

УДК 556.124.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. 3. ПОЛЕВЫЕ И ЛЕСНЫЕ УЧАСТКИ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА В ИСТОРИЧЕСКИЙ ПЕРИОД¹

© 2024 г. Е. М. Гусев^{a, *}, О. Н. Насонова^a, Е. Э. Ковалев^a, Е. А. Шурхно^a

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

На основе разработанной авторами данной статьи модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP проведены многолетние расчеты характеристик снежного покрова для лесных и полевых участков основных регионов азиатской части России: Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока для исторического периода (1967–2019 гг.). Сопоставление результатов моделирования с соответствующими данными маршрутных снегомерных съемок на метеорологических станциях азиатской территории РФ показало, что SWAP удовлетворительно воспроизводит динамику снегозапасов, высоты и плотности снежного покрова на открытых участках и под пологом леса на указанных объектах. Для всех участков, расположенных в районах снегомерных съемок, получены климатические значения характеристик режима формирования снежного покрова для двух типов подстилающей поверхности (лес, поле) и двух климатических периодов (1967–1992 и 1993–2019 гг.), что позволило выявить тенденции изменения этих характеристик в течение исторического периода. Показано, что направленность изменений климатических значений характеристик снежного покрова на лесных и полевых участках Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока совпадает и соответствует прогнозам на XXI в., полученным на основе климатических моделей.

Ключевые слова: снегозапасы, период залегания снежного покрова, LSM модель SWAP, коэффициент снегонакопления.

DOI: 10.31857/S0321059624040037 **EDN:** APVMML

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья — третья в серии публикаций, посвященных различным аспектам проблемы изменения снежного покрова на территории России. В первых двух статьях [5, 6] этой серии показано, что вопросы динамики такого важного элемента криосферы, как снежный покров, приобретают для территории Российской Федерации, особенно ее пан-арктической части, все большее значение и требуют изучения и развития методов прогнозирования этой динамики в условиях изменяющегося климата. В силу

этого стратегическая цель всего исследования авторов — выявление существующих в настоящее время тенденций изменения характеристик снежного покрова на территории России и долгосрочное прогнозирование динамики таких изменений до конца XXI в.

В [5] на основе анализа возможных методов диагностики современного состояния и долгосрочного прогнозирования изменений характеристик снежного покрова на территории России обосновано использование в качестве инструментария для решения указанной проблемы физико-математических моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой (Land Surface Models — LSMs), воспроизводящих процессы теплообмена в системе почва — растительный/снежный покров — приземный слой атмосферы, в сочетании с необходимой

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001 “Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов”).

для выполнения долгосрочных прогнозов метеорологической информацией, полученной в результате расчетов на основе глобальных климатических моделей (Ocean – Atmosphere Global Climate Models – OAGCMs).

Для достижения поставленной стратегической цели в качестве основного элемента указанного инструментария используется разработанная авторами настоящей статьи LSM Soil Water–Atmosphere–Plants (SWAP) [2]. Модель прошла многостороннюю проверку качества воспроизведения характеристик снежного покрова, в том числе и в процессе участия в различных международных проектах [5], в частности, в “The Earth System Models – Snow Models Intercomparison Project” (ESM–SnowMIP) [17], организованном в рамках Всемирной программы исследований климата (ВПИК) с целью обеспечить прогресс в понимании процессов формирования снежного покрова и систематизировать полученные знания для использования их в глобальных и региональных климатических и гидрологических моделях в контексте происходящих глобальных изменений.

Кроме того, поскольку для достижения вышеуказанной стратегической цели необходимо провести оценку эффективности SWAP для объектов, расположенных в России, проверка качества воспроизведения характеристик снежного покрова была проведена для полевых и лесных участков Европейской территории России (ЕТР) для исторического периода 1967–2019 гг. [5, 6]. Полученные при этом результаты позволили также выявить тенденции изменения характеристик снежного покрова на полевых и лесных участках ЕТР в течение рассмотренного исторического периода.

Настоящая публикация посвящена моделированию динамики снежного покрова за тот же исторический период (1967–2019 гг.) для полевых и лесных участков азиатской территории России (АТР) – Сибири и Дальнего Востока (ДВ). Как и в [5, 6], первостепенная задача данного исследования – оценка качества моделирования характеристик снежного покрова на основе сопоставления результатов расчета по модели SWAP с данными соответствующих на-

блюдений на полевых и лесных участках Сибири и ДВ. В качестве дополнительной задачи полагалось исследовать долговременные тенденции изменения характеристик формирования снежного покрова на полевых и лесных участках АТР в исторический период.

МОДЕЛЬ SWAP

Модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP [2] разработана в Институте водных проблем РАН. 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. Выходными переменными модели (которых может быть до нескольких десятков) служат значения составляющих водного и теплового балансов, а также показатели динамики водного и теплового режима рассматриваемой системы. В настоящей работе авторов интересовала прежде всего динамика характеристик снежного покрова: снегозапасов, высоты и плотности снега.

Исследование качества воспроизведения моделью SWAP характеристик снежного покрова для различных районов Земного шара многократно осуществлялось, как уже отмечалось выше, в связи с участием авторов модели в ряде международных проектов [13, 17, 18, 20, 22] и показало хорошие результаты. В [5, 6] подобная проверка была проведена для территории ЕТР.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ И ИХ ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В целях более детального анализа полученных результатов исследуемая территории была разделена на три части в соответствии с ее физико-географическим районированием: Западную Сибирь (ЗС), Восточную Сибирь (ВС) и ДВ (рис. 1), поскольку закономерности формирования характеристик снежного покрова, определя-

емые физическим механизмом геофизических и гидрологических процессов, в этих регионах существенно различаются.

ЗС — часть Сибири, расположенная между Уральскими горами на западе и руслом р. Енисей на востоке. ВС — территория Сибири от Енисея до водораздельных хребтов, идущих вдоль Тихого океана. ДВ России — ее восточная часть, к которой относят области бассейнов рек, впадающих в моря Тихого океана, а также расположенные в этих морях российские острова.

