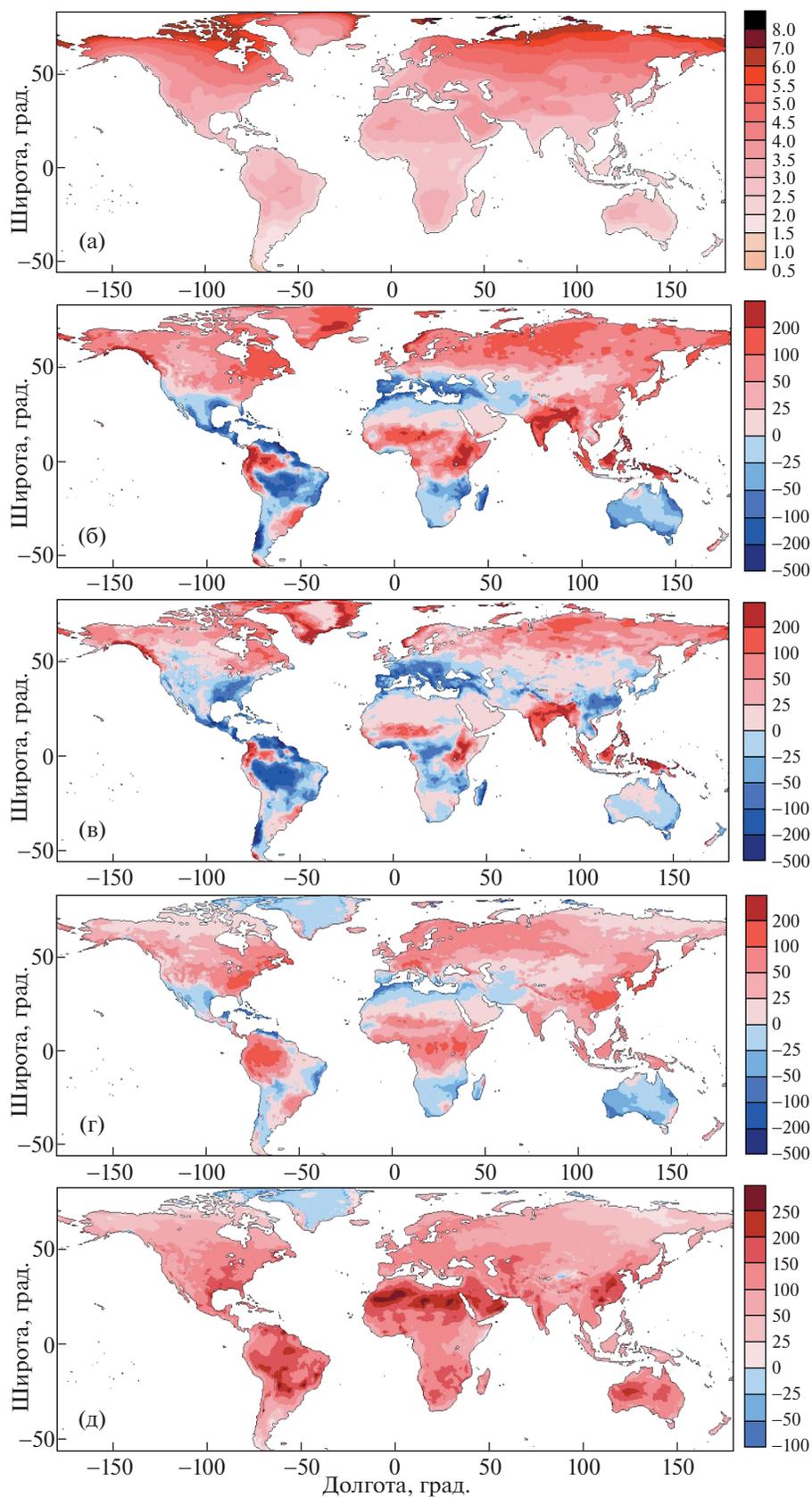


Рис. 5. Пространственное распределение изменений в 2068–2099 гг. климатических значений среднегодовой температуры воздуха (а), °С; атмосферных осадков (б), слоя стока (в), суммарного реального (г) и потенциального испарения (д), мм/год.

