

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.124.2

СЦЕНАРНЫЕ ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЯ СНЕГОЗАПАСОВ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА¹

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

^аИнститут водных проблем РАН,
Москва, 119333 Россия

*e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 27.05.2020 г.

Принята к публикации 09.06.2020 г.

В рамках международного проекта “The Earth System Models – Snow Models Intercomparison Project” на десяти экспериментальных снегомерных площадках, расположенных в различных районах земного шара, исследована способность разработанной авторами статьи модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP воспроизводить характеристики динамики снежного покрова в современный период. Разработана методика сценарного прогнозирования изменения характеристик формирования снежного покрова в течение XXI в. с использованием рядов метеорологических элементов, рассчитанных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана. На основе разработанной методики получены количественные оценки изменения характеристик формирования снежного покрова в течение XXI в. в районах расположения снегомерных площадок в связи с возможными изменениями климата.

Ключевые слова: проект ESM-SnowMIP, модели формирования снежного покрова, модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP, снегозапасы, RCP-сценарии изменения климата.

DOI: 10.31857/S032105962101017X

ВВЕДЕНИЕ

Снег – важнейшая составляющая криосферы. Благодаря своим особым физическим свойствам (в первую очередь, высокому альбедо и, как правило, низкой теплопроводности) он выполняет существенную функцию в климатической системе и гидрологическом цикле на планете. Снежный покров в высоких и средних широтах осуществляет долговременную регуляцию составляющих водного баланса рассматриваемой территории, это некий своеобразный буфер, накапливающий атмосферные осадки зимой и теряющий их в процессе весеннего снеготаяния, определяя при этом специфический для данных широт годовой ход составляющих водного баланса [2]. От толщины снежного покрова зависит степень промерзания сезонно-промерзающих почв, их инфильтрационные свойства, а значит и разделение поступающих на их поверхность в период весеннего снеготаяния талых вод и осадков между поверхностным стоком и почвенными влагозапасами. Высокое альбедо снега определяет положитель-

ную обратную связь изменения снегозапасов с климатическими изменениями, усиливая последние [3, 23].

Изменения мощности снежного покрова и его сезонного хода влияют на климат, водные ресурсы (в частности, на речной сток) и, соответственно, на условия жизни человека. Наблюдаемые в настоящее время глобальные и региональные (преимущественно в Северном полушарии) тренды продолжительности залегания снежного покрова и его площади в последние десятилетия почти неизменно отрицательны [10, 11] (за исключением высоких северных широт [18, 24]) и связаны с тенденцией глобального потепления на планете [4, 6]. Прогнозы изменения характеристик снежного покрова в целом соответствуют данным последних наблюдений за ним [5, 10, 19], но вопрос – каковы количественные показатели указанных тенденций в будущем – пока крайне актуален. Поэтому все более актуальными становятся модели формирования снежного покрова, позволяющие осуществлять прогностические расчеты динамики данного элемента криосферы в будущем. В связи с этим в 2013 г. по инициативе руководителей Всемирной программы исследо-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (проект 16-17-10039).

Таблица 1. Снегомерные площадки для многолетнего наблюдения за динамикой снежного покрова [2, 11] (BERMS – Boreal Ecosystem Research and Monitoring Sites)

Экспериментальная площадка (код площадки)	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Расчетный исторический период, годы	Климат	Литературный источник, где описан объект
BERMS Old Aspen, Канада (oas)	53.63° с.ш.	106.20° з.д.	600	1997–2010	Бореальный	[3]
BERMS Old Black Spruce, Канада (obs)	53.99° с.ш.	105.12° з.д.	629	1997–2010	»	[3]
BERMS Old Jack Pine, Канада (ojp)	53.92° с.ш.	104.69° з.д.	579	1997–2010	»	[3]
Col de Porte, Франция (cdp)	45.30° с.ш.	5.77° в.д.	1325	1994–2014	Альпийский	[16]
Reynolds Mountain East, США (rme)	43.06° с.ш.	116.75° з.д.	2060	1988–2008	»	[27]
Sapporo, Япония (sap)	43.08° с.ш.	141.34° в.д.	15	2005–2015	Морской	[22]
Senator Beck, США (snb)	37.91° с.ш.	107.73° з.д.	3714	2005–2015	Альпийский	[13]
Sodankylä, Финляндия (sod)	67.37° с.ш.	26.63° в.д.	179	2007–2014	Арктический	[8]
Swamp Angel, США (swa)	37.91° с.ш.	107.71° з.д.	3371	2005–2015	Альпийский	[13]
Weissfluhjoch, Швейцария (wfj)	46.83° с.ш.	9.81° в.д.	2540	1996–2016	»	[30]

ваний климата (ВПИК) был организован международный проект “The Earth System Models – Snow Models Intercomparison Project” (ESM-SnowMIP) в рамках “Grand Challenge Melting Ice & Global Consequences”. Проект призван обеспечить прогресс в понимании процессов, связанных с формированием снежного покрова, и систематизировать полученные знания в глобальных и региональных климатических и гидрологических моделях в контексте происходящих глобальных изменений.

Авторы настоящей статьи – участники проекта ESM-SnowMIP [11]. В связи с этими целями работы стали: а) проверка способности разработанной авторами статьи модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants) воспроизводить характеристики динамики снежного покрова в современный период на основе данных наблюдений, полученных в рамках ESM-SnowMIP на десяти экспериментальных снегомерных площадках в различных районах земного шара; б) разработка методики сценарного прогнозирования изменения характеристик снежного покрова с использованием рядов метеорологических элементов, рассчитанных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО); в) на основе разработанной методики количественная оценка изменений характеристик формирования снежного покрова для вышеупомянутых площадок в связи с возможным изменением климата в XXI в.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Географические объекты исследования – десять выбранных в проекте ESM-SnowMIP экспериментальных снегомерных площадок, предназначенных для многолетнего наблюдения за динамикой снежного покрова в различных местах земного шара (табл. 1) [11, 15]. Отметим, что из-за слабого развития исследований формирования снежного покрова в немногочисленных объектах южного полушария все экспериментальные площадки проекта ESM-SnowMIP оказались в северном полушарии планеты.

Районы расположения площадок различаются природными условиями: климатом (бореальный, морской, арктический, альпийский), типом почв, высотой над уровнем моря, поверхностным покровом (от практически оголенной почвы на площадках Senator Beck и Weissfluhjoch до хвойных и лиственных лесов на трех площадках BERMS). Это позволяет выяснить возможности модели SWAP по воспроизведению динамики характеристик снежного покрова в исторический (базовый) период (т.е. в период наблюдений за снежным покровом) в широком спектре природных условий, а также проанализировать связь с этими условиями закономерностей вероятных изменений характеристик формирования снежного покрова, вызванных ожидаемыми климатическими изменениями.

