УДК 551.583: 556.124.2

ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЕВРАЗИИ В XXI ВЕКЕ ПО РАСЧЕТАМ С АНСАМБЛЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СМІР6

© 2023 г. М. Р. Парфенова^{*a*, *}, М. М. Аржанов^{*a*}, И. И. Мохов^{*a*, *b*}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия ^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, стр. 2, ГСП-1, Москва, 119991 Россия *e-mail: parfenova@ifaran.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022 г. После доработки 28.02.2023 г. Принята к публикации 10.03.2023 г.

Проведен анализ изменений площади снежного покрова S в Евразии с использованием результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей международного проекта СМІР6 при сценарии антропогенных воздействий SSP2-4.5 для XXI века. В сопоставлении ансамблевых модельных расчетов при сценарии "historical" со спутниковыми данными CDR на фоне общего уменьшения площади снежного покрова в Евразии при потеплении выявлены особенности изменчивости S во взаимосвязи с изменениями приповерхностной температуры T в различные сезоны. Отмечено, что средние для ансамбля моделей оценки параметра чувствительности dS/dT для переходных сезонов весной и осенью могут быть значительно меньше по абсолютной величине, чем полученные на основе данных и для отдельных моделей. Согласно ансамблевым модельным расчетам, скорость сокращения площади снежного покрова в Евразии во второй половине XXI века уменьшается по сравнению с первой половиной XXI века во все сезоны. При этом максимальные значения скорости сокращения площади снежного покрова в Евразии характерны для переходных сезонов – осени и весны.

Ключевые слова: изменения площади снежного покрова и приповерхностной температуры, спутниковые данные, реанализ, климатические модели, СМІР6

DOI: 10.31857/S0002351523030070, EDN: TRYZJN

введение

Снежно-ледовый покров оказывает существенное влияние на формирование региональных и глобальных климатических режимов. С изменениями снежного покрова связаны наиболее значимые изменения свойств земной поверхности на временных масштабах от нескольких месяцев до миллионов лет [Будыко, 1980; Мохов, 1993; Кислов, 2011; Barry et al., 2011]. Современные изменения климата также существенно связаны с изменениями характеристик снежного покрова, в том числе максимальной высоты и продолжительности его залегания, изменения пространственного положения границ его сезонного распространения. Уменьшение альбедо поверхности в связи с уменьшением площади снежного покрова при повышении приповерхностной температуры способствует увеличению поглощения поверхностью солнечной радиации с усилением положительной обратной связи. Оценке современных и возможных в будущем изменений снежного покрова на региональных и континентальных масштабах посвящено много экспериментальных, диагностических и модельных исследований [Foster et al., 1983; Moxob, 1984; Groisman et al., 1994; Кренке и др, 2001; Brown et al., 2009; Шмакин, 2010; Bulygina et al., 2011; Frei A. et al., 2012; Павлова и др. 2013; Попова и др., 2013; Bindoff et al., 2013; Groisman et al., 2013; Estilow et al., 2015; Mankin et al., 2015; Mudryk et al., 2017; Connolly R. et al., 2019; Thackeray et al., 2019; Moxob, 2020a; Мохов, 2020б; Mudryk et al., 2020; Santolaria-Otin et al., 2020; Мохов и др., 2021; Мохов и др., 2022а; Мохов и др., 2021б]. С режимами снежного покрова связана возможность формирования бимодальных распределений для аномалий приповерхностной температуры в переходные сезоны [Мохов и др., 1997]. В регионах континентальной криолитозоны основные характеристики термического режима многолетнемерзлых грунтов, включая температуру и глубину сезонного протаивания, а также гидрологического режима в значительной степени зависят от высоты и продолжительности залегания снежного покрова [Аржанов и др., 2008; Надежина и др, 2008].