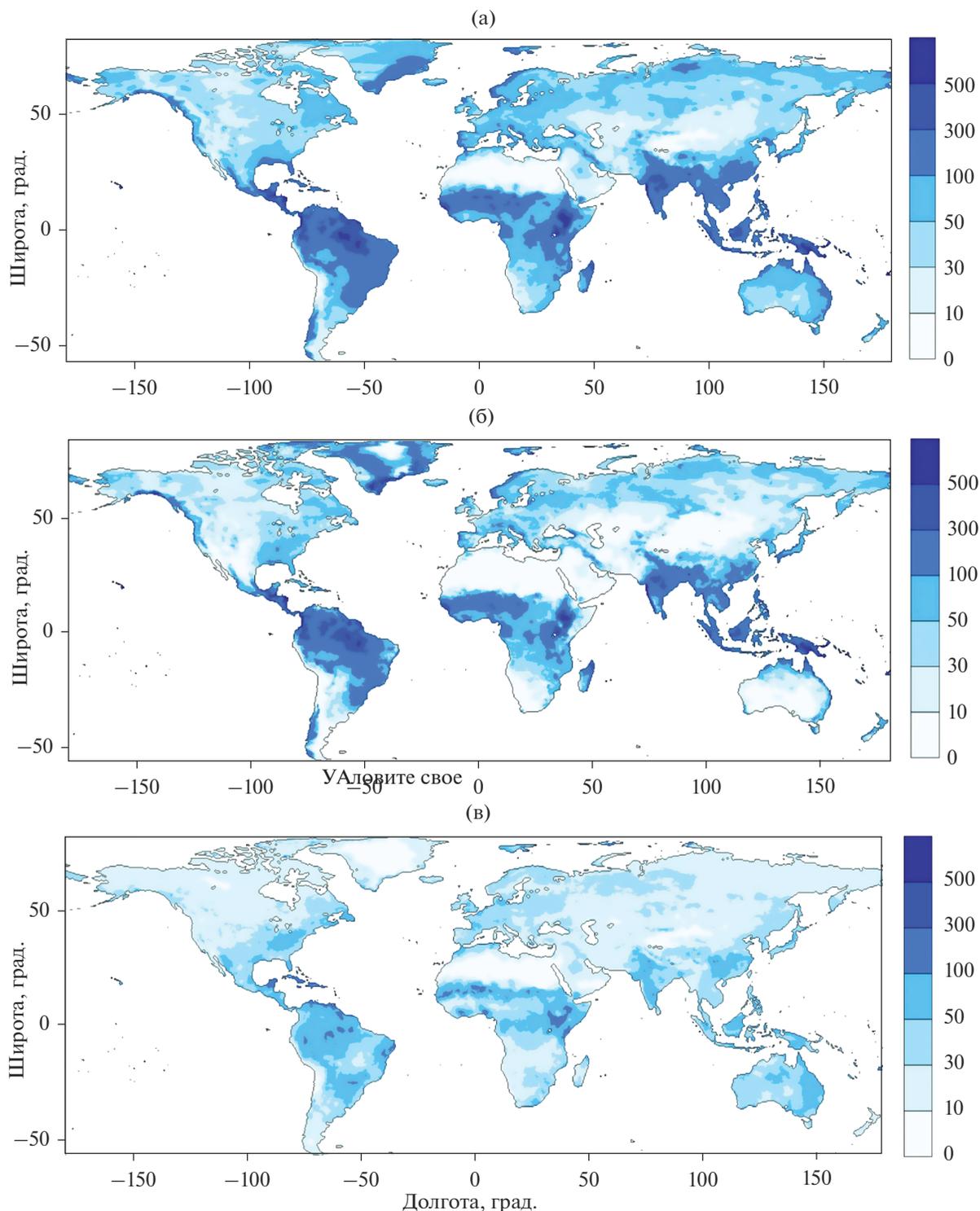


Рис. 6. Пространственное распределение среднеквадратических отклонений изменений в 2068–2099 гг. по отношению к историческому периоду климатических значений атмосферных осадков (а), слоя стока (б) и суммарного испарения (в), мм/год.

Разброс по 20 вариантам расчетов, характеризующий неопределенность полученных оценок изменения составляющих водного баланса, оценивался с помощью среднеквадратического от-

клонения STD и вариационного размаха Range (мм/год), рассчитанных для каждой из 67177 ячеек сетки. Пространственное распределение STD для ΔPr , ΔR и ΔE показано на рис. 6. Для Range подоб-

ные карты приводить не имеет смысла, поскольку поля значений STD и Range коррелируют между собой для каждого компонента водного баланса с коэффициентом корреляции $r \sim 0.99$, в среднем Range превышает STD в 3.8 раза. Как видно из рис. 6а и 6б, наибольший разброс в оценках изменения полей осадков и слоя стока отмечается в районах с наибольшим количеством выпадающих осадков, а именно в экваториальных и приэкваториальных областях, на атлантическом побережье Скандинавии, в некоторых районах Гренландии. Здесь STD варьирует в основном от 100 до 300 мм/год, но в отдельных экваториальных районах может достигать 800 мм/год. Разброс оценок изменения испарения гораздо меньше (рис. 6в) – в вышеперечисленных областях он в основном ≤ 100 мм/год, на большей части остальной территории земного шара ≤ 50 мм/год.