Следует отметить, что расчеты характеристик снежного покрова для исторического периода выполнялись в рамках проекта ESM-SnowMIP, в котором участвовало 28 моделей, разработанных исследователями 14 стран и включающих в себя

Таблица 2. Модели, по которым проводились расчеты формирования снежного покрова в исторический период для снегомерных площадок в рамках проекта *ESM-SnowMIP* [2, 11] (LSS – Land Surface Scheme)

Модель	Тип модели
BCC_AVIM	LSS в BCC-ESM
CABLE	LSS в ACCESS
CRHM	Гидрологическая модель
CLASS	LSS в CanESM
CLM5	LSS в CESM
CoLM	LSS в BNU-ESM и CAS-ESM
Crocus	Физическая модель формирования снежного покрова
EC-Earth	LSS в EC-Earth
ESCIMO	Модель энергетического баланса снежного покрова
ESCROC	Мультифизическая модель формирования снежного покрова (35-членный ансамбль)
FSM	Мультифизическая модель формирования снежного покрова (32-членный ансамбль)
HTESSEL	LSS в системе оперативных прогнозов ECMWF
HTESSELML	LSS в исследовательской системе прогнозов ECMWF
ISBA-ES	LSS в CNRM-CM
ISBA-MEB	LSS в CNRM-CM
JSBACH	LSS в MPI-ESM
JSBACH3_PF	LSS в MPI-ESM
JULES	LSS в UKESM
MATSIRO	LSS в MIROC
MOSES	LSS в HadCM3
ORCHIDEE-E	LSS в IPSL-CM
ORCHIDEE-I	LSS в IPSL-CM
RUC	LSS в системе оперативных прогнозов NOAA/NCEP
SMAP	Физическая модель формирования снежного покрова
SNOWPACK	Физическая модель формирования снежного покрова
SPONSOR	Гидрологическая модель
SWAP	LSS
VEG3D	Модель формирования режима почвы и растительного покрова

модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, гидрологические модели и модели формирования снежного покрова (табл. 2). Это позволило при решении задачи (а) провести сопоставление качества воспроизведения характеристик снежного покрова моделью SWAP и другими участвовавшими в проекте моделями.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель SWAP

Основным методическим инструментом, используемым для расчета динамики характеристик снежного покрова, послужила модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой (в англоязычной литературе – LSM (Land Surface Model)) SWAP, разработанная в Институте

водных проблем РАН [1]. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–приземный слой атмосферы. Модель позволяет рассчитывать составляющие водного и теплового балансов, различные характеристики гидрологического режима наземных экосистем и речных бассейнов, имеющих разные пространственные масштабы и находящихся в различных природных условиях.

В случае значительного по пространственным масштабам и неоднородного по природным условиям и характеристикам подстилающей поверхности объекта (большой речной бассейн, регион, континент и т.д.) выполняется переход от модели локального масштаба к ее мезомасштабному аналогу (“upscaling”, регионализация) [1]. Выходны-

ми переменными модели служат значения различных составляющих водного и теплового балансов, а также показатели динамики водного и теплового режимов рассматриваемой системы. Выходных переменных может быть до нескольких десятков.

В отношении воспроизведения динамики снежного покрова SWAP представляет собой модель, отличительные особенности которой — ее простота в сочетании с достаточной физической обоснованностью и рациональностью с точки зрения используемых модельных средств. При этом рациональность обусловлена применением преимущественно аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве существующих моделей используются численные методы) и стремлением к сокращению, по мере возможности, числа параметров модели. Модель описывает формирование снеготазов на подстилающей поверхности суши для случаев как низкой растительности (полевые участки), которая в зимнее время находится под снегом, так и высокой растительности (лесные участки), когда снежный покров формируется под пологом леса.

Информационное обеспечение SWAP для базового периода

Информационное обеспечение модели SWAP включает в себя: 1) необходимую для задания верхних граничных условий приземную метеорологическую информацию (атмосферные осадки, температура и влажность воздуха, интенсивность приходящих потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, скорость ветра и атмосферное давление); 2) параметры подстилающей поверхности (характеристики почвы, растительности, рельефа и др.), идентифицирующие исследуемый объект; 3) гидрологические характеристики для калибровки и проверки модели (в частности, такими данными могут служить измеренные за ряд лет снеготазы).

Информацию о входных метеорологических характеристиках, измеренных на площадках ESM-SnowMIP с часовым временным шагом в течение базового периода (различного для каждой площадки (табл. 1)), обеспечивали организаторы проекта ESM-SnowMIP [11, 15]. Параметры почвы и растительного покрова задавались на основе качественного описания исследуемых объектов [11, 15], а также с использованием информации из глобальных баз данных международного проекта GSWP2 [7, 31]. Что касается калибровки параметров модели, то в настоящей работе она проведена только для параметров зависимости такой важной характеристики снежного покрова, как альбедо α [9, 23], от его плотности ρ для каждой из десяти площадок [2]. Продолжительность перио-

да калибровки, как правило, была небольшой — 1–2 года (максимум семь лет), калибровка проводилась вручную и весьма приближенно по данным, которые удалось найти в литературных источниках [3, 8, 13, 16, 22, 27, 30].

Информационное обеспечение SWAP при проведении прогностических расчетов

Для прогностических расчетов изменения характеристик снежного покрова в районах расположения площадок использовались суточные значения метеорологических элементов за период с 1980 по 2099 г., рассчитанные по пяти МОЦАО: HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M и NorESM1-M [12] — для четырех сценариев изменения климата семейства RCP (Representative Concentration Pathways) [17]: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, использованных при подготовке 5-го оценочного доклада IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Эти данные предоставлены организаторами международного проекта ISI-MIP2 [29], в котором авторы настоящей статьи также принимали участие. Числа при аббревиатурах сценариев соответствуют приращению величин приходящей радиации (Вт/м^2) в 2100 г., вызванному увеличением эмиссии парниковых газов в атмосферу по сравнению с доиндустриальным периодом. Большие числа соответствуют более агрессивным антропогенным сценариям, обусловленным повышенной эмиссией парниковых газов в атмосферу и слабыми мерами по ограничению их выбросов. Используются метеорологические данные, рассчитанные для ячейки регулярной сетки размером $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, в которой расположена соответствующая снегомерная площадка.

Необходимо отметить следующие обстоятельства. Во-первых, значения метеорологических характеристик, полученные с помощью указанных выше МОЦАО, — средние для полуградусной ячейки суши, размер которой намного превышает размеры снегомерных площадок. Во-вторых, расчетные шаги по времени при исторических и прогностических расчетах разные, что обусловлено имеющимся метеорологическим обеспечением. В-третьих, рассчитанные значения метеорологических элементов с помощью МОЦАО в настоящее время демонстрируют систематические ошибки (смещение) из-за грубого пространственного разрешения, упрощенной параметризации физических и термодинамических процессов, использования численных схем или неполного знания процессов климатической системы [25].

Поэтому полученные с помощью МОЦАО значения метеорологических характеристик в районах расположения снегомерных площадок были подвергнуты так называемой постпроцес-

синговой bias-коррекции [21] с целью уменьшения возможных систематических ошибок расчета характеристик снежного покрова. Коррекция (своя для каждой МОЦАО) проводилась по соответствующим значениям метеорологических характеристик, измеренных на снегомерных площадках в исторический период. При этом к рассчитанным по различным МОЦАО значениям температуры воздуха прибавлялось ее смещение (разное для разных месяцев), рассчитанное как разность среднемноголетних среднемесячных значений измеренной и смоделированной температуры воздуха в базовый период. Что касается остальных метеорологических элементов, то они корректировались с помощью поправочных множителей (также различных для разных месяцев), полученных как отношение среднемноголетних среднемесячных значений измеренной рассматриваемой характеристики к ее модельным значениям. Корректировались общие осадки P (сумма жидких P_l и твердых P_s). Доля жидких осадков P_l для конкретного срока определялась на основе зависимости $P_l(T)$, T – температура воздуха. Функция $P_l(T)$ для каждой снегомерной площадки находилась эмпирически на основе измеренных значений P_l и P_s в базовый период.

