

УДК 551.511

БАЙЕСОВЫ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЕВРАЗИИ В XXI ВЕКЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТОВ С АНСАМБЛЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ CMIP6

© 2024 г. М. М. Аржанов^{1,*}, академик РАН И. И. Мохов^{1,2}, М. Р. Парфенова¹

Поступило 28.08.2023 г.

После доработки 22.09.2023 г.

Принято к публикации 25.09.2023 г.

На основе результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP6 получены количественные оценки изменений площади снежного покрова в Евразии в XXI в. при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 антропогенных воздействий с использованием байесова подхода. При этом вклад (вес) моделей в общие ансамблевые оценки определялся степенью воспроизведения многолетнего среднего тренда и межгодовой изменчивости площади снежного покрова в Евразии по спутниковым данным. Наибольшие межмодельные различия оценок, увеличивающиеся для летних и осенних месяцев, связаны с описанием трендовой составляющей и межгодовой изменчивости (дисперсии) площади снежного покрова Евразии, а также при равновзвешенном осреднении. Показано, что при использовании байесовых весов неопределенность оценок площади снежного покрова может быть уменьшена вдвое по сравнению с ансамблевым средним при равных весах моделей. Полученные ансамблевые оценки площади снежного покрова с использованием комбинированных байесовых весов превышают соответствующие оценки при равновзвешенном осреднении.

Ключевые слова: площадь снежного покрова, глобальные климатические модели, спутниковые данные, байесово осреднение

DOI: 10.31857/S2686739724010198

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров оказывает значительное влияние на свойства земной поверхности, а также с учетом обратных связей на формирование региональных и глобальных климатических режимов на временных масштабах от нескольких месяцев до миллионов лет [1–4]. Диапазон внутригодовых вариаций площади снежного покрова на Земле существенно больше, чем для морских льдов. Уменьшение альбедо поверхности в связи с уменьшением площади снежного покрова приводит к увеличению поглощения солнечной радиации в климатической системе с усилением положительной обратной связи. Изменения характеристик снежного покрова, в том числе высоты и продолжительности залегания, также влияют на термический и гидрологический режимы на поверхности и для деятельного слоя суши [5, 6].

Результаты расчетов с климатическими моделями и данные наблюдений показывают отрицательные тренды площади снежного покрова в Северном полушарии в конце XX – начале XXI вв., которые могут достигать $-50 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ и более [7, 8]. Анализ среднемесячных спутниковых данных NOAA CDR (Climate Data Records) (<https://climate.rutgers.edu/snowcover/>, <https://www.ncdc.noaa.gov/>) [9], данных реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) [10] и результатов расчетов с глобальными климатическими моделями международного проекта CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) выявил сезонные особенности изменения площади снежного покрова при изменениях приповерхностной температуры. Так, по данным спутниковых наблюдений и результатам расчетов, для большинства месяцев получены статистически значимые отрицательные значения параметра температурной чувствительности площади снежного покрова [11, 12]. При этом для площади снежного покрова в Евразии в октябре и ноябре по спутниковым данным CDR для последних десятилетий отмечена положительная величина параметра температурной чувствительности [11, 13],

¹Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: arzhanov@ifaran.ru

не выявленная по расчетам с глобальными климатическими моделями [12, 14]. Также отмечается, что модельные оценки как современных, так и прогнозируемых в будущем изменений характеристик снежного покрова демонстрируют значительный разброс [12, 14, 15]. Неопределенность этих оценок может быть связана как с естественной климатической изменчивостью, так и с выбором сценария антропогенных воздействий, а также с особенностями описания физических процессов в численных схемах климатических моделей. Анализ изменений площади снежного покрова в зависимости от изменений приповерхностной температуры для конца XX – начала XXI вв. на основе результатов расчетов с глобальными климатическими моделями показал, что средние по ансамблю моделей оценки могут быть значительно меньше по абсолютной величине, чем полученные на основе спутниковых данных наблюдений и для отдельных моделей [12]. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости использования ансамблевых модельных оценок с учетом индивидуальных особенностей моделей, чтобы уменьшить влияние менее реалистичных членов ансамбля. В частности, взаимно некоррелированные компоненты межмодельных вариаций могут быть исключены при использовании байесова подхода с учетом индивидуальных весов моделей [16–19].