Модели	Пространственное разрешение (количество ячеек по долготе и по широте)	Ссылки
BCC-CSM2-MR	T106 (320 × 160)	http://forecast.bcccsm.ncc-cma.net/htm
CanESM5	T42 (128 × 64)	http://climate-modelling.canada.ca/climatemodeldata/data.shtml
CNRM-ESM2-1	T85 (256 × 128)	http://www.umr-cnrm.fr
FGOALS-f3-L	(360 × 180)	https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AGUFM.A45K1993L/abstract
IPSL-CM6A-LR	(144×142)	https://cmc.ipsl.fr/
MIROC6	T85 (256 × 128)	https://gmd.copernicus.org/articles/12/2727/2019/
MPI-ESM1-2-LR	T63 (192 × 96)	https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/
MRI-ESM2-0	T106 (320 × 160)	https://www.mri-jma.go.jp/Dep/glb/index_en.html
NorESM2-LM	(144 × 96)	https://www.noresm.org/

Таблица 1. Глобальные климатические модели ансамбля СМІР6, результаты расчетов с которыми использовались в данной работе

Диапазон внутригодовых вариаций площади снежного покрова в Северном полушарии (около 50 млн км²) существенно превышает вариации протяженности морских льдов (около 16 млн км².), при этом основной вклад вносят вариации именно снежного покрова в Евразии [Мохов и др., 2022а; Мохов и др., 20216]. В связи с этим для адекватной оценки тенденций современных климатических изменений необходим анализ глобальных и региональных особенностей взаимосвязи снежного покрова с температурным режимом [Connolly R. et al., 2019; Mudryk et al., 2020].

В данной работе представлены оценки изменений общей площади снежного покрова в Евразии в XXI веке в связи с изменениями приповерхностной температуры по результатам расчетов с ансамблем современных климатических моделей в сопоставлении с данными спутниковых наблюдений для последних десятилетий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа изменений площади снежного покрова в Евразии при современных и возможных в XXI веке климатических изменениях использовались результаты расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей в рамках международнопроекта CMIP6 (https://esgf-node.llnl. го gov/search/cmip6/). В том числе анализировались среднемесячные значения занимаемых снежным покровом долей модельных ячеек и приповерхностной температуры по расчетам с 9 глобальными климатическими моделями (BCC-CSM2-MR, CanESM5, CNRM-ESM2-1, FGOALS-f3-L, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM) (табл. 1) при сценарии

"historical" для периода 1980–2014 гг. и сценарии SSP2-4.5 для периода 2015–2100 гг.

Общая площадь снежного покрова определялось как произведение доли модельной ячейки, занятой снегом. на плошаль ячейки с последуюшим суммированием по всем ячейкам суши в пределах рассматриваемого региона. Результаты численного моделирования сопоставлялись с результатами анализа среднемесячных данных CDR (Climate Data Records) для снежного покро-Ba (https://climate.rutgers.edu/snowcover/, https:// www.ncdc.noaa.gov/) на основе спутниковых наблюдений [Robinson et al., 1993; Robinson et al., 2012]. Точность картирования такова, что данный продукт считается подходящим для исследований климата на континентальных масштабах (https:// www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/ iso?id=gov.noaa.ncdc:C00756).

Для приповерхностной температуры использовались среднемесячные данные реанализа ERA5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/ reanalysis-datasets/era5).

Вариации площади снежного покрова в годовом ходе и межгодовой изменчивости анализировались с использованием фазовых портретов. Для оценки связи площади снежного покрова с температурным режимом применялся корреляционный анализ. Параметры чувствительности площади снежного покрова к изменению температуры оценивались на основе линейных регрессий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены фазовые портреты для изменений площади снежного покрова *S* в Евразии по результатам расчетов с климатическими моделями СМІР6 для разных 20-летних периодов — базового периода 2000–2019 гг. в начале XXI века



Рис. 1. Фазовые портреты для вариаций площади снежного покрова *S* в Евразии в годовом ходе (цифры соответствуют месяцам) и межгодовой изменчивости по расчетам с климатическими моделями СМІР6 для базового периода 2000–2019 гг. (синие кривые) и периодов 2041–2060 гг. (а) и 2081–2100 гг. (б) (красные кривые).

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 59 № 3 2023



Рис. 2. Фазовые портреты изменений площади снежного покрова в Евразии в годовом ходе (цифрами отмечены месяцы) и межгодовой изменчивости для периодов 1979–1999 гг. (синий цвет) и 2000–2019 гг. (красный цвет) по спутниковым данным CDR.