Скорректированные для каждой МОЦАО ряды смоделированных метеорологических элементов использовались для воспроизведения суточных значений снеготазов для каждой площадки за исторический период с помощью модели SWAP. На их основе получен климатический (осредненный за исторический период) годовой ход суточных величин снеготазов $SWE(t)$, t – время, сут. Степень соответствия полученных климатических $SWE(t)$ измеренным оказалась разной для разных МОЦАО. Это естественно, поскольку bias-коррекция входных для SWAP метеорологических данных (особенно если она не очень качественная, сделана по месячным данным, не учитывает суточного хода радиации или температуры) не гарантирует высокой степени близости климатических значений, полученных в результате модельных расчетов, к данным измерений. Она в среднем гарантирует соответствие климатических значений входных смоделированных величин измеренным, а поскольку затем смоделированные входные данные проходят через сильно нелинейный оператор (гидрологическую модель или, как в данном случае, LSM SWAP, которая отличается от “природного” оператора), то смоделированные климатические $SWE(t)$ будут близкими к измеренным климатическим $SWE(t)$, но степень их близости для метеорологических данных, полученных на основе различных МОЦАО, может оказаться разной.

Поэтому после проведенных расчетов $SWE(t)$ для каждой снегомерной площадки из пяти

МОЦАО была выбрана одна оптимальная, при использовании которой климатический годовой ход рассчитанных $SWE(t)$ для базового периода в наибольшей мере соответствовал климатическому годовому ходу измеренных $SWE(t)$, или при отсутствии таковой выбирались 2 или 3 МОЦАО, для которых ансамблевое осреднение полученных на их основе $SWE(t)$ приводило к наибольшему их соответствию данным измерений.

Скорректированные ряды метеорологических элементов, выбранных указанным образом для каждой снегомерной площадки МОЦАО, использованы для прогностических расчетов различных характеристик формирования снежного покрова (с 2016 по 2099 г.) для каждого RCP-сценария. После этого полученные характеристики были осреднены по трем климатическим периодам: базовому и двум прогностическим (2036–2060 и 2075–2099 гг.) для анализа изменения климатических значений характеристик снежного покрова, вызванного возможными изменениями климата.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований для исторического периода

Как отмечено выше, основная задача исследований для исторического периода – проверка способности LSM-модели SWAP воспроизводить различные характеристики динамики снежного покрова на основе сравнения модельных расчетов с данными соответствующих измерений на экспериментальных снегомерных площадках, где обычно измерялись такие характеристики, как снеготазы SWE , высота снежного покрова h , температура его поверхности T_{surf} [14, 15]. Измерения проводились вручную и/или с помощью автоматических датчиков. При этом на разных площадках был выполнен разный объем наблюдений: где-то отсутствовали автоматические измерения, где-то был сокращенный спектр наблюдаемых характеристик (например, отсутствовали измерения температуры поверхности снега).

В качестве примера на рис. 1 приведено сопоставление динамики смоделированных и измеренных значений снеготазов, высоты снежного покрова и среднесуточной температуры его поверхности для снегомерной площадки Col de Porte, расположенной в районе одного из перевалов французских Альп (табл. 1) и обладающей полным объемом данных наблюдений за характеристиками снежного покрова. Приведенные на рис. 1 результаты свидетельствуют о хорошем воспроизведении моделью SWAP натуральных данных для площадки Col de Porte.

Полученные результаты по другим снегомерным площадкам также демонстрируют вполне

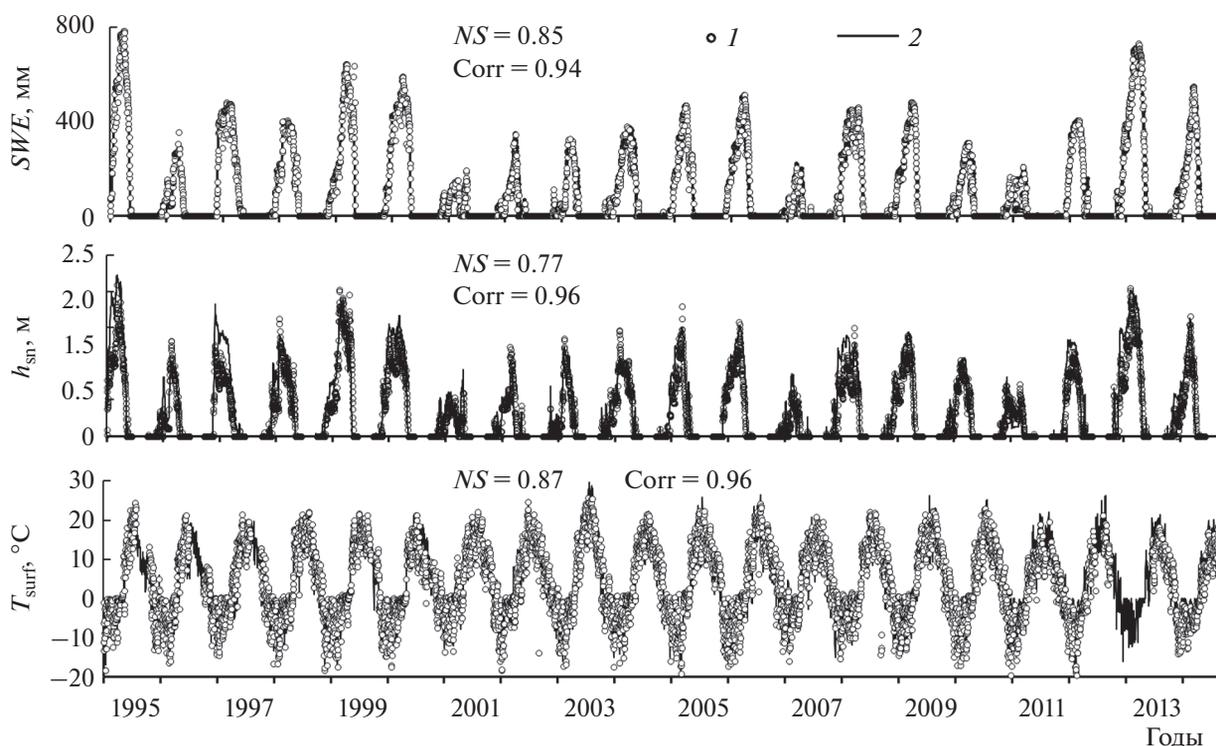


Рис. 1. Наблюдаемая (1) и рассчитанная на основе модели SWAP (2) динамика снегозапасов SWE , высоты снежного покрова h_{sn} и температуры его поверхности T_{surf} для площадки Col de Porte. NS – эффективность расчета по Нэш–Саклиффу [20], $Corr$ – коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными величинами.

приемлемое соответствие рассчитанных на основе SWAP характеристик снежного покрова измеренным. В частности, на рис. 2а приведены среднеквадратические ошибки $RMSE_n$ смоделированных для каждой площадки SWE на основе участвовавших в проекте ESM-SnowMIP моделей, а на рис. 2б – $RMSE_n$ смоделированной T_{surf} для каждой модели, рассчитывающей эту характеристику, и пяти площадок, на которых она измерялась. При этом ошибки на рис. 2а, 2б нормированы на стандартное отклонение измеренных SWE и T_{surf} для каждой рассматриваемой площадки. $RMSE_n > 1$ означает, что для этой площадки соответствующая модель воспроизводит динамику измеренной характеристики не лучше просто среднего по периоду ее наблюдений. Участвовавшие в проекте модели ранжированы по значениям $RMSE_n$, осредненным для соответствующей модели по всем площадкам. Как видно, модель SWAP находится в числе первых из 26 моделей.