На большей части территории ЗС климат континентальный (за исключением северных районов, Алтая и Алтайского края), зимой на него в значительной мере влияют воздушные массы, поступающие с ВС. Хотя с запада ЗС закрывают от влияния Атлантики Уральские горы, но все же в ее северные районы иногда приходят смягчающие климат и приносящие циклоны воздушные массы с ЕТР, а в южные районы — воздушные массы с Каспийского и Черного морей.

Климат большей части ВС резко континентальный, что объясняется центральным положением на материке, удаленностью от Атлантического побережья, наличием горных хребтов на пути воздушных масс с Тихого океана. Зимой ВС находится во власти Сибирского антициклона, представляющего собой массивное скопление холодного сухого воздуха в северо-восточной части Евразии с сентября по апрель. Это обуславливает малое количество осадков и сильное выхолаживание подстилающей поверхности в холодный период года. Отметим, что в ВС в районе Верхоянска и Оймякона находится один из регионов северного полушария с наиболее суровым климатом.

Большая часть территории ДВ характеризуется муссонным климатом. Только севернее полярного круга на территории ДВ климат субарктический. Влияние Тихого океана смягчает суровость климата ДВ по сравнению с ВС.

Первым этапом исследования стала подготовка информационного обеспечения, необходимого для моделирования формирования снежного покрова на полевых и лесных участках Сибири

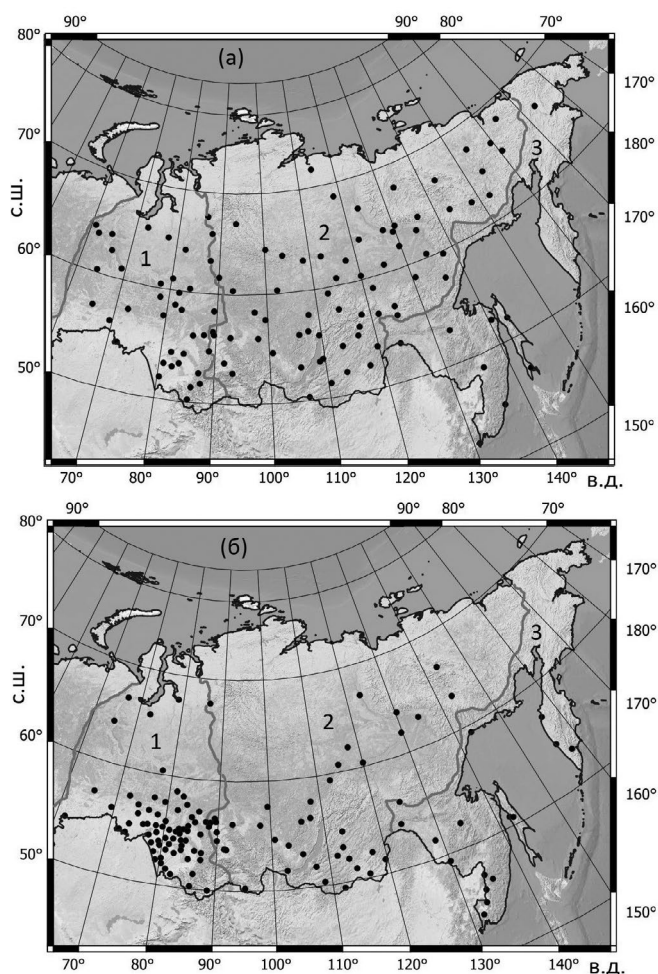


Рис. 1. Расположение метеорологических станций (точки) на азиатской части России, данные маршрутных снегомерных съемок которых использованы в работе для лесных (а) и полевых (б) участков. Серые линии показывают границы, разделяющие Западную Сибирь (1), Восточную Сибирь (2) и Дальний Восток (3).

и ДВ и для проверки результатов моделирования по данным измерений. Подготовка проводилась по той же методике, что и для участков, расположенных на ЕТР [5, 6].

Указанное информационное обеспечение включает в себя метеорологическую информацию по следующим характеристикам: атмосферным осадкам, температуре и влажности воздуха, интенсивности потоков приходящей длинноволновой и коротковолновой радиации, скорости ветра и атмосферному давлению. Указанные характеристики (за исключением радиации) — трехчасовые данные стандартных метеорологических наблюдений, проводившихся на 191 ме-

теостанции за период с 1966 по 2019 г., — взяты из базы данных ВНИИГМИ-МЦД [1]. Трехчасовые значения приходящей длинноволновой и коротковолновой радиации для указанных станций рассчитаны с использованием данных срочных стандартных метеорологических наблюдений по методике, изложенной в [4]. Выбор метеорологических станций обусловлен тем, что на них проводились маршрутные снегомерные съемки на полевых и/или лесных участках. В процессе съемок измерялись снегозапасы SWE на открытых участках и/или под пологом леса, высота снежного покрова h_{sn} и его плотность ρ_{sn} . Эти данные, необходимые для проверки результатов моделирования, взяты также из базы данных ВНИИГМИ-МЦД для периода 1966–2019 гг. При этом для лесных участков использовались данные наблюдений, проводившихся на 114 метеорологических станциях (рис. 1а), для полевых — на 124 (рис. 1б).

Кроме того, неотъемлемая часть информационного обеспечения модели — параметры почвы и растительного покрова. В связи с отсутствием детального описания маршрутов снегомерных съемок подготовка для расчетов значений параметров подстилающей поверхности осуществлялась аналогично изложенной в [5] с использованием глобальной экосистемной базы данных ECOCLIMAP, разработанной Национальным Центром Метеорологических Исследований CNRM/GAME (Метео-Франс, Тулуза, Франция) [12].

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПОЛЕВЫХ И ЛЕСНЫХ УЧАСТКАХ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Подготовленное информационное обеспечение позволило провести модельные расчеты динамики различных характеристик снежного покрова с трехчасовым временным шагом для лесных и полевых участков, расположенных в районах выбранных станций для периода 1966–2019 гг. При этом метеорологические данные использовались для задания верхнего граничного условия в задаче формирования водно-теплового режима в системе почва — растительный/снежный покров — приземный слой атмосферы.