В данной работе представлены оценки изменений площади снежного покрова в Евразии на

основе расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей при разных сценариях антропогенных воздействий в XXI в. с использованием байесова осреднения в сопоставлении со спутниковыми данными.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Анализировались результаты расчетов с глобальными климатическими моделями международного проекта CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) (табл. 1) при сценарии “historical”, а также при сценариях с умеренными (SSP2-4.5) и более агрессивными (SSP5-8.5) антропогенными воздействиями для трех периодов: 2000–2019 гг., 2041–2060 гг. и 2081–2100 гг. Средние для ансамбля моделей значения площади снежного покрова определялись двумя способами: с присвоением всем моделям одинакового веса $W^{(k)} = W_0 = 1/N$, где N – количество моделей в ансамбле (арифметическое межмодельное среднее), $k = 1, N$ – номер модели и с вычислением индивидуальных весов в зависимости от того, насколько хорошо модель воспроизводит эталонные данные D – спутниковые данные наблюдений (байесов подход) [17–19]: $E(S|D) = \sum_k S^{(k)} W^{(k)}$, где $S^{(k)}$ – значение площади снежного покрова для модели с номером k . Для байесовых средних рассчитывалось межмодельное стандартное отклонение $\sigma(S|D) = \{\sum_k [(\sigma^{(k)})^2 + (S^{(k)})^2] W^{(k)} - E(S|D)^2\}^{1/2}$, где $\sigma^{(k)}$ – межгодовое среднеквадратическое отклонение площади $S^{(k)}$.

Таблица 1. Глобальные климатические модели ансамбля CMIP6, результаты расчетов с которыми использовались в данной работе.

Номер	Модель	Пространственное разрешение (количество ячеек по долготе и по широте)
1	BCC-CSM2-MR	T106 (320 x 160)
2	CanESM5	T42 (128 x 64)
3	CMCC-ESM2	(288 x 192)
4	CNRM-ESM2-1	T85 (256 x 128)
5	EC-Earth3-Veg-LR	TL159(320 x 160)
6	FGOALS-f3-L	(360 x 180)
7	FGOALS-g3	(180 x 80)
8	IPSL-CM6A-LR	(144 x 142)
9	MIROC6	T85 (256 x 128)
10	MPI-ESM1-2-HR	T127(384 x 192)
11	MPI-ESM1-2-LR	T63 (192 x 96)
12	MRI-ESM2-0	T106 (320 x 160)
13	NorESM2-LM	(144 x 96)
14	NorESM2-MM	(288 x 192)
15	TaiESM1	(288 x 192)
16	UKESM1-0-LL	(192 x 144)