Приведенные результаты свидетельствуют о вполне удовлетворительном качестве воспроизведения моделью SWAP динамики снегозапасов для исследуемых площадок, что дало возможность попытаться осуществить сценарное прогнозирование изменения характеристик формирования снежного покрова, вызванных возможными изменениями климата, для ESM-SnowMIP

площадок, расположенных в районах с различными природными условиями.

Результаты проведения bias-коррекции метеорологических данных, полученных с помощью разных МОЦАО

Второй отмеченной выше задачей исследования была разработка методики сценарного прогнозирования изменения характеристик формирования снежного покрова с использованием рядов метеорологических элементов, рассчитанных с помощью МОЦАО (в англоязычной литературе – GCMs – Global Climate Models). Отмечено, что эти ряды, полученные для каждой снегомерной площадки и каждой используемой МОЦАО, были подвергнуты постро процессинговой bias-коррекции с целью достижения лучшего соответствия рассчитанной климатической годовой динамики снегозапасов $SWE(t)$ ее наблюдаемому аналогу.

На рис. 3 для базового периода представлены траектории климатической (усредненной по базовому периоду) годовой динамики снегозапасов $SWE(t)$, рассчитанных по модели SWAP с использованием откорректированных рядов метеорологических элементов, рассчитанных по выбранным (как описано выше) для каждой площадки МОЦАО. Здесь же для сравнения представлены

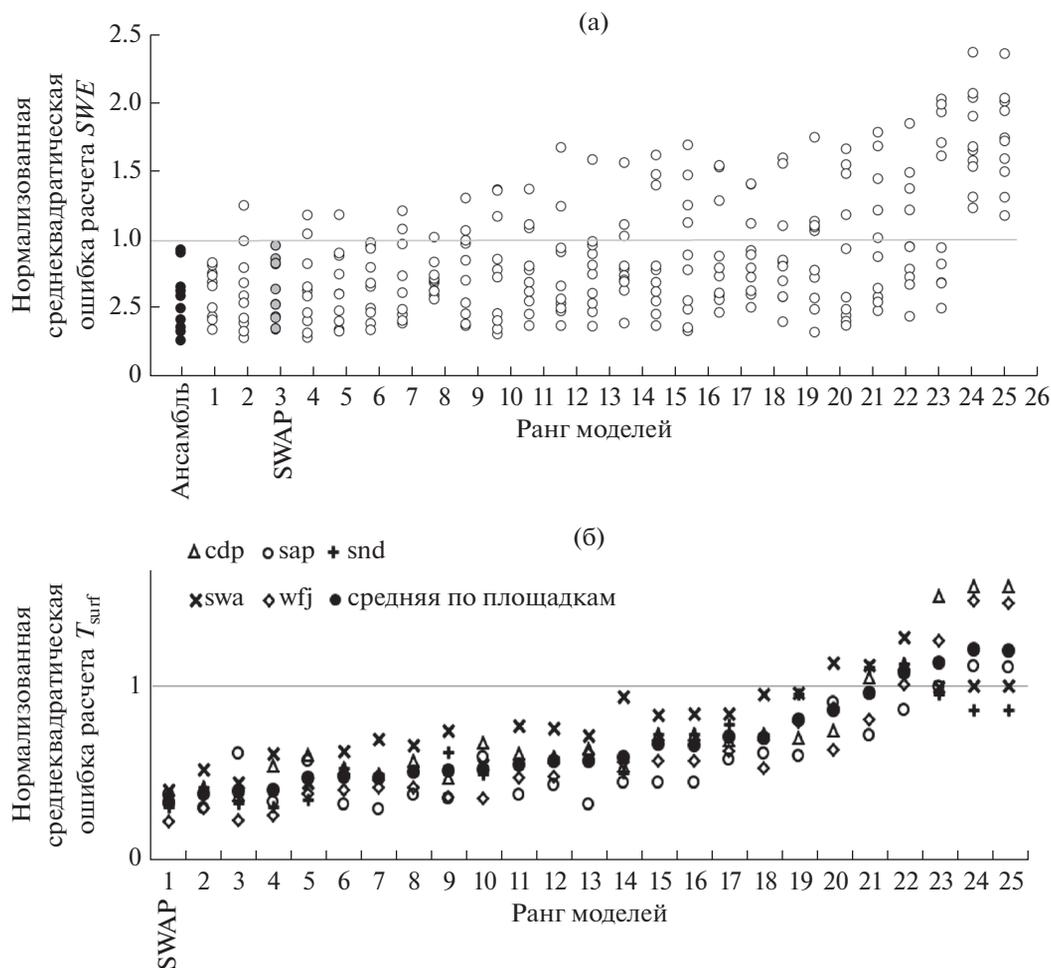


Рис. 2. Нормализованные среднеквадратические ошибки $RMSE_n$ (ранжированные в порядке возрастания осредненных по площадкам значений $RMSE_n$) расчета режимных характеристик формирования снежного покрова для экспериментальных площадок проекта ESM-SnowMIP и участвующих в нем моделей формирования снежного покрова (табл. 2): а – расчета SWE для 26 моделей проекта ESM-SnowMIP и десяти площадок (серые кружки – модель SWAP, пустые – остальные модели, черные кружки – осредненные значения по ансамблю моделей) [2, 11]; б – расчета T_{surf} для 25 моделей проекта ESM-SnowMIP для пяти площадок [14] (коды площадок (табл. 1) приведены на рисунке).

климатические $SWE(t)$, рассчитанные по данным измерения снегозапасов на соответствующих площадках [14], а также климатические $SWE(t)$, рассчитанные в предыдущем разделе по модели SWAP с использованием измеренных значений метеорологических элементов на площадках.

Представленные на рис. 3 результаты свидетельствуют о том, что климатическая годовая динамика SWE для всех снегомерных площадок, рассчитанная с использованием модели SWAP и скорректированных результатов МОЦАО, вполне удовлетворительно соответствует климатической годовой динамике как измеренных снегозапасов [14], так и рассчитанных с использованием SWAP по измеренным метеорологическим данным. Значения критериев согласия между рассчитанными снегозапасами с использованием различной метеорологии (измеренной и рассчи-

танной с помощью климатических моделей) очень высоки: значения NS для разных площадок – 0.88–0.99, коэффициент корреляции $Corr$ – от 0.92 до 0.99. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности проведения прогностических расчетов изменения характеристик формирования снегозапасов в районах расположения снегомерных площадок до 2099 г. для указанных выше четырех сценариев семейства RCP.

Результаты сценарного прогнозирования изменения характеристик климатической внутригодовой динамики формирования снегозапасов в районах снегомерных площадок в XXI в. в связи с возможными изменениями климата

Прогностические сценарные расчеты динамики SWE проведены для каждого RCP-сценария с суточным шагом для периода 2016–2099 гг. Далее