В отсутствие измеренных значений начальных условий задачи использовался метод “раскрутки” (“spin-up”) модели. Расчетный период 1967–2019 гг. (за вычетом 1966 г., данные которого использовались для “раскрутки” модели) делился на две части: ранний (базовый) T1 (1967–1992 гг.) и поздний T2 (1993–2019 гг.). Рассчитывались следующие характеристики режима формирования снежного покрова: среднегодовые SWE_{mean} , среднезимние (средние за декабрь, январь и февраль) SWE_{win} и максимальные за год SWE_{max} значения снегозапасов, даты начала t_{start} и окончания t_{end} устойчивого залегания снежного покрова и его продолжительность $t_{sn} = t_{end} - t_{start}$, дата достижения максимальных снегозапасов t_{max} . Полученные значения усреднялись по годам для интервалов T1 и T2 для получения климатических значений этих характеристик, что дало возможность провести анализ их изменений в рамках исторического периода.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление модельных расчетов с данными наблюдений

Полученные результаты модельных расчетов характеристик снежного покрова для лесных и полевых участков АТР были сопоставлены с данными маршрутных снегомерных съемок. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены примеры сопоставления рассчитанной и измеренной динамики снегозапасов SWE за ряд лет для полевых и лесных участков в районах станций, расположенных в ЗС, ВС и ДВ: Тюмень (65.4° в.д., 57.1° с.ш.), Ванавара (102.3° в.д., 60.3° с.ш.), Верхоянск (133.4° в.д., 67.6° с.ш.), Оймякон (143.2° в.д., 63.3° с.ш.), Орлинг (105.8° в.д., 56.1° с.ш.), Соболево (Камчатский край) (155.9° в.д., 54.3° с.ш.). На первых трех станциях показаны лесные участки, на остальных — полевые. На рис. 2 видно, что воспроизведение снегозапасов вполне удовлетворительное. Качество воспроизведения режима снежного покрова можно оценить на основе статистических критериев различных характеристик. В данной работе, как и в [3, 5, 6, 17, 18], использовалась нормированная на стандартное отклонение измеренных снегозапасов среднеквадратическая

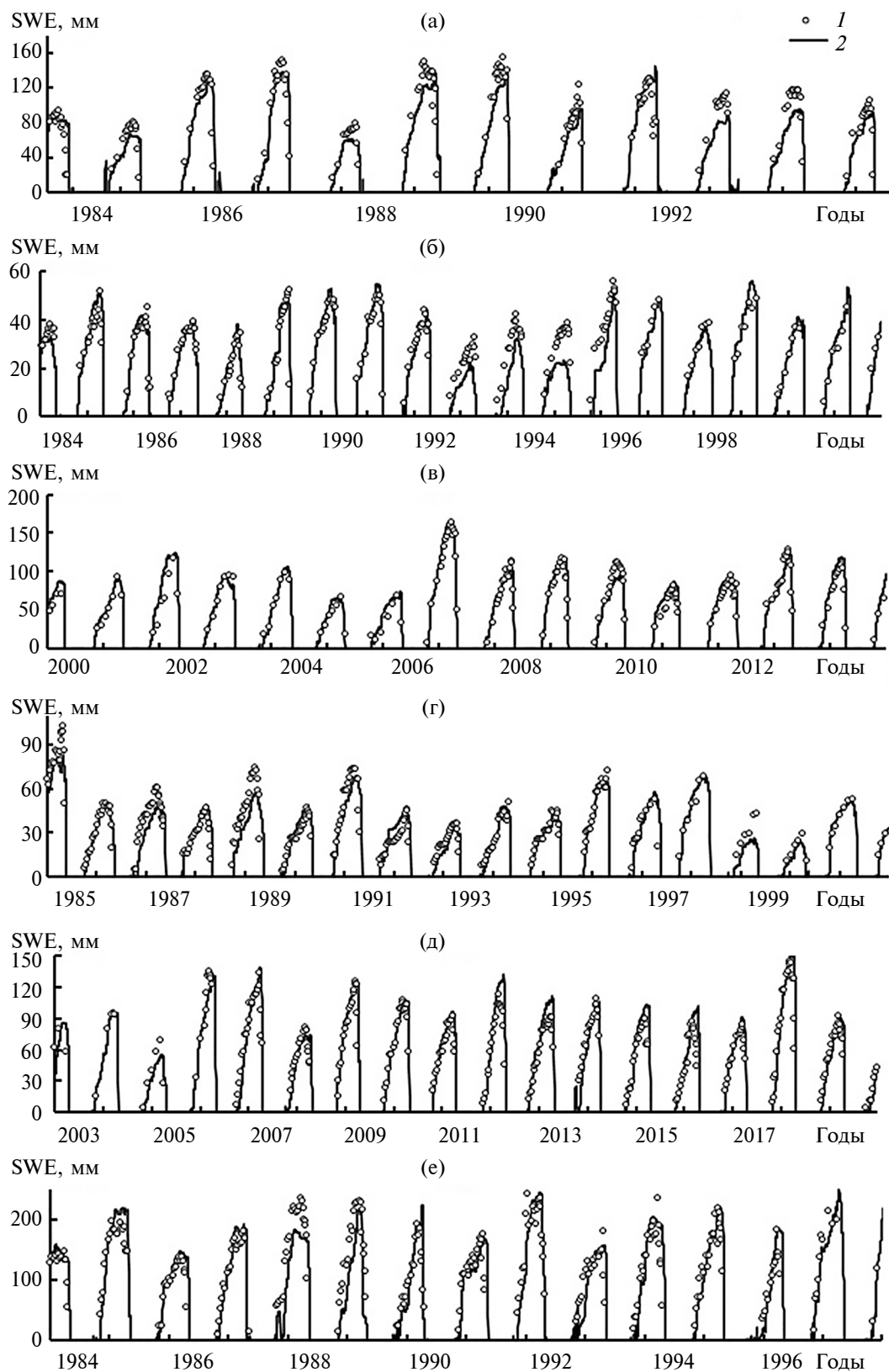


Рис. 2. Примеры сопоставления измеренных (1) и рассчитанных на основе модели SWAP (2) снегозапасов в районах лесных (а–в) и полевых (г–е) маршрутных снегосъемок на станциях Тюмень (а), Верхоянск (б), Ванавара (в), Оймякон (г), Орлинга (д), Соболево (е).