Таблица 2. Средние значения и диапазоны межмодельных вариаций (в скобках) площади снежного покрова S в Евразии для периода 2000—2019 гг. по результатам расчетов с моделями СМІР6 в сопоставлении с соответствующими средними значениями и диапазонами межгодовых вариаций (в скобках) S по спутниковым данным CDR для разных месяцев

	Площадь снежного покрова Евразии, млн. км ²			
Месяцы	2000—2019 гг.			
	данные	модели СМІР6		
Январь	30.1 (27.7–32.5)	25.7 (22.3–29.1)		
Февраль	28.8 (26.0–31.6)	25.3 (22.1–28.5)		
Март	24.2 (21.7–26.7)	22.4 (19.5–25.3)		
Апрель	16.6 (15.0–18.2)	16.0 (13.7–18.3)		
Май	8.9 (7.0–10.8)	7.8 (6.2–9.4)		
Июнь	2.5 (0.9-4.1)	1.7 (1.0–2.4)		
Июль	0.3 (0.0-0.6)	0.4 (0.0-0.8)		
Август	0.2 (0.1–0.3)	0.3 (0.0-0.6)		
Сентябрь	1.6 (0.7–2.5)	1.2 (0.6–1.8)		
Октябрь	11.3 (8.4–14.2)	8.0 (6.2–9.8)		
Ноябрь	21.2 (18.7–23.7)	16.4 (13.4–19.4)		
Декабрь	27.4 (25.5–29.3)	22.5 (19.2–25.8)		

и периодов 2041-2060 гг. и 2081-2100 гг. - в середине и конце XXI века. Для сравнения на рис. 2 приведены фазовые портреты изменений плошади снежного покрова S в Евразии в годовом ходе и межгодовой изменчивости для периодов 1979-1999 гг. и 2000-2019 гг. по спутниковым данным CDR. Согласно рис. 2 интервал современных вариаций S в годовом ходе составляет около 30 млн км² с наибольшими средними значениями и диапазоном их межгодовой изменчивости в зимние месяцы и минимальными – в летние. Модельные оценки в целом воспроизводят наблюдаемые вариации площади снежного покрова в Евразии, при этом по отдельным моделям вариации S могут недооцениваться. Согласно результатам расчетов с ансамблем моделей (рис. 1) для базового периода проявляется значительный диапазон современных вариаций S в годовом ходе – с наименьшими вариациями в пределах 20 млн км² и наибольшими – около 30 млн км² и более.

Для середины XXI века вариации протяженности снежного покрова в годовом ходе составляют от 20 млн км² (по данным модели MPI-ESM1-2-LR) до около 31 млн км² (по данным модели MIROC6). Для конца XXI века (рис. 1б) оценки вариаций протяженности снежного покрова на территории Евразии находятся в том же интервале (от 20 млн км² до около 32 млн км²). Согласно представленным на рисунках фазовым портретам, наибольшая внутрисезонная изменчивость характерна для зимних месяцев. В соответствии с результатами



Рис. 3. Изменения площади снежного покрова *S* в Евразии в зависимости от приповерхностной температуры *T* для разных месяцев (отмеченных цифрами) в межгодовой изменчивости: по спутниковым данным CDR для *S* и данным реанализа ERA5 для *T* для периода 2000–2019 гг. (а) и по расчетам с глобальными климатическими моделями CMIP6 для периодов 2000–2019 гг. (б), 2041–2060 гг. (в) 2081–2100 гг. (г). Прямые соответствуют линейным регрессиям.

проведенных расчетов видно, что снежный покров в зимние сезоны имеет тенденцию к сокращению к середине XXI века (рис. 1а) по сравнению с началом века. Наиболее значительное сокращение средней площади S к середине XXI века получено по модели CanESM5. Наименьшее сокращение S выявлено для моделей CNRM-ESM2-1, MRI-ESM2-0 и NorESM2-LM. Оценки протяженности снежного покрова на конец XXI века (относительно его начала) по всем рассматриваемым моделям ансамбля показывают более значительное сокращение его площади к концу века, чем к середине века. Наиболее значительное сокращение для зимних сезонов к концу XXI века получено по модели CanESM5, а наименее значительное -- по модели MRI-ESM2-0.