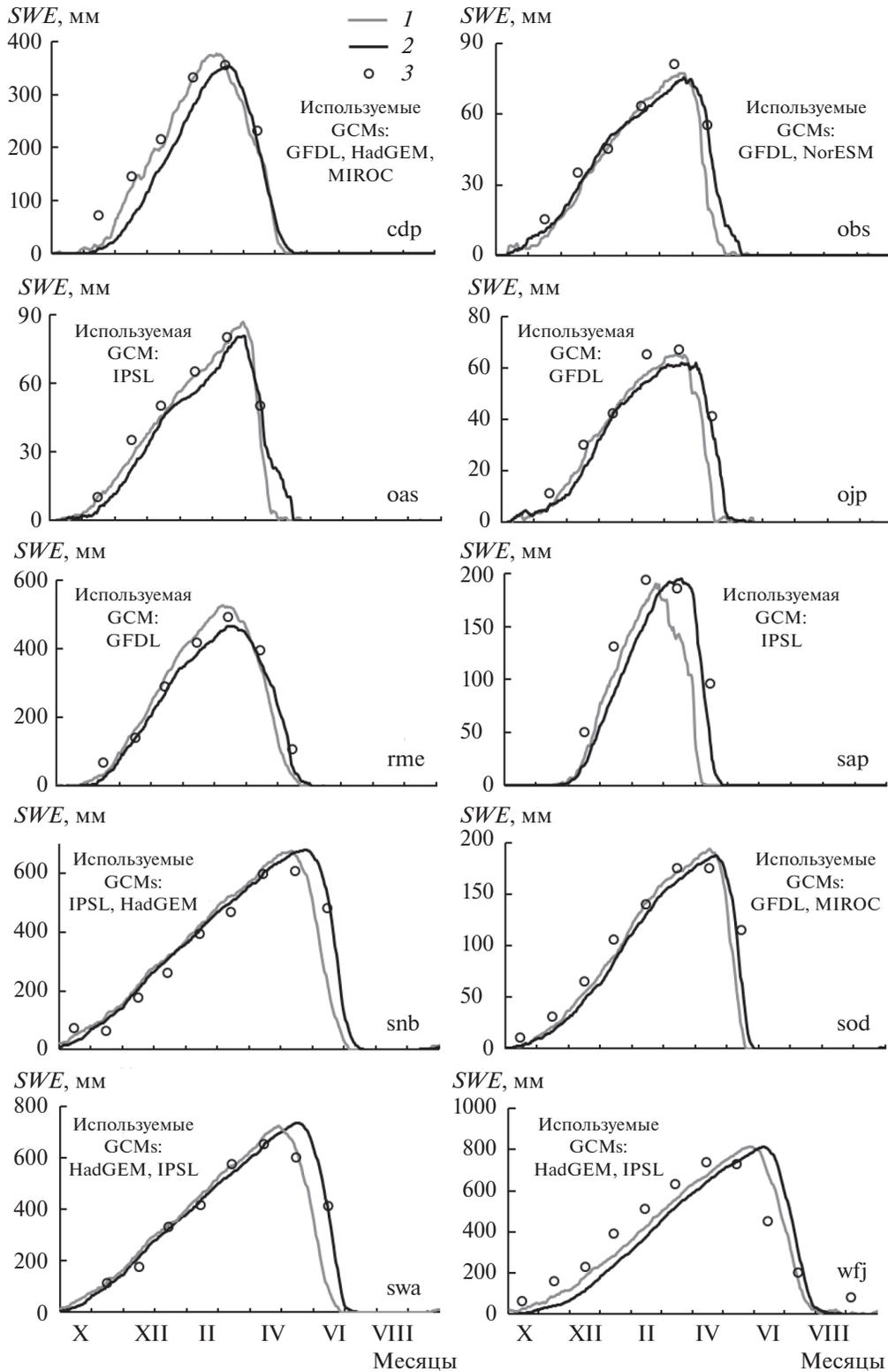


Рис. 3. Климатическая годовая динамика $SWE(t)$ для снегомерных площадок (приведенные коды площадок расшифрованы в табл. 1) в базовый период, рассчитанная с использованием метеорологических данных, полученных (1) по данным наблюдений на площадках, (2) в результате расчетов по различным GCMs (сокращенные названия использованных GCMs даны на рисунке). Представлены климатические среднемесячные значения SWE , полученные по данным их многолетних измерений (3) [14].

для каждой снегомерной площадки были выделены три климатических периода: базовый P_0 (табл. 1) и два прогностических: P_1 в середине XXI в. (2036–2060 гг.) и P_2 – в конце (2075–2099 гг.). По выделенным периодам проведено осреднение рассчитанных характеристик формирования снегозапасов с целью получения их климатических значений для соответствующего периода, что позволило провести анализ изменения характеристик формирования SWE для разных климатических периодов в течение XXI в.

В частности, на рис. 4 представлены полученные результаты климатической внутригодовой динамики снегозапасов для периодов P_0 , P_1 и P_2 для всех площадок для климатического сценария RCP6.0, взятого в качестве среднего по сценариям. Видно, что в течение XXI в. для всех площадок климатические снегозапасы уменьшаются, при этом, как правило, происходит сдвиг начала формирования снежного покрова на более поздние даты, а схода снежного покрова – на более ранние. Хотя климатические снегозапасы с течением времени уменьшаются на всех площадках, степень уменьшения как абсолютных, так и относительных их значений (по отношению к снегозапасам базового периода) на различных площадках, различающихся природными условиями в силу своего географического расположения, разная.

Основные факторы, влияющие на изменение климатических снегозапасов в различных районах земного шара, – вызванные изменениями климата изменения климатической температуры и климатических осадков (прежде всего твердых) [5, 10]. Рассмотрим значения указанных характеристик для разных площадок ESM-SnowMIP в базовый период, их последующие изменения и вызванные ими изменения ряда климатических характеристик формирования снегозапасов к концу XXI в. (период P_2) (рис. 5).

На рис. 5а приведены высоты над уровнем моря для всех площадок ESM-SnowMIP, которые, наряду с географической широтой и долготой площадки, в значительной мере определяют климатические значения температуры воздуха T_{p0} и годовых осадков P_{p0} в базовый период в районе ее расположения (рис. 5б, 5в).

Можно заметить (рис. 5в), что климатические осадки горных районов (площадки *sdr* и *wfj* в Альпах, *gme*, *snb* и *swa* в Скалистых горах Северной Америки) гораздо больше осадков в равнинных районах (*sod* в Финляндии и площадки *oas*, *obs* и *ojr* в Канаде). Исключение – равнинный район с обильными осадками площадки Саппоро (*sar*), находящейся в ~20 км от Японского моря и в 50 км от Тихого океана. Что касается температуры, то большая часть площадок ESM-SnowMIP расположена в относительно холодных районах (с T_{p0} в диапазоне от -1.2 до 1.8°C) (рис. 5б). Толь-

ко три площадки характеризуются относительно теплым климатом: самая южная из равнинных, с морским климатом *sar* ($T_{p0} = 8.9^\circ\text{C}$); горные *sdr* ($T_{p0} = 6.2^\circ\text{C}$) и *gme* ($T_{p0} = 5.0^\circ\text{C}$), расположенные существенно ниже над уровнем моря, чем другие горные площадки. Отметим, что равнинные площадки находятся гораздо севернее горных (за исключением площадки *sar*, находящейся примерно на одной широте с горной площадкой *gme*) (табл. 1).

На рис. 5г приведено осредненное по всем RCP-сценариям относительное изменение общих климатических годовых осадков ΔP_{p2} в период P_2 по сравнению с периодом P_0 . Для равнинных площадок имеет место относительное увеличение количества осадков – наибольшее – на наиболее северной площадке в районе п. Соданкюля (*Sodankylä*) в северной части Финляндии. Для горных площадок, расположенных в более южных районах, изменение общих осадков имеет менее выраженную пространственную закономерность и может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от высоты положения площадки, ориентации горного склона, розы ветров и т.д.

Как отмечено ранее, основные факторы, определяющие климатическое изменение снегозапасов, – изменение климатической температуры воздуха и климатических твердых осадков. На рис. 5д для всех RCP-сценариев и всех площадок показаны изменения климатической температуры воздуха ΔT_{p2} в период P_2 по сравнению с ΔT_{p0} для периода P_0 . Можно отметить, что значения ΔT_{p2} положительны, более или менее близки для всех площадок (усредненные по RCP-сценариям ΔT_{p2} – в диапазоне 2 – 4°C) и сильно зависят от рассматриваемого сценария (диапазон разброса ΔT_{p2} по RCP-сценариям ($\sim 5^\circ\text{C}$) больше, чем по площадкам).