ошибка расчета σ_{nSWE} данной характеристики за весь расчетный период 1967–2019 гг. (при наличии соответствующих данных измерений).

Усредненное по 238 полевым и лесным участкам Сибири и ДВ значение σ_{nSWE} оказалось ~ 0.90 . По оценкам результатов, полученных в проекте ESM-SnowMIP, аналогичное значение, полученное в указанном выше международном проекте ESM-SnowMIP в результате осреднения по 20 лучшим по этому показателю моделям и 10 экспериментальным площадкам, расположенным в различных районах земного шара, ~ 0.75 . Таким образом, качество воспроизведения снегозапасов на лесных и полевых участках Сибири и ДВ на основе модели SWAP, хотя и несколько хуже, чем на площадках ESM-SnowMIP (по объективным причинам, рассмотренным в [6]), но все же близко к качеству воспроизведения указанной характеристики лучшими мировыми моделями.

Таким образом, можно сделать вывод о довольно адекватном воспроизведении моделью SWAP процессов формирования снежного покрова как для полевых, так и для лесных участков Сибири и ДВ. Следовательно, рассчитанные с помощью SWAP значения SWE можно исполь-

зовать для последующего анализа их временной динамики и пространственного распределения по рассматриваемому региону.

Оценка изменений динамики формирования снежного покрова на полевых и лесных объектах Сибири и Дальнего Востока за последние десятилетия

Для исследования долговременных тенденций изменения характеристик формирования снежного покрова на территории Сибири и ДВ в течение исторического периода использовались вышеуказанные результаты расчетов снегозапасов на различных участках исследуемого региона, на которых осуществлялись снегомерные наблюдения. Кроме того, дополнительно проведены расчеты для того типа подстилающей поверхности (лес или поле), для которого маршрутные снегосъемки на той или иной метеорологической станции не проводились. Таким образом, была смоделирована динамика характеристик снежного покрова за исторический период для участков с лесным и полевым типом подстилающей поверхности для 191 метеорологической станции Сибири и ДВ. Из них для последующего анализа отобраны 138 метеостанций, на которых метеорологические наблюдения проводились без пропусков с 1966 по 2019 г., что

Таблица 1. Усредненные по метеорологическим станциям азиатской части РФ рассчитанные климатические значения характеристик (обозначения в тексте) режима формирования снежного покрова на лесных (числитель) и полевых (знаменатель) участках (отсчет значений t_{start} , t_{end} и t_{max} начинается с 1 сентября), а также коэффициента снегонакопления K_d для максимальных за год снегозапасов SWE_{max} , среднегодовой приземной температуры воздуха T и годовых сумм твердых P_h и общих P осадков

Характеристика	Западная Сибирь (52 станции)		Восточная Сибирь (63 станции)		Дальний Восток (11 станций)	
	Период T1	Период T2	Период T1	Период T2	Период T1	Период T2
SWE_{mean} , мм	43/37	47/41	21/18	23/21	39/29	40/29
SWE_{win} , мм	82/75	91/86	39/38	44/43	70/58	71/58
SWE_{max} , мм	130/118	147/137	59/55	66/63	125/99	136/106
t_{start} , сут	54/52	55/54	58/51	57/50	68/66	70/66
t_{end} , сут	235/231	233/230	221/219	222/220	232/221	234/222
t_{sn} , сут	182/180	177/176	163/168	165/170	164/155	165/157
t_{max} , сут	204/197	204/199	184/177	186/181	201/180	202/182
K_d для SWE_{max}	1.10	1.07	1.07	1.05	1.26	1.28
T , °C	−1.4	−0.4	−6.1	−5.0	−2.1	−1.2
P , мм/год	503	531	350	370	613	624
P_h , мм/год	167/165	176/174	84/83	88/87	161/160	166/165

позволило получить смоделированные ряды суточных значений снегозапасов для лесных и полевых участков за 54-летний период. На их основе для каждой станции рассчитаны, как в [5, 6], многолетние ряды SWE_{mean} , SWE_{win} , SWE_{max} , t_{start} , t_{end} , t_{max} и t_{sn} . Для последующего анализа полученные значения указанных характеристик были усреднены по климатическим периодам T1 и T2.

В табл. 1 представлены климатические значения рассчитанных характеристик режима формирования снежного покрова, усредненные по станциям для каждого из трех регионов (ЗС, ВС, ДВ), для двух типов подстилающей поверхности (лес и поле) и для периодов T1 и T2. В табл. 1 также представлены климатические значения таких важных характеристик, как годовые суммы твердых P_h и общих P осадков и среднегодовая при-

земная температура воздуха T , а также коэффициент снегонакопления K_{σ} , равный отношению максимального снегозаписа в лесу к его значению в поле [5, 6, 8, 9, 11]. Пространственное распределение максимальных за год снегозапасов SWE_{max} , продолжительности залегания снежного покрова, годовых сумм осадков и среднегодовой температуры воздуха для двух периодов и двух типов подстилающей поверхности показано на рис. 3–5.

Отметим, что пространственное распределение P и T (рис. 5) подтверждает, что разделение АТР на регионы ЗС, ВС и ДВ, границы которых приведены на рис. 1, довольно хорошо отражает разницу климатических особенностей этих регионов, обуславливающую различия характеристик формирования снежного покрова (табл. 1).