В табл. 2 представлены средние значения и диапазоны межмодельных вариаций площади снежного покрова *S* в Евразии для периода 2000— 2019 гг. по результатам расчетов с моделями СМІР6 в сопоставлении с соответствующими средними значениями и диапазонами межгодовых вариаций *S* по спутниковым данным CDR для разных месяцев. Диапазоны межмодельных вариаций площади снежного покрова в Евразии для всех месяцев для периода 2000-2019 гг. перекрываются с диапазонами межгодовых вариаций S по спутниковым данным CDR для всех месяцев для периода 2000–2019 гг. При этом для средних для ансамбля моделей значения S отмечаются заметные различия с соответствующими средними значениями S по спутниковым данным CDR. Превышение по данным CDR средних значений S для ансамбля моделей достигает и превышает в осенне-зимние месяцы 3 млн км². При этом диапазон межмодельных различий S в холодное полугодие с ноября по апрель (более 6 млн км² в зимние месяцы) превышает диапазон межгодовых вариаций S по спутниковым данным для периода 2000-2019 гг.

Наряду со сравнением средних значений *S* по ансамблевым модельным расчетам и по спутниковым данным проведено сравнение соответствующих оценок связи площади снежного покрова с приповерхностной температурой для Евразии. На рис. 3 представлены изменения площади Таблица 3. Оценки параметров чувствительности dS/dT площади снежного покрова в Евразии по данным CDR к изменениям приповерхностной температуры по данным ERA5 в межгодовой изменчивости для периода 2000–2019 гг. и по расчетам с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP6 для разных месяцев для 2000–2019 гг. В скобках приведены СКО межгодовой изменчивости. Наряду со средними для ансамбля моделей оценками представлены (в дополнительном столбце справа) соответствующие экстремальные оценки для отдельных моделей

d*S*/d*T*, млн. км²/K

Mecquili	2000-2019 гг.			
месяцы	данные	модели СМІР6		
Январь	-0.7 (±0.2)	-0.7 (±0.1)	$-1.1 (\pm 0.3)$ -0.4 (±0.1)	
Февраль	-1.1 (±0.2)	-0.6 (±0.1)	-1.0 (±0.2) -0.2 (±0.1)	
Март	-1.3 (±0.2)	-0.9 (±0.1)	-1.1 (±0.3) -0.7 (±0.2)	
Апрель	-0.9 (±0.3)	-0.9 (±0.1)	-1.9 (±0.4) -1.0 (±0.2)	
Май	-2.8 (±0.6)	-0.3 (±0.0)	-2.1 (±0.5) -1.2 (±0.3)	
Июнь	-1.7 (±0.5)	-0.3 (±0.0)	-1.1 (±0.3) -0.2 (±0.1)	
Июль	-0.3 (±0.1)	-0.1 (±0.0)	-0.3 (±0.1) 0.1 (±0.0)	
Август	-0.1 (±0.1)	-0.0 (±0.0)	$-0.2 (\pm 0.1)$ $-0.0 (\pm 0.0)$	
Сентябрь	-0.7 (±0.3)	-0.2 (±0.0)	-0.7 (±0.2) -0.2 (±0.0)	
Октябрь	-1.1 (±0.6)	-0.3 (±0.0)	-1.7 (±0.4) -0.6 (±0.2)	
Ноябрь	-1.0 (±0.4)	-0.7 (±0.1)	-1.4 (±0.3) -0.5 (±0.1)	
Декабрь	-0.9 (±0.1)	-0.5 (±0.0)	$-1.2 (\pm 0.3)$ $-0.4 (\pm 0.1)$	

снежного покрова в Евразии S в зависимости от приповерхностной температуры Tдля разных месяцев (отмеченных цифрами) в межгодовой изменчивости: по спутниковым данным CDR для Sи данным реанализа ERA5 для T для периода 2000—2019 гг. (а) и по расчетам с глобальными климатическими моделями CMIP6 для периодов 2000—2019 гг. (б), 2041—2060 гг. (в) 2081—2100 гг. (г).