При изменении климата увеличение общего количества выпадающих осадков P (рис. 5г) должно увеличивать и количество твердых осадков P_s , однако их доля в общих осадках уменьшается из-за увеличения температуры воздуха. Результирующий эффект относительного изменения годового количества твердых осадков $\Delta P_{s,p2}$ в период P_2 по сравнению с $\Delta P_{s,p0}$ в период P_0 для всех RCP-сценариев и площадок показан на рис. 5е. Количественные показатели $\Delta P_{s,p2}$ также чувствительны к выбранному сценарию. В целом для всех высокогорных площадок и всех климатических сценариев количество твердых осадков к концу XXI в. уменьшается. Это же происходит и на равнинной площадке *sar*. Для остальных равнинных площадок ситуация неоднозначная – может иметь место как относительное уменьшение, так и небольшое увеличение количества твердых

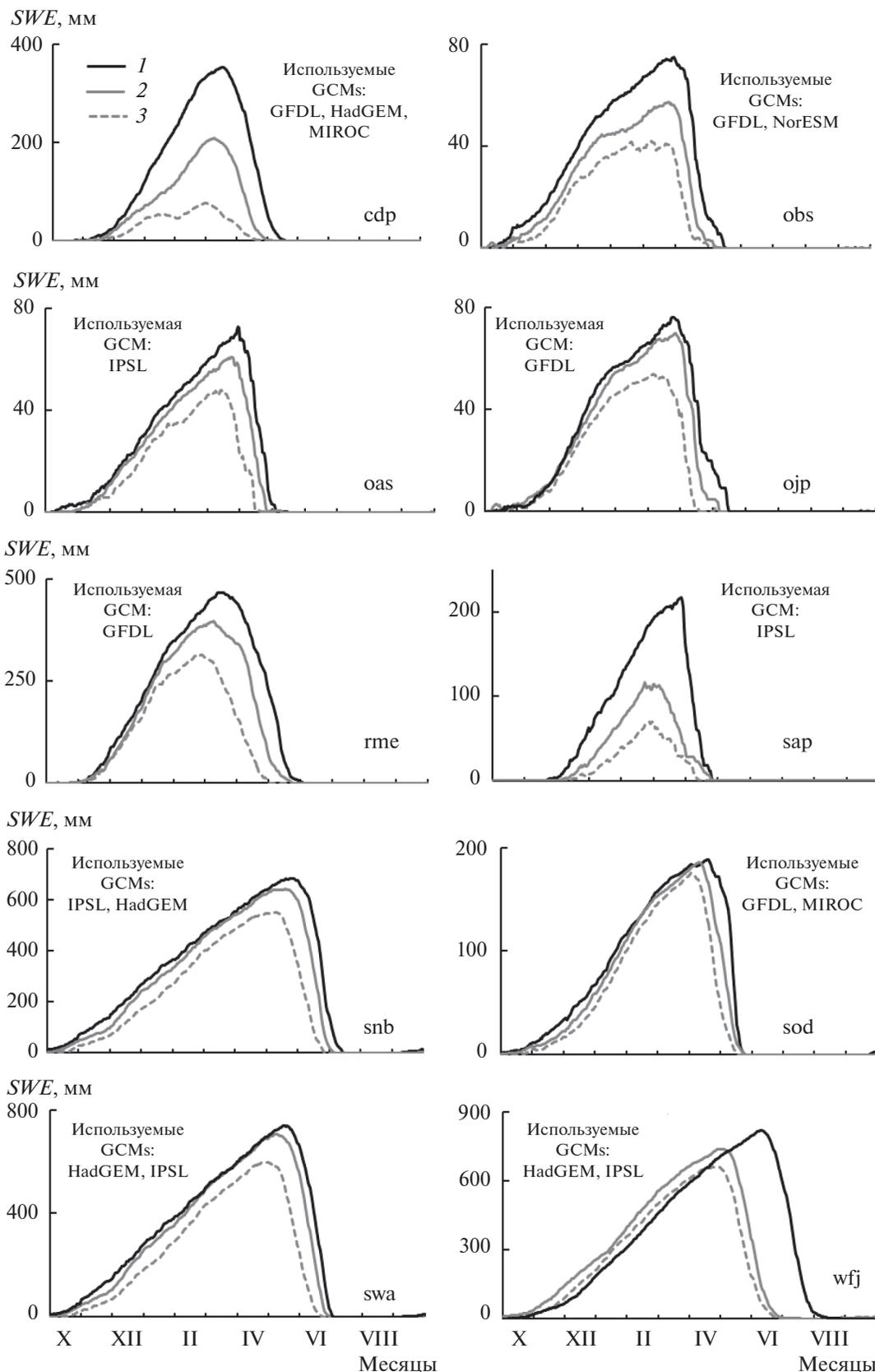


Рис. 4. Климатическая внутригодовая динамика снеговзапасов SWE для периодов P0 (1), P1 (2) и P2 (3) для ESM-SnowMIP площадок для климатического сценария RCP6.0.