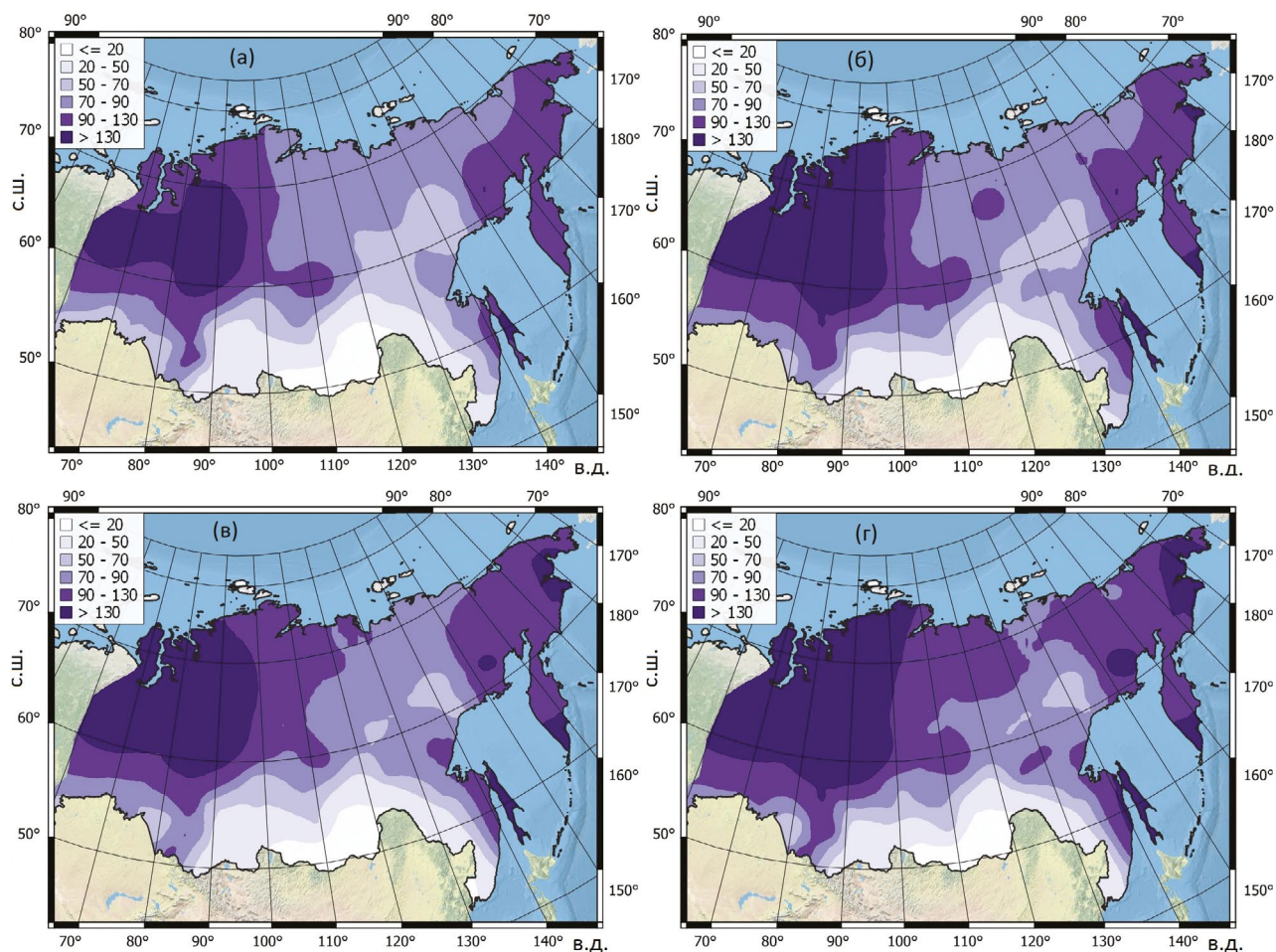


Рис. 3. Распределение климатических значений максимальных за год снегозапасов SWE_{max} , мм, на полевых (а, б) и лесных (в, г) участках АТР для периодов T1 (а, в) и T2 (б, г).