Изменения приповерхностной температуры Tи соответствующие изменения площади снежного покрова S в годовом ходе на порядок больше, чем в межгодовой изменчивости. В связи с этим характеристики связи изменений S и T определяются существенно более значимыми вариациями в годовом ходе, чем в межгодовой изменчивости [Мохов и др., 2022]. На основе соответствующей линейной регрессии (прямая на рис. За) можно оценить параметр температурной чувствительности площади снежного покрова по данным для всех месяцев в году для периода 2000–2019 гг.: $dS/dT = -1.16 (\pm 0.01)$ млн км²/К. Для ансамбля модельных расчетов величина dS/dTдля периода 2000-2019 гг. оценена равной -0.93 (±0.02) млн км²/К с уменьшением по абсолютной величине до $-0.90 (\pm 0.02)$ млн км²/К для 2041-2060 гг. и до -0.87 (±0.02) млн км²/К для 2081-2100 гг. (см. рис. 36-3г). Уменьшение по абсолютной величине полученных оценок параметра чувствительности в XXI веке связано с общим уменьшением площади снежного покрова Евразии при потеплении.

В табл. 3 представлены полученные на основе соответствующих линейных регрессий оценки параметров чувствительности d*S*/d*T* площади снежного покрова в Евразии к изменениям приповерхностной температуры для разных месяцев в межгодовой изменчивости. В том числе приведены оценки по спутниковым данным CDR к изменениям приповерхностной температуры по данным ERA5 и по расчетам с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP6 для разных месяцев для 2000–2019 гг. Наряду со средними для ансамбля моделей оценками представлены (в дополнительном столбце справа) соответствующие экстремальные оценки для отдельных моделей.

Согласно табл. 3 оценки параметра dS/dT по расчетам с ансамблем моделей в целом меньше по абсолютной величине, чем при использовании спутниковых данных и данных реанализа. Средние для ансамбля моделей оценки параметра чувствительности dS/dT могут быть значительно меньше по абсолютной величине, чем полученные на основе данных и для отдельных моделей, в частности для переходных сезонов - при переходе от весны к лету и осенью. При этом соответствующие оценки для индивидуальных моделей могут значительно лучше соответствовать полученным с использованием данных наблюдений.

В табл. 4 приведены средние для разных месяцев значения площади снежного покрова *S* в Евразии по результатам расчетов с моделями СМІР6 для трех 20-летних периодов – в начале, середине и конце XXI века. Согласно табл. 4 в течение XXI века отмечается общее уменьшение площади снежного покрова в Евразии для всех месяцев года. Наибольшие скорости уменьшения площади снежного покрова отмечены для переходных сезонов – сезонов формирования снежного покрова осенью и его таяния весной. ПроявТаблица 4. Средние для разных месяцев значения площади снежного покрова S в Евразии для периодов 2000–2019, 2041–2060 и 2081–2100 гг. по результатам расчетов с моделями СМІР6. В скобках приведены межмодельные СКО

Площадь снежного покрова Евразии, млн. км ²			
модели СМІР6			
2000—2019 гг.	2041—2060 гг.	2081—2100 гг.	
25.7 (±3.4)	24.4 (±3.3)	23.6 (±3.4)	
25.3 (±3.2)	24.4 (±3.1)	23.6 (±3.1)	
22.4 (±2.9)	21.0 (±2.5)	20.0 (±2.5)	
16.0 (±2.3)	14.3 (±1.8)	13.3 (±1.8)	
7.8 (±1.6)	6.5 (±1.2)	5.7 (±1.3)	
1.7 (±0.7)	1.2 (±0.6)	1.0 (±0.5)	
0.4 (±0.4)	0.3 (±0.3)	0.2 (± 0.3)	
0.3 (±0.3)	0.2 (± 0.3)	0.2 (±0.3)	
1.2 (±0.6)	0.7 (± 0.5)	0.5 (±0.4)	
8.0 (±1.8)	6.1 (±1.8)	5.0 (±1.8)	
16.4 (±3.0)	14.8 (± 2.7)	13.6 (±2.6)	
22.5 (±3.3)	21.2 (±3.3)	20.2 (±3.2)	
	Площадь снежл 2000–2019 гг. 25.7 (±3.4) 25.3 (±3.2) 22.4 (±2.9) 16.0 (±2.3) 7.8 (±1.6) 1.7 (±0.7) 0.4 (±0.4) 0.3 (±0.3) 1.2 (±0.6) 8.0 (±1.8) 16.4 (±3.0) 22.5 (±3.3)	Площадь снежного покрова Ев модели СМІР6 2000–2019 гг. 2041–2060 гг. 25.7 (±3.4) 24.4 (±3.3) 25.3 (±3.2) 24.4 (±3.1) 22.4 (±2.9) 21.0 (±2.5) 16.0 (±2.3) 14.3 (±1.8) 7.8 (±1.6) 6.5 (±1.2) 1.7 (±0.7) 1.2 (±0.6) 0.4 (±0.4) 0.3 (±0.3) 0.3 (±0.3) 0.2 (± 0.3) 1.2 (±0.6) 0.7 (± 0.5) 8.0 (±1.8) 6.1 (±1.8) 16.4 (±3.0) 14.8 (± 2.7) 22.5 (±3.3) 21.2 (±3.3)	