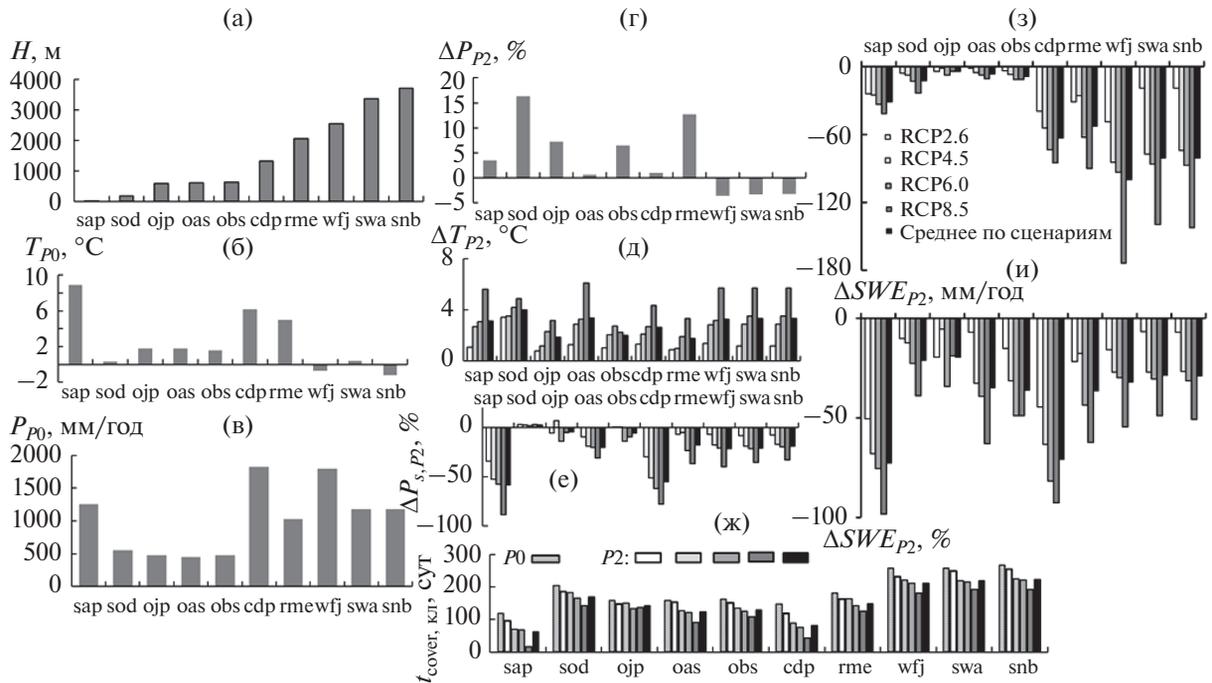


Рис. 5. Изменение характеристик формирования снежного покрова в районах площадок ESM-SnowMIP к концу XXI в. (в период P_2) по сравнению с базовым периодом (P_0). а – высота над уровнем моря площадок ESM-SnowMIP; б, в – климатическая температура воздуха и климатические осадки на площадках в базовый период P_0 ; г – среднее по RCP-сценариям изменение к концу XXI в. общих климатических осадков; д – изменение к концу XXI в. климатической температуры воздуха; е – изменение климатических твердых осадков; ж – продолжительность устойчивого залегания снежного покрова $t_{\text{cover, кл}}$ для климатических периодов P_0 и P_2 ; з, и – абсолютное и относительное изменение к концу XXI в. климатических среднегодовых снегозапасов.

осадков, причем возможно варьирование по знаку даже для одной площадки при разных RCP-сценариях (площадки ojp и obs). Следует отметить, что наибольшее относительное уменьшение твердых осадков ожидается в районах площадок sap и cdp, характеризующихся наибольшими значениями климатической температуры воздуха (рис. 5б). В районах этих площадок продолжительность холодного периода в исторический период наименьшая, при сравнительно близких приращениях температуры на разных площадках (рис. 5д) приводящая к большему относительному сокращению холодного периода, что проявляется в более заметном сокращении продолжительности устойчивого залегания снежного покрова (рис. 5ж) и в больших по абсолютной величине значениях ΔP_{sP_2} .

Рассмотренные особенности ΔT_{P_2} и ΔP_{sP_2} на разных снегомерных площадках приводят к соответствующим особенностям изменения снегозапасов к концу XXI в. На рис. 5з и 5и для разных RCP-сценариев представлены соответственно абсолютные и относительные изменения климатических среднегодовых величин снегозапасов в период P_2 – ΔSWE_{P_2} по сравнению с SWE_{P_0} . Видно, что в районах всех площадок климатические снегозапасы уменьшаются. При этом количе-

ственные показатели такого уменьшения существенно зависят от рассматриваемого климатического сценария. Наибольшее по абсолютной величине сокращение климатических снегозапасов происходит в горных районах (рис. 5з), где гораздо больше и сами снегозапасы (рис. 4). При этом имеется тенденция некоторого уменьшения ΔSWE_{P_2} с высотой горных площадок (рис. 5а, 5и). Среди равнинных площадок наибольшее уменьшение климатических SWE демонстрирует площадка sap, для которой в наибольшей степени сокращается количество твердых осадков (рис. 5е). Относительное сокращение климатических среднегодовых снегозапасов (рис. 5и) в наибольшей степени происходит на площадках sap и cdp (рис. 4), что хорошо коррелирует с наибольшим относительным уменьшением количества твердых осадков на этих площадках – среднее по сценариям значение ΔSWE_{P_2} достигает 70% (рис. 5е).

Представляет интерес сравнение некоторых полученных результатов с результатами других исследований. Так, в [28] приведены результаты прогнозирования изменений SWE в XXI в. на 11 горных станциях Швейцарии, рассчитанных на основе разработанной швейцарским Федеральным институтом исследований снега и лавин модели формирования снежного покрова SNOW-

РАСК (также участвовавшей в ESM-SnowMIP) и метеорологических данных, полученных с помощью десяти региональных климатических моделей. Исследования [28] подтвердили, что относительное снижение климатических *SWE* уменьшается с высотой положения станции и составляет к концу века ~32% для высокогорных станций (>2500 м).

В частности, для высокогорной ст. Вайсфлюйо (Weissfluhjoch) (площадка wfj) медианное значение климатических *SWE* уменьшается на 125 мм (32%) по сравнению с базовым периодом в [28] (1984–2010 гг.). В настоящей работе усредненное по четырем RCP-сценариям сокращение климатического среднегодового значения *SWE* к концу XXI в. для площадки wfj составляет 101 мм (32%) по отношению к базовому периоду *P0* (1996–2016 гг.). Таким образом, представленные в данной статье результаты близки к результатам [28].

В [26] приведена оценка возможных изменений характеристик снежного покрова в Финляндии в 2080–2089 гг. по сравнению с историческим периодом 1980–1989 гг. Основным инструментом исследования также послужила модель SNOW-РАСК, использованная для расчета *SWE* в шести разных районах Финляндии. Метеорологические данные получены с помощью региональной климатической модели (RCAO). При проведении сценарных расчетов изменений динамики *SWE* использованы IPCC-сценарии эмиссии парниковых газов семейства SRES: A2 и B2. Полученные результаты показали, что, как и в настоящей работе, климатические снегозапасы и продолжительность залегания снежного покрова к концу XXI в. уменьшаются во всех районах Финляндии для обоих SRES-сценариев.

Среди рассмотренных в настоящей работе площадок ESM-SnowMIP одна – площадка sod – расположена на севере Финляндии. Примерно в том же регионе находится рассмотренная в [26] снегомерная ст. Оуланка (Oulanka). Приведенные в [26] оценки показывают, что к концу XXI в. климатические среднегодовые снегозапасы сократятся на ст. Оуланка на 16 мм по отношению к базовому периоду. Согласно исследованиям авторов статьи, усредненные по RCP-сценариям среднегодовые снегозапасы в районе площадки sod уменьшатся по отношению к историческому периоду на 13 мм. Таким образом, результаты настоящей работы в целом согласуются с результатами [26].

Следует заметить, что, хотя все рассмотренные в международном проекте ESM-SnowMIP площадки продемонстрировали сокращение в XXI в. мощности и продолжительности залегания снежного покрова, существуют районы в высоких широтах (в частности, северные части Канады и Сибири), в которых может наблюдаться противоположная тенденция [5, 10].

Поэтому желательно дополнить проект ESM-SnowMIP включением экспериментальных площадок, расположенных в подобных районах.

ВЫВОДЫ

В рамках международного проекта ESM-SnowMIP на десяти экспериментальных снегомерных площадках, расположенных в различных районах земного шара, на основе данных наблюдений проведена проверка способности разработанной авторами статьи модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP воспроизводить характеристики динамики снежного покрова в современный период. Сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений, а также с результатами, полученными в рамках проекта ESM-SnowMIP модельерами других стран, показало, что модель SWAP по качеству воспроизведения динамики характеристик снежного покрова находится в числе лучших мировых моделей.

Разработана методика сценарного прогнозирования изменения характеристик формирования снежного покрова с использованием рядов метеорологических элементов, полученной с помощью МОЦАО. На основе разработанной методики получены количественные оценки изменения характеристик формирования снежного покрова в течение XXI в. для снегомерных площадок ESM-SnowMIP в соответствии с RCP-сценариями изменения климата.

Показано, что климатическая годовая динамика снегозапасов *SWE* для всех снегомерных площадок, рассчитанная с использованием модели SWAP и скорректированных результатов различных МОЦАО для исторического периода, вполне удовлетворительно соответствует климатической годовой динамике *SWE*, основанной на данных многолетних измерений, а также климатической годовой динамике *SWE*, рассчитанной по данным метеорологических измерений в районах площадок.