В табл. 3 приведены осредненные по гидрологическим поясам значения STD для ΔPr , ΔR , ΔE и ΔEp , подтверждающие отмеченные выше закономерности. Остается добавить, что указанные неопределенности неплохо коррелируют с осредненными по поясам значениями соответствующих характеристик Pr_w , R_w , E_w и Ep , рассчитанных для исторического периода с использованием базы данных WATCH: $r = 0.91$ для Pr , $r = 0.79$ для R , $r = 0.95$ для E , $r = 0.88$ для Ep .

ВЫВОДЫ

По материалам международного проекта ISI-MIP с использованием модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP проведены глобальные расчеты составляющих водного баланса за период 1971–2099 гг. для всей поверхности суши земного шара (за исключением Антарктиды) с полуградусным пространственным разрешением по широте и долготе.

Исследована способность модели SWAP воспроизводить глобальные поля климатических значений слоя стока и суммарного испарения с использованием в качестве входной информации суточных значений метеорологических характеристик из глобальной базы данных WATCH за исторический период. Сопоставление смоделированных полей суммарного испарения и стока, а также осредненных глобально и по восьми гидрологическим поясам составляющих водного баланса с данными других авторов подтвердило способность модели SWAP в целом адекватно воспроизводить указанные характеристики. Наибольшие расхождения сопоставленных значений стока и испарения были получены для экваториального пояса, что может быть связано с заниженными значениями приходящей коротковолновой радиации в базе данных WATCH и неадекватными значениями каких-либо почвенных

параметров в базе данных ECOCLIMAP, что требует дальнейшего исследования.

На основе анализа смоделированных гидрологических характеристик для исторического периода показана возможность использования в качестве входных данных для расчетов по модели SWAP результатов расчета метеорологических элементов по пяти глобальным климатическим моделям GCMs (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M).

Получены поля изменений климатических годовых сумм атмосферных осадков, слоя стока и суммарного испарения для трех прогностических периодов (2006–2036, 2037–2067, 2068–2099 гг.) на основе расчета по модели SWAP с использованием прогностических рядов метеорологических элементов, рассчитанных по пяти GCMs для четырех сценариев изменения климата семейства RCP.

Получены глобальные оценки изменения климатических осадков, стока и испарения в XXI в. В соответствии с ансамблевыми средними в 2068–2099 гг. ожидается увеличение всех составляющих водного баланса по сравнению с историческим периодом. При этом осадки в среднем будут увеличиваться на ~ 43 мм/год (5%), варьируя по 20 вариантам расчета от 2 до 91 мм/год (от 0.3 до 11%); суммарное испарение на 31 мм/год (7%), варьируя от 5 до 57 мм/год (от 1 до 13%); слой стока на 17 мм/год (4%) при разбросе от -3 до 43 мм/год (от -1 до 11%).

Построены мировые карты средних по ансамблю из 20 вариантов изменений к концу XXI в. климатических значений составляющих водного баланса, а также неопределенностей этих оценок, обусловленных различиями использованных климатических сценариев и структурными особенностями GCMs. Анализ карт и осредненных по гидрологическим поясам значений указанных характеристик позволил выявить географические закономерности возможных изменений (и их неопределенностей) атмосферных осадков, слоя стока и суммарного испарения. Следует отметить, что наименьшего доверия вызывают оценки, полученные для экваториального пояса в силу указанных выше причин.