ляется снижение скорости уменьшения площади снежного покрова во второй половине XXI века по сравнению с первой половиной. Что касается диапазона межмодельных различий, то он меняется относительно слабо в течение XXI века. Уменьшение площади снежного покрова в Евразии в XXI веке может достигать 50% в летние месяцы, когда значения S наименьшие. Согласно [Mudryk et al., 2017; Mudryk et al., 2020] выявленные особенности изменения площади снежного покрова для переходных сезонов, в частности в весенний период, также отмечаются для глобальных климатических моделей проекта СМІР5 (https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/), что может быть связано с трендами внетропических температур (см. также [Brutel-Vuilmet et al., 2013; Thackeray et al., 2016]).

В табл. 5 приведены оценки параметров чувствительности dS/dT площади снежного покрова в Евразии к изменениям приповерхностной температуры по расчетам с ансамблем глобальных климатических моделей СМІР6 для разных 20-летних периодов – 2000–2019, 2041–2060 и 2081–2100 гг. Согласно полученным оценкам скорость уменьшения площади снежного покрова в Евразии в разные месяцы не превышает 1 млн км² при увеличении приповерхностной температуры Таблица 5. Оценки параметров чувствительности dS/dT площади снежного покрова в Евразии к изменениям приповерхностной температуры по расчетам с ансамблем глобальных климатических моделей СМІР6 для разных 20-летних периодов – 2000–2019, 2041–2060 и 2081–2100 гг. В скобках приведены СКО межгодовой изменчивости. В квадратных скобках представлены соответствующие оценки S⁻¹dS/dT [%/K]

us/u1, млн. км / к				
Macquini	модели СМІР6			
месяцы	2000—2019 гг.	2041—2060 гг.	2081—2100 гг.	
Январь	-0.7 (±0.1)	-0.6 (±0.1)	-0.7 (±0.1)	
	[-3%/K]	[-3%/K]	[-3%/K]	
Февраль	-0.6 (±0.1)	-0.7 (±0.1)	-0.8 (±0.1)	
	[-2%/K]	[-3%/K]	[-3%/K]	
Март	-0.9 (±0.1)	-0.6 (±0.1)	-0.7 (±0.1)	
	[-4%/K]	[-3%/K]	[-3%/K]	
Апрель	-0.9 (±0.1)	-0.5 (±0.0)	-0.5 (±0.0)	
	[-6%/K]	[-4%/K]	[-4%/K]	
Май	-0.3 (±0.0)	-0.3 (±0.0)	-0.3 (±0.0)	
	[-4%/K]	[-5%/K]	[-5%/K]	
Июнь	-0.3 (±0.0)	-0.2 (±0.0)	-0.2 (±0.0)	
	[-18%/K]	[-19%/K]	[-19%/K]	
Июль	-0.1 (±0.0)	-0.1 (±0.0)	-0.0 (±0.0)	
	[-25%/K]	[-17%/K]	[-10%/K]	
Август	-0.0 (±0.0)	-0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	
	[-13%/K]	[-10%/K]	[0%/K]	
Сентябрь	-0.2 (±0.0)	-0.1 (±0.0)	-0.1 (±0.0)	
	[-13%/K]	[-20%/K]	[-22%/K]	
Октябрь	-0.3 (±0.0)	-0.4 (±0.0)	-0.5 (±0.0)	
	[-4%/K]	[-7%/K]	[-10%/K]	
Ноябрь	-0.7 (±0.1)	-0.6 (±0.0)	-0.6 (±0.0)	
	[-4%/K]	[-4%/K]	[-4%/K]	
Декабрь	-0.5 (±0.0)	-0.7 (±0.1)	-0.8 (±0.1)	
	[-2%/K]	[-3%/K]	[-4%/K]	