С использованием разработанной методики прогнозирования изменений климатических значений характеристик снежного покрова для всех снегомерных площадок получены прогностические оценки изменения климатических снегозапасов *SWE* для двух прогностических периодов (2036–2060 и 2075–2099 гг.) в соответствии с RCP-сценариями изменения климата. Полученные результаты показали, что в течение XXI в. на всех площадках ожидается сокращение мощности и продолжительности залегания снежного покрова.

Исследованы закономерности влияния природных условий (характеристик климата и высо-

ты над уровнем моря) на изменение климатических снегозапасов в районах, где находятся снегомерные площадки. Показано, что наибольшее сокращение мощности снежного покрова и длительности его залегания происходит в наиболее теплых районах, и относительное сокращение климатических снегозапасов в горных районах уменьшается с увеличением высоты положения площадки.

Авторы выражают признательность организаторам проекта ESM-SnowMIP и персонально Р. Эссери и С. Менард (Эдинбургский университет, Великобритания) за обеспечение необходимой для модельных расчетов информацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Расчеты формирования снежного покрова в различных природных условиях на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 167–181. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-401>
3. Bartlett P.A., MacKay M.D., Verseghy D.L. Modified snow algorithms in the Canadian land surface scheme: Model runs and sensitivity analysis at three boreal forest stands // Atmosphere-Ocean. 2006. V. 44. № 3. P. 207–222. <https://doi.org/10.3137/ao.440301>
4. Brown R.D., Mote P.W. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate // J. Clim. 2009. V. 22. P. 2124–2145. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2665.1>
5. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds B.C. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu, J.P. Palutikof. Geneva: IPCC Secretariat, 2008. 210 p.
6. Derksen C., Brown R. Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections // Geophys. Res. Letters. 2012. V. 39. P. 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012GL053387>
7. Dirmeyer P., Gao X., Oki T. The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: Int. GEWEX Project Office, 2002. № 37. 75 p.
8. Essery R., Kontu A., Lemmetyinen J., Dumont M., Ménard C.B. A 7-year dataset for driving and evaluating snow models at an Arctic site (Sodankylä, Finland) // Geosci. Instrumentation, Methods Data Syst. 2016. V. 5. P. 219–227. <https://doi.org/10.5194/gi-5-219-2016>
9. Flanner M.G., Shell K.M., Barlage M., Perovich D.K., Tschudi M.A. Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008 // Nat. Geosci. 2011. V. 4. P. 151–155. <https://doi.org/10.1038/ngeo1062>
10. Hosaka M., Nohara D., Kitoh A. Changes in Snow Cover and Snow Water Equivalent Due to Global Warming Simulated by a 20km-mesh Global Atmospheric Model // SOLA. 2005. V. 1. P. 093–096. <https://doi.org/10.2151/sola.2005-025>
11. 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., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Raleigh M.S., Schaedler G., Semenov V., Smirnova T., Stacke T., Strasser U., Svenson S., Turkov D., Wang T., Wever N., Yuan H., Zhou W. ESM-SnowMIP. Assessing models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev. 2018. V. 11. P. 5027–5049.
12. Krysanova V., Hattermann F.F. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // Climatic Change. 2017. V. 141. P. 363–379. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y>
13. Landry C.C., Buck K.A., Raleigh M.S., Clark M.P. Mountain system monitoring at Senator Beck Basin, San Juan Mountains, Colorado: A new integrative data source to develop and evaluate models of snow and hydrologic processes // Water Resour. Res. 2014. V. 50. P. 1773–1788. <https://doi.org/10.1002/2013WR013711>
14. Menard C.B., Essery R., Arduini G., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuilmet C., Burke E., Cuntz M., Dai Y., Decharme B., Dutra E., Fang X., Fierz C., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kim H., Krinner G., Lafaysse M., Marke T., Nasonova O., Nitta T., Niwano M., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Strasser U., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H. Scientific and human errors in a snow model intercomparison // Bull. Am. Meteorol. Soc. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329>
15. Ménard C.B., Essery R., Barr A., Bartlett P., Derry J., Dumont M., Fier C., Kim H., Kontu A., Lejeune Y., Marks D., Niwano M., Raleigh M., Wang, L., Wever N. Meteorological and evaluation datasets for snow modelling at 10 reference sites: description of in situ and bias-corrected reanalysis data // Earth Syst. Sci. Data. 2019. V. 11. P. 865–880. <https://doi.org/10.5194/essd-11-865-2019>
16. Morin S., Lejeune Y., Lesaffre B., Panel J.-M., Poncet D., David P., Sudul M. An 18-years long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models // Earth Syst. Sci. Data. 2012. V. 4. P. 13–21. <https://doi.org/10.5194/essd-4-13-2012>
17. Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emor S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J.F., Manning M., Matthews B., Meehl J.L., Meyer L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., van Ypersele J.P., Zurek M. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Im-

- pacts, and Response Strategies. Geneva: IPCC Secretariat, 2008. 132 p.
18. *Mote P.W., Li S., Lettenmaier D. P., Xiao M., Engel R.* Dramatic declines in snowpack in the western US // *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2018. V. 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41612-018-0012-1#citeas> (дата обращения: 12.12.2020) <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
 19. *Mudryk L.R., Kushner P. J., Derksen C., Thackeray C.* Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 919–926. <https://doi.org/10.1002/2016GL071789>
 20. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
 21. *Navarro-Racines C.E., Tarapues-Montenegro J.E., Ramírez-Villegas J.A.* Bias-correction in the CCAFS-Climate Portal: A description of methodologies. Decision and Policy Analysis (DAPA) Research Area. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali, Colombia. 2015. [Электронный ресурс]. URL: http://http://ccaafs-climate.org/downloads/docs/BC_methods_explaining_v2.pdf (дата обращения: 4.12.2020)
 22. *Niwano M., Aoki T., Kuchiki K., Hosaka M., Kodama Y.* Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2012. V. 117. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2011JF002239>
 23. *Qu X., Hall A.* On the persistent spread in snow-albedo feedback // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 69–81. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1774-0>
 24. *Räisänen J.* Warmer climate: Less or more snow? // *Clim. Dyn.* 2008. V. 30. P. 307–319. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0289-y>
 25. *Ramirez-Villegas J., Challinor A., Thornton P., Jarvis A.* Implications of regional improvement in global climate models for agricultural impact research // *Environ. Res. Letters.* 2013. V. 8. № 2. P. 024018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024018>
 26. *Rasmus S., Räisänen J., Lehning M.* Estimating snow conditions in Finland in the late 21st century using the SNOWPACK model with regional climate scenario data as input // *Annals Glaciol.* 2004. V. 38. P. 238–244.
 27. *Reba M.L., Marks D., Seyfried M., Winstal A., Kumar M., Flerchinger G.* A long-term data set for hydrologic modeling in a snow-dominated mountain catchment // *Water Resour. Res.* 2011. V. 47. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2010WR010030>
 28. *Schmucki E., Marty C., Fierz C., Lehning M.* Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs // *Int. J. Climatol.* V. 35. № 11. P. 3262–3273. <https://doi.org/10.1002/joc.4205>
 29. *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. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110>
 30. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Weissfluhjoch dataset for ESM-SnowMIP. 2017. <https://doi.org/10.16904/16> [Электронный ресурс]. URL: <http://www.envidat.ch/dataset/snowmip> (дата обращения: 3.12.2020)
 31. *Zhao M., Dirmeyer P.* Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // *COLA Technical Report*. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies. 2003. № 159. 38 p.