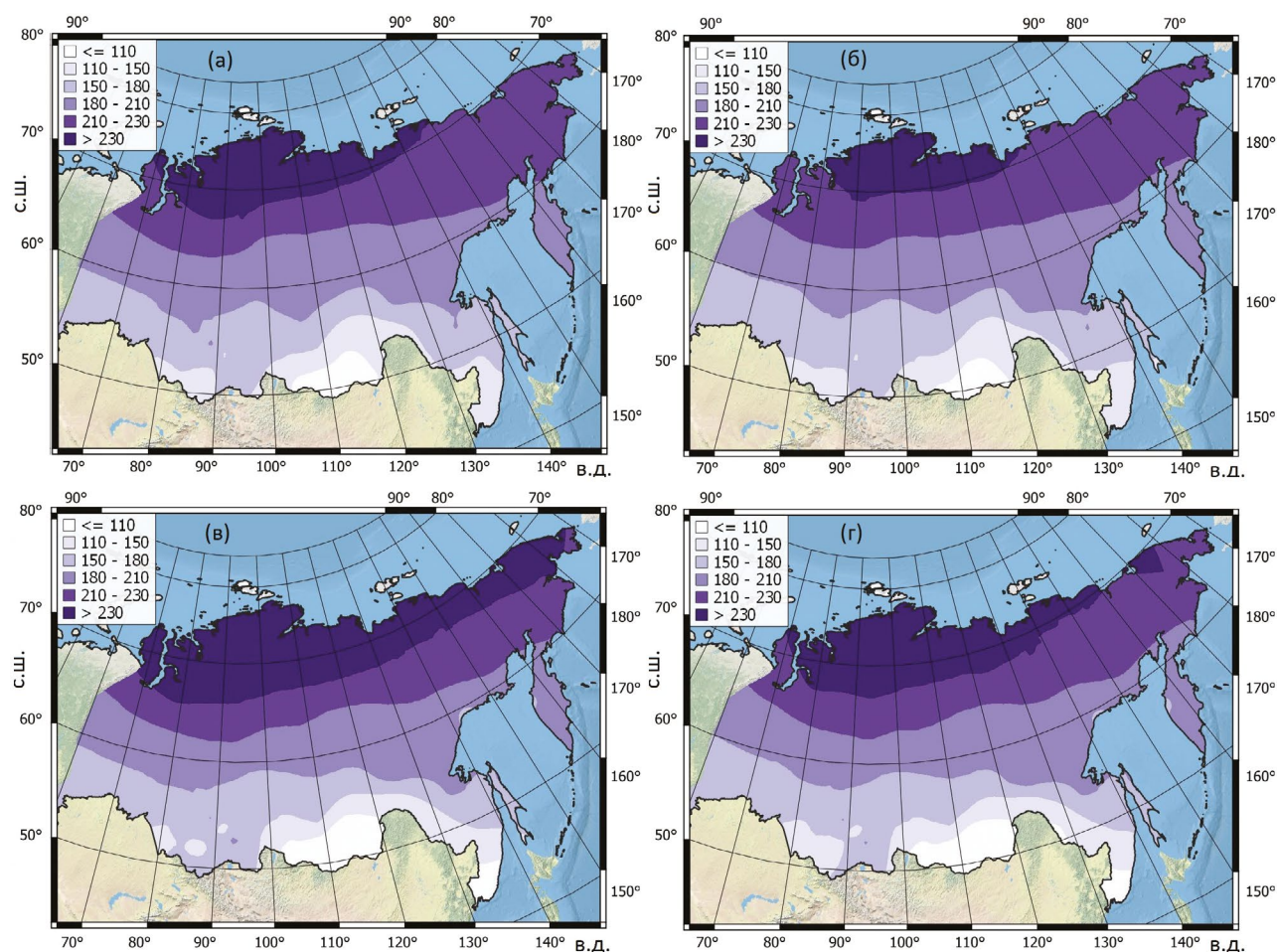


Рис. 4. Распределение климатических значений продолжительности залегания снежного покрова (сут) на полевых (а, б) и лесных (в, г) участках АТР для периодов Т1 (а, в) и Т2 (б, г).

Следует отметить, что представленные в табл. 1 осредненные по метеорологическим станциям значения не являются безусловно репрезентативными для всего региона, поскольку станции распределены неравномерно по территории, особенно это касается ВС и ДС, где большая часть станций находится в южных районах, а в северных — немногочисленные станции расположены в основном вдоль крупных рек. По этой же причине приведенные на рис. 3–5 значения соответствующих характеристик в районах севернее 70° с.ш. имеют гораздо большие погрешности по сравнению с центральными и южными областями АТР. Однако приведенные значения позволяют сопоставить лесные и полевые участки и все же получить общее представление о динамике характеристик снежного покрова в рассматриваемый исторический период в указанных регионах.

Кроме того, отметим, что картирование полученных значений климатических характеристик формирования снежного покрова в силу небольшого числа расчетных точек (138 для каждого типа подстилающей поверхности) и вышеуказанных особенностей их распределения довольно грубовато и не отражает обусловленных в основном рельефом особенностей пространственного распределения указанных характеристик, как это, например, сделано в [10] при оценке климатических значений SWE для ЗС для февраля за период 1979–2013 гг. Возможность получить более детальную картину пространственного распределения соответствующей характеристики определяется большим количеством и более равномерным распределением расчетных точек, плотность которых в [10] более чем на порядок больше, чем в настоящей работе, в связи с использованием модельных метеорологических

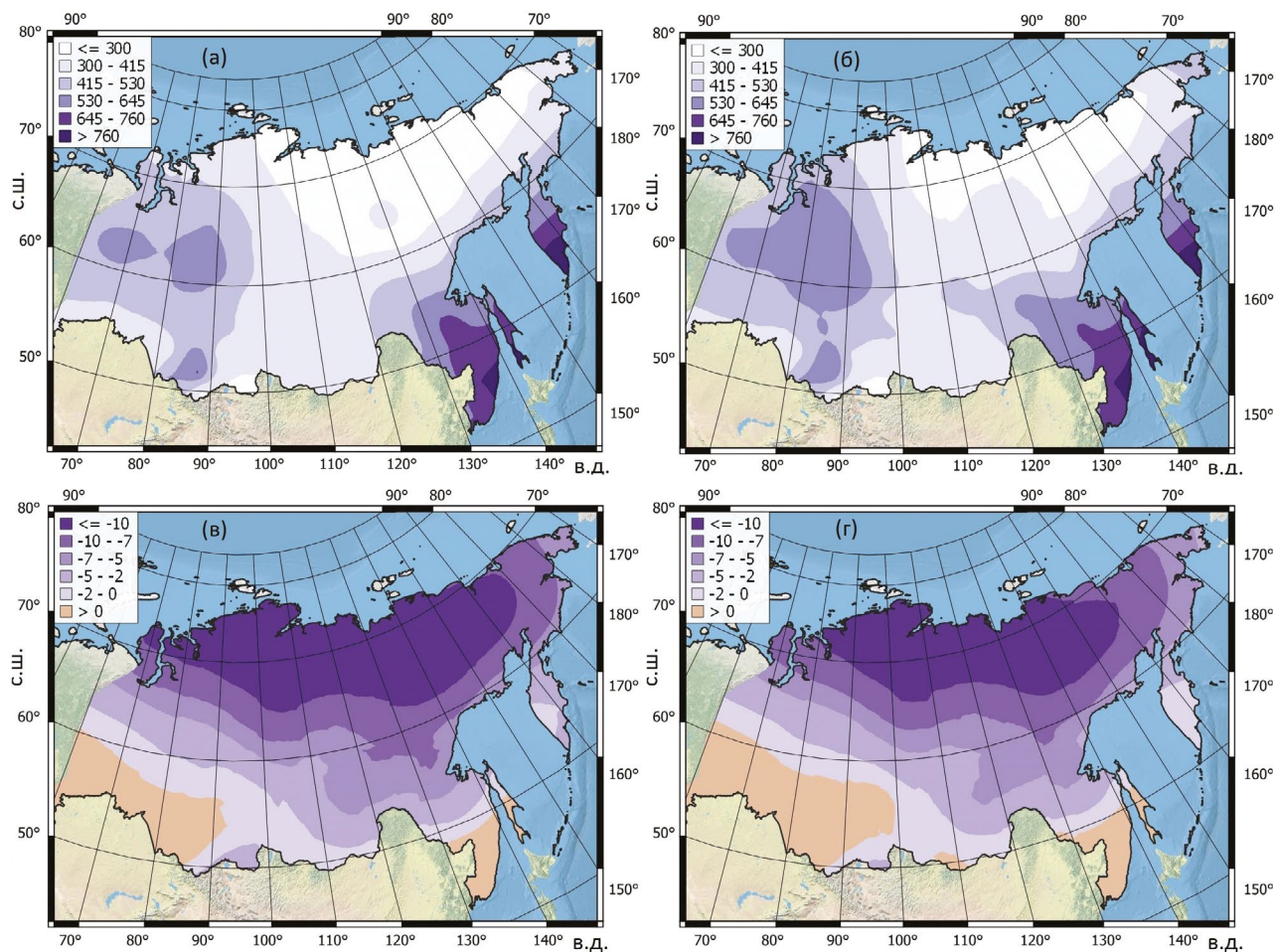


Рис. 5. Распределение климатических значений годовых сумм осадков (мм/год) (а, б) и среднегодовой приземной температуры воздуха (°C) (в, г) по АТР для периодов Т1 (а, в) и Т2 (б, г).