d*S*/d*T*, млн. км²/К

в Евразии на 1 К. Максимальные по абсолютной величине значения dS/dT = -0.9 млн. км² отмечены для весенних месяцев для периода 2000–2019 гг. Наименьшие по абсолютной величине значения dS/dT характерны для летних месяцев и начала осени – для сезонов с минимальными значениями *S*. При этом для этих сезонов характерны наибольшие по абсолютной величине относительные изменения $S^{-1}dS/dT$ – до -20%/K и более. Для зимних месяцев и начала весны с наибольшими значениями лощади снежного покрова в Евразии оценки $S^{-1}dS/dT$ относительно малы – около -3%/K.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа получены количественные оценки изменений площади снежного покрова S в Евразии с использованием результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей международного проекта СМІР6 при сценарии антропогенных воздействий SSP2-4.5 для XXI века. Сравнение модельных оценок с данными спутниковых наблюдений показало, что в целом по модельным расчетам адекватно воспроизводятся наблюдаемые вариации площади снежного покрова в Евразии, при этом по расчетам с отдельными моделями вариации S могут недооцениваться. Отмечено, что средние для ансамбля моделей оценки параметра чувствительности dS/dT могут быть значительно меньше по абсолютной величине, чем полученные на основе данных спутниковых наблюдений и для отдельных моделей, в частности для перехолных сезонов весной и осенью. Уменьшение по абсолютной величине полученных оценок параметра чувствительности в XXI веке связано с общим уменьшением площади снежного покрова Евразии при потеплении. При этом диапазон межмодельных различий S в холодное полугодие с ноября по апрель (более 6 млн км² в зимние месяцы) превышает диапазон межгодовых вариаций S по спутниковым данным для периода 2000-2019 гг. Согласно ансамблевым модельным расчетам, скорость сокращения площади снежного покрова в Евразии во второй половине XXI века уменьшается по сравнению с первой половиной XXI века во все сезоны. Максимальные значения скорости сокращения площади снежного покрова в Евразии характерны для переходных сезонов – осени и весны. Существенные различия проявляются для относительных изменений площади снежного покрова в разные сезоны.

Отмеченные в данной работе особенности изменений снежного покрова в связи с температурными изменениями свидетельствуют о необходимости обоснования использования средних ансамблевых модельных оценок скорости изменений площади снежного покрова Евразии. Для более надежных оценок, в частности количественных оценок взаимосвязи площади снежного покрова и температурного режима, необходим учет индивидуальных особенностей моделей с использованием, например, Байесова подхода [Парфенова и др., 2022].

Вариации площади снежного покрова в годовом ходе и межгодовой изменчивости анализировались в рамках проекта РНФ 19-17-00240. Оценки параметров чувствительности снежного покрова к приповерхностной температуре получены в рамках проекта РНФ 23-47-00104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
- *Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 351 с.
- Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001. 351 с.
- Кренке А.Н., Китаев Л.М., Турков Д.В. Климатическая роль изменений снежного покрова в периоды потеплений // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 4. С. 44–51.
- *Мохов И.И.* Температурная чувствительность площади криосферы Северного полушария // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 2. С. 136–143.
- *Мохов И.И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 271 с.
- *Мохов И.И.* Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.
- Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 78–85.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь площади снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями в Северном полушарии по данным для последних десятилетий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 411–423.
- Мохов И.И., Семенов В.А. Бимодальность функций плотности вероятности внутрисезонных вариаций приповерхностной температуры. Изв. РАН // Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 758–764.
- Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Школьник И.М., Молькентин Е.К., Семиошина А.А. Модельные оценки пространственных распределений характеристик снежного покрова и многолетнемерзлых грунтов на территории России // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 2. С. 87–97.
- Павлова Т.В., Катцов В.М., Пикалева А.А., Спорышев П.В., Говоркова В.А. Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях СМІР5: оценки современного состояния и его возможных изменений в XXI в. // Труды ГГО. 2013. Вып. 569. С. 38–61.
- Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации в арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по

расчетам с ансамблем климатических моделей // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.