Авторы выражают признательность организаторам международного проекта ISI-MIP за предоставление глобальных баз данных по метеорологическим характеристикам и параметрам подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Айзель Г.В. Влияние возможного изменения климата на сток рек, расположенных в разных регионах земного шара // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 91–100.
5. Добровольский С.Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: ГЕОС, 2017. 526 с.
6. Зубенок Л.И. Испарение на континентах. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 264 с.
7. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
8. Львович М.И. Типы водного режима рек (земного шара). Речной сток (земного шара) // Физико-географический атлас мира. М, 1964. Л. 58–61.
9. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли / Под ред. Корзун В.И. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 638 с.
10. Насонова О.Н. Влияние неопределенностей в глобальных базах данных по осадкам на оценки составляющих водного баланса суши // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 26–39.
11. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Глобальные оценки составляющих теплового и водного балансов суши // Изв. РАН. Серия географическая. 2008. № 1. С. 8–19.
12. Baumgartner A., Reichel E. The World Water Balance. Amsterdam, N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Com., 1975. 179 p.
13. Clapp R.B., Hornberger G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resour. Res. 1978. V. 14. № 4. P. 601–604.
14. Cosby B., Hornberger G., Clapp R., Ginn T. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils // Water Resour. Res. 1984. № 20. P. 682–690.
15. Dirmeyer P.A., Gao X., Zhao M., Guo Z., Oki T., Hanasaki N. GSWP-2 multimodel analysis and implications for our perception of the land surface // BAMS. 2006. V. 87. № 10. P. 1381–1397.
16. Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W. High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances // Global Biogeochemical Cycles. 2002. V. 16. № 3. P. 1042–1051.
17. Gosling S.N., Zaherpour J., Mount N.J., Hattermann F.F., Dankers R., Arheimer B., Breuer L., Ding J., Haddeland I., Kumar R., Kundu D., Liu J., van Griensven A., Veldkamp T.I.E., Vetter T., Wang X., Zhang X. A comparison of changes in river runoff from multiple global and catchment-scale hydrological models under global warming scenarios of 1°C, 2°C and 3°C // Clim. Change. 2017. № 141. P. 577–595.
18. Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Ayzel G.V. Impact of possible climate change on extreme annual runoff from river basins located in different regions of the globe // Water Resour. 2019. V. 46. Suppl. 1. P. S126–S136.
19. Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Ayzel G.V. Modelling river runoff and estimating its weather-related uncertainty for 11 large-scale rivers located in different regions of the globe // Hydrol. Res. 2018. V. 49. № 4. P. 1072–1087.
20. Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Ayzel G.V. Modelling water balance components of river basins located in different regions of the globe // Water Resour. 2018. V. 45. Suppl. 2. P. S53–S64.
21. Hagemann S., Chen C., Clark D.B., Folwell S., Gosling S.N., Haddeland I., Hanasaki N., Heinke J., Ludwig F., Voss F., Wiltshire A.J. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models // Earth Syst. Dynam. 2013. № 4. P. 129–144.
22. Hempel S., Frieler K., Warszawski L., Schewe J., Piontek F. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach // Earth Syst. Dynam. 2013. V. 4. № 2. P. 219–236.
23. Krysanova V., Hattermann F.F. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // Clim. Change. 2017. V. 141. P. 363–379.
24. Legates D.R., Willmott C.J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation // Int. J. Climatol. 1990. V. 10. P. 111–127.
25. Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // J. Clim. 2003. V. 16. P. 1261–1282.
26. Martens B., Miralles D.G., Lievens H., van der Schalie R., de Jeu R.A.M., Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture // Geosci. Model Development. 2017. № 10. P. 1903–1925.
27. Mather J.R. Average annual water balance of the world // Proc. Sympos. Water balance North America. Banff, Alberta: Am. Water Resour. Association, 1969. P. 29–40.
28. Meybeck M., Kumm M., Durr H.H. Global hydrobelts and hydroregions: improved reporting scale for water-related issues // Hydrol. Earth Sci. 2013. V. 17. 1093–1111.
29. Miralles D.G., Holmes T.R.H., de Jeu R.A.M., Gash J.H., Meesters A.G.C.A., Dolman A.J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations // Hydrol. Earth System Sci. 2011. № 15. P. 453–469.
30. Nasonova O.N., Gusev Y.M., Kovalev Y.E. Impact of uncertainties in meteorological forcing data and land surface parameters on global estimates of terrestrial water balance components // Hydrol. Processes. 2011. V. 25. № 7. P. 1074–1090.
31. Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E., Ayzel G.V. Climate change impact on streamflow in large-scale river basins: projections and their uncertainties sourced

- from GCMs and RCP scenarios // Proc. IAHS. 2018. № 379. P. 139–144.
32. *Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E., Ayzel G.V., Panysheva K.M.* Projecting changes in Russian northern river runoff due to possible climate change during the 21st century: A case study of the Northern Dvina, Taz and Indigirka rivers // *Water Resour.* 2019. V. 46. Suppl. 1. P. S145–S154.
33. UNESCO. World Water Balance and Water Resources of the Earth // UNESCO Ser. Studies Rep. Hydrolo. 1978. № 25.
34. *Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J.* The inter-sectoral impact model inter-comparison project (ISI-MIP): project framework // *PNAS.* 2014. V. 111. № 9. P. 3228–3232.
35. *Weedon G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W.J., Blyth E., Österle H., Adam J.C., Bellouin O., Best M.* Creation of the WATCH Forcing Data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century // *J. Hydrometeorol.* 2011. V. 12. P. 823–848.