данных для пространственной расчетной сетки $0.75^\circ \times 0.75^\circ$.

Подобная детализация планируется авторами при прогнозировании изменения характеристик формирования снежного покрова в XXI в. В этих исследованиях карты пространственного распределения указанных характеристик будут более детальными, поскольку расчеты будут проводиться не на основе данных метеорологических наблюдений на довольно редкой сети метеостанций, а с применением результатов моделирования полей метеорологических элементов с помощью климатических моделей, использующих более густую регулярную пространственную сеть для проведения расчетов.

Представленные в настоящей работе результаты, полученные на основе реальных метеорологических данных, тем не менее позволяют визуаль-

но оценить характер изменения крупномасштабных градиентов характеристик снежного покрова по основным регионам АТР и, самое главное, сделать вывод о том, как меняются климатические значения характеристик снежного покрова в течение исторического периода в среднем для этих регионов (а также для ЕТР) с учетом их региональных климатических различий.

В [5, 6] отмечено, что увеличение в высоких широтах количества осадков в холодный период года должно приводить к увеличению снегозапасов. Но повышение температуры воздуха обуславливает сокращение продолжительности холодного периода и способствует уменьшению накопления снегозапасов. Результирующее влияние изменения указанных предикторов на изменение режима формирования снежного покрова зависит от того, какой фактор в соответствующем регионе преобладает.

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что усредненные по станциям каждого из трех азиатских регионов разные климатические характеристики снеготопов (среднегодовые SWE_{mean} , среднелетние SWE_{win} и максимальные SWE_{max} снеготопов) для периода Т2 выросли по сравнению с базовым периодом Т1 (в диапазоне 0–17% в зависимости от региона и подстилающей поверхности). При этом в районах ДВ SWE_{mean} и SWE_{win} почти не изменились. Особенно большой (7–16%) прирост как для лесных, так и для полевых участков наблюдается для SWE_{max} . Заметим, что для ЕТР SWE_{max} выросли за исторический период примерно так же (на 11–15%). Таким образом, доминирующим фактором изменения снеготопов для всех регионов оказалось увеличение осадков.

Однако в многолетней динамике изменения снеготопов имеются и региональные различия, вызванные различиями климата. Так, усредненная по используемым в исследовании метеорологическим станциям ЕТР [6], ЗС, ДВ и ВС среднегодовая температура воздуха T в исторический период (1967–2019 гг.) составила соответственно 3.5, –0.9, –1.7 и –5.5°C, а годовые осадки соответственно 569, 517, 619 и 360 мм/год (табл. 1).

Таким образом, ЕТР и ЗС характеризуются относительно более теплым климатом по сравнению с ДВ и особенно с ВС, что приводит к небольшим различиям в динамике t_{sn} в этих регионах (табл. 1). Хотя увеличение максимальных снеготопов в период Т2 по сравнению с Т1 произошло во всех трех азиатских регионах и на ЕТР, t_{sn} на территориях ЗС и ЕТР уменьшилась (на 4–6 дней), а на территориях ВС и ДВ – немного увеличилась (на ~1–2 сут). Отметим, впрочем, что для ДВ в связи с малой выборкой точек указанное изменение t_{sn} сопоставимо с оценкой ошибки расчета.

Полученные результаты согласуются с выводами в работах [7, 14, 16, 19, 21], посвященных прогнозам изменения режима формирования снеготопов в северном полушарии в XXI в. В этих публикациях отмечено, что практически во всех регионах земного шара, где возможно наличие снежного покрова, продолжительность его залегания будет уменьшаться. Для большей

части этой территории прогнозируется также и уменьшение снеготопов в зимний период. Однако для наиболее высоких широт результаты расчетов с использованием климатических моделей прогнозируют увеличение SWE в зимний период в XXI в. [14, 16, 19], что свидетельствует о доминирующем влиянии увеличения количества осадков. Характеристика t_{sn} может вести себя по-разному, уменьшаясь в районах с более мягким климатом и оставаясь практически неизменной или даже немного увеличиваясь в более суровых климатических условиях.

Полученные результаты показывают, что прогнозируемые климатическими моделями тенденции изменения характеристик формирования снежного покрова на ЕТР и АТР уже начались.

Помимо этого, для территорий ЗС, ВС и ДВ рассчитаны значения коэффициента снеготоповления K_d . В [6] рассмотрены основные факторы, определяющие K_d . Результирующий эффект влияния леса на снеготоповление определяется совокупностью этих факторов и может быть разным в разных случаях. Преобладающее влияние тех или иных факторов на изменение снеготоповления определяется природными условиями и морфологическими характеристиками древостоя (при этом, как отмечается в [15], снеготоповление в лесу наиболее чувствительно не к его морфологическим параметрам, а к метеорологическим характеристикам рассматриваемого района). Как оказалось, во всех трех регионах $K_d > 1.0$. При этом для исторического периода для ЗС и ВС, как и для ЕТР [6], наблюдается тенденция к его уменьшению со временем (табл. 1). Эту тенденцию для территории России в целом подтверждают и данные наблюдений [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанной авторами статьи модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP проведены многолетние расчеты (с трехчасовым временным шагом) характеристик снежного покрова для лесных и полевых участков АТР для исторического периода (1967–2019 гг.). Сопоставление

результатов моделирования с соответствующими данными маршрутных снегомерных съемок на метеорологических станциях АТР показало, что SWAP удовлетворительно воспроизводит динамику снегозапасов, высоты и плотности снежного покрова как на полевых участках, так и под пологом леса. Этот вывод дает основание использовать модель SWAP в качестве основного инструмента прогнозирования многолетней динамики характеристик снежного покрова на рассмотренной территории.