- Попова В.В., Полякова И.А. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лед и снег. 2013. № 2(122). С. 29–39.
- Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лед и снег. 2010. № 1(109). С. 43–57.
- *Barry R., Gan T.Y.* The global cryosphere: past, present and future. Cambridge Univ. Press, New York, NY. 2011. 472 p.
- Bindoff N.L. et al. Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional / In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Stocker T.F.* (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge/New York, NY. 2013. P. 867–952.
- *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.
- Brutel–Vuilmet C., Ménégoz M., Krinner G. An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 67–80. https://doi.org/10.5194/tc-7-67-2013
- Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, 045204 (10 pp.)
- Connolly R., Connolly M., Soon W., Legates D.R., Cionco R.G., Herrera V.M.V. Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations // Geosciences. 2019. V. 9. № 135. P. 1–23.
- *Estilow T.W., Young A.H., Robinson D.A.* A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring // Earth Syst. Sci. Data. 2015. V. 7. P. 137–142.
- Foster J., Owe M., Rango A. Snow cover and temperature relationships in North America and Eurasia // J. Clim. Appl. Meteorol. 1983. V. 22. P. 460–469.

- Frei A., Tedesco M., Lee S. et al. A review of global satellitederived snow products // Adv. Space Res. 2012. V. 50. P. 1007–1029.
- Groisman P.Ya. et al. Climate Changes in Siberia / In: Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences (P.Ya. Groisman and G. Gutman eds.). Dordrecht: Springer, 2013. P. 57–109.
- Groisman P.Ya., Karl T.R., Knight R.W. Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere // J. Climate. 1994. V. 7. P. 1633–1656.
- Mankin J.S., Diffenbaugh N.S. Influence of temperature and precipitation variability on near-term snow trends // Clim. Dyn. 2015. V. 45(3). P. 1099–1116.
- Mudryk L., Santolaria-Otin M., Krinner G., Menegos M., Derksen C., Brutel-Vuilmet C., Brady M., Essery R. Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 2495–2514.
- 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.
- Robinson D., Dewey K., Heim R. Global snow cover monitoring: an update // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1993. V. 74. P. 1689–1696.
- Robinson, David A., Estilow, Thomas W., NOAA CDR Program (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. NOAA National Centers for Environmental Information. https://doi.org/10.7289/V5N014G9
- Santolaria-Otin M., Zolina O. Evaluation of snow cover and snow water equivalent in the continental Arctic in CMIP5 models // Clim. Dyn. 2020. V. 55. P. 2993– 3016.
- Thackeray C., Fletcher C., Mudryk L., Derksen C. Quantifying the uncertainty in historical and future simulations of Northern Hemisphere spring snow cover. J. Climate. 2016. V. 29. P. 8647–8663. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0341.1
- *Thackeray C.W., Derksen C., Fletcher C.G., Hall A.* Snow and climate: Feedbacks, drivers, and indices of change // Curr. Cli. Change Rep. 2019. V. 5. P. 322–333.

Projected Changes in the Snow Cover Extent in the 21st Century in Eurasia According to Simulations with the Ensemble of Climate Models CMIP6

M. R. Parfenova^{1, *}, M. M. Arzhanov¹, and I. I. Mokhov^{1, 2}

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia ²Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-2, Moscow, 119991 Russia *e-mail: parfenova@ifaran.ru

The analysis of changes in the snow cover extent *S* in Eurasia was performed using the results of simulations with the ensemble of global climate models of the international project CMIP6 under the scenario of anthropogenic impacts SSP2-4.5 for the 21st century. Features of *S* variability in relation to changes in surface air temperature T in different seasons are revealed by comparison of ensemble model calculations for the "historical" scenario

ПАРФЕНОВА и др.

to CDR satellite data against the background of a general decrease in the snow cover extent in Eurasia during the contemporary warming. It is noted that the multimodel ensemble mean estimates of the sensitivity parameter dS/dT for the transitional seasons in spring and autumn can be significantly lower in absolute values than those for the individual models and those derived from the satellite data. Comparison of model estimates with satellite observation data showed that the models generally reproduce the observed variations in the snow cover area in Eurasia, while variations in the area may be underestimated for individual models. According to ensemble model calculations, the rate of snow cover reduction in Eurasia in the second half of the XXI century decreases compared to the first half of the XXI century for all seasons. At the same time, the maximum values of snow cover extent reduction rate in Eurasia are inherent in transitional seasons – autumn and spring.

Keywords: snow cover extent and surface air temperature changes, satellite data, reanalysis, climate models, CMIP6