Для всех участков, расположенных в районах снегомерных съемок, получены климатические значения характеристик режима формирования снежного покрова для двух типов подстилающей поверхности (лес, поле) и двух климатических периодов — Т1 (1967–1992 гг.) и Т2 (1993–2019 гг.), что позволило выявить тенденции изменения этих характеристик в течение исторического периода. При этом направленность изменений характеристик снежного покрова на лесных и полевых участках ЗС, ВС и ДВ совпадает и соответствует прогнозам на XXI в., полученным на основе климатических моделей.

Показано, что в районах АТР произошло увеличение за исторический период усредненных по метеорологическим станциям климатических значений температуры воздуха на 0.9–1.1°C, а твердых осадков на 3 (ДВ) – 6% (ЗС). Это в наибольшей степени сказалось на увеличении максимальных снегозапасов – от 7–9% на полевых и лесных участках ДВ до 12–16% в ЗС и ВС. Рост температуры воздуха вызвал уменьшение продолжительности залегания снежного покрова на территории ЗС на 4–5 сут. В то же время влияние увеличения температуры на территории ВС и ДВ было скомпенсировано увеличением максимальных снегозапасов, сдвигающим дату схода снежного покрова на более поздние сроки, что привело к увеличению продолжительности залегания снежного покрова на 1–2 сут.

Сопоставление регионов с разными климатическими условиями позволило сделать вывод о доминирующем влиянии увеличения осадков (по сравнению с ростом температуры) на режим формирования снежного покрова в регионах с более суровым климатом.

Полученные результаты показали, что на АТР группа факторов, вызывающая увеличение снегонакопления и продолжительности залегания снега, оказывает большее влияние на формирование снежного покрова в лесу по сравнению с полем. В результате среднее по территории каждого региона (ЗС, ВС и ДВ) значение коэффициента снегонакопления >1. В то же время изменения метеорологических характеристик за исторический период привели к некоторому уменьшению со временем коэффициента снегонакопления в ЗС и СВ. На территории ДВ данный параметр практически не изменился.

Следует отметить, что настоящая публикация – очередной этап исследований авторов по моделированию и прогнозированию динамики характеристик снежного покрова на территории Российской Федерации. Данный этап предназначен для проверки способности модели SWAP воспроизводить динамику формирования снежного покрова на АТР, что необходимо для обоснования возможности использования модели для получения долгосрочных сценарных прогнозов изменения характеристик формирования снежного покрова на территории России в XXI в. В результате с учетом двух предыдущих публикаций, посвященных моделированию и прогнозированию динамики характеристик снежного покрова на европейской территории РФ, можно сделать вывод о возможности использования модели SWAP в качестве основного алгоритмического инструмента прогнозирования многолетней динамики характеристик снежного покрова на всей территории России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных “Маршрутные снегомерные съемки”. Свид. гос. регистрации базы данных № 2013620279.
<http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>
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. 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.

4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 133–145.
5. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Моделирование динамики характеристик режима формирования снежного покрова на территории Российской Федерации. 1. Полевые участки ЕТР в исторический период // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 423–437.
6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Моделирование динамики характеристик режима формирования снежного покрова на территории Российской Федерации. 2. Лесные участки ЕТР в исторический период // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 438–450.
7. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Сценарные прогнозы изменения снегозапасов в связи с возможными изменениями климата в различных районах земного шара // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 1. С. 100–113.
8. Мишон В.М. Теоретические и методические основы оценки ресурсов поверхностных вод в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения европейской части России: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Воронеж: ВГУ, 2007. 64 с.
9. Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Влияние климатических изменений на высоту снежного покрова в лесу и поле в первой декаде XXI века // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 91–100. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(91-100).
10. Турков Д.В., Сократов В.С., Туткова Т.Б. Определение снегозапасов Западной Сибири по расчетам на модели локального теплообмена SPONSOR с использованием данных реанализа // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 343–364.
11. Черных Д.В., Золотов Д.В., Першин Д.К., Бирюков Р.Ю. Пространственно-временная дифференциация снежного покрова в бассейне р. Касмалы (Алтайский край) // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 4. С. 359–369.
12. Champeaux J.L., Masson V., Chauvin F. ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution // Meteorol. Appl. 2005. V. 12. P. 29–32. <https://doi.org/10.1017/S1350482705001519>
13. Essery R., Kim H., Wang L., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuilmet C., Burke E., Cuntz M., Decharme B., Dutra E., Fang X., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kontu A., Krinner G., Lafaysse M., Lejeune Y., Marke T., Marks D., Marty C., Menard C.B., Nasonova O., Nitta T., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 4687–4698. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>
14. Eythorsson D., Gardarsson S.M., Nijssen B. Projected changes to Northern Hemisphere snow conditions over the period 1950–2100, given two emission scenarios // Remote Sensing Appl.: Society and Environ. 2023. V. 30. P. 100954.
15. Gelfan A., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt // J. Hydrometeorol. 2004. V. 5. P. 785–803.
16. Hosaka M., Nohara D., Kitoh A. Changes in Snow Cover and Snow Water Equivalent Due to Global Warming Simulated by a 20 km-mesh Global Atmospheric Model // SOLA. 2005. V. 1. P. 093–096. doi: 10.2151/sola.2005–025.
17. 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., Chérut 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., Stacked 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.
18. 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. 2021. V. 102. № 1. P. E61–E79. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0329.
19. 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>
20. Schlosser C.A., Slater A., Robock A., Pitman A.J., Vinnikov Ya., Henderson-Sellers A., Speranskaya N.A.,

- Mitchell K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Desborough C.E., Dickinson R.E., Dai Y.-J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y.M., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E.A., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Shmakin A.B., Smirnova T.G., Verseghy D.L., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.L.* Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia: PILPS Phase 2(d) // *Mon. Weather Rev.* 2000. V. 128. № 2. P. 301–321.
21. *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.* 2015. V. 35. № 11. P. 3262–3273. doi: 10.1002/joc.4205.
22. *Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C.E., Henderson-Sellers A., Robock A., Vinnikov K.Ya., Mitchell K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P.M., de Rosnay P., Dickinson R.E., Dai Y.-J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Ye.M., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E.A., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake S., Shmakin A.B., Smirnova T.G., Verseghy D., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q.* The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d) // *J. Hydrometeorol.* 2001. V. 2. P. 7–25.