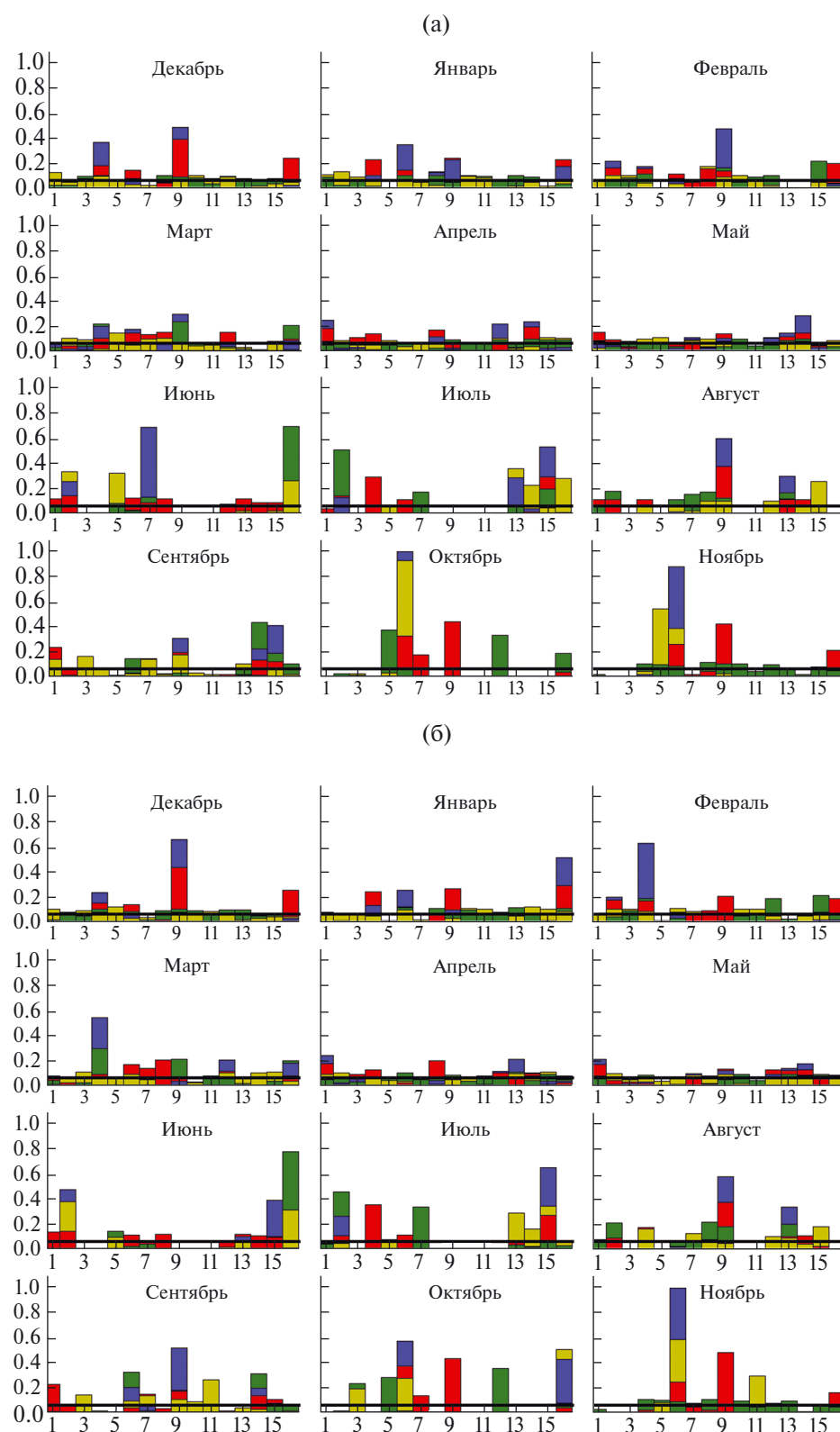


Рис. 1. Нормированные байесовы веса моделей ансамбля CMIP6 (номера моделей см. табл. 1): W_1 (красный), W_2 (оранжевый), W_3 (зеленый) и W_4 (синий) для площади снежного покрова в Евразии в 2000–2019 гг. при сценариях “historical” и SSP2-4.5 (а) и “historical” и SSP5-8.5 (б). Горизонтальная линия соответствует весу $W_0 = 1/N$, N – количество моделей в ансамбле.

Для определения соответствующих байесовых весов использовались результаты модельных расчетов для периода 2000–2014 гг. в соответствии со сценарием “historical”, для 2015–2019 гг. — при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. В качестве эталонных данных для площади снежного покрова Евразии использовались среднемесячные спутниковые данные CDR (<https://climate.rutgers.edu/snowcover/>) для периода 2000–2019 гг. Для каждой модели вес определялся функцией правдоподобия при сравнении с эталонными данными [17]. Функция правдоподобия считалась нормально распределенной с соответствующим средним и среднеквадратическим отклонением [17, 18]. Качество моделей характеризовалось байесовыми весами W_i ($i = 1, 4$) — для среднего многолетнего значения (W_1), линейного тренда (W_2) и среднеквадратического отклонения для межгодовой изменчивости (W_3) площади снежного покрова Евразии, а также их произведением ($W_4 = W_1 W_2 W_3$), характеризующим общее качество воспроизведения площади снежного покрова в модельных расчетах. Для каждого веса W_i рассчитывалась нормированная информационная энтропия, характеризующая общую согласованность ансамбля моделей (максимальное значение, равное 1, соответствует наибольшей взаимной согласованности моделей) [19]: $H_i = -(\sum_k W_i^{(k)} \log_2 W_i^{(k)}) / \log_2 N$, $i = 1, 4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены нормированные байесовы веса моделей, определенные по степени соответствия спутниковым данным CDR для площади снежного покрова в Евразии для периода 2000–2019 гг. при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Для зимнего и весеннего сезонов распределение весов, характеризующих трендовую составляющую (W_2) и межгодовую изменчивость (W_3) площади снежного покрова, более однородно по сравнению с весом, характеризующим многолетнее среднее (W_1) при обоих сценариях, и близко по абсолютной величине к весу W_0 . Для этих сезонов максимальные значения энтропии для веса W_2 составляют 0.95 в апреле и декабре при сценарии SSP2-4.5 и 0.96 в мае при сценарии SSP5-8.5. Для веса W_3 максимальные значения энтропии составляют 0.98 в мае и 0.96 в апреле при сценариях SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно. Для летних и осенних месяцев распределение модельных весов W_2 и W_3 более неоднородное по сравнению с зимним и весенним сезонами. Минимальные значения информационной энтропии получены в летний сезон для июня и составляют для весов W_2 и W_3 соответственно 0.50 и 0.55 при сценарии SSP2-4.5 и 0.36 и 0.27 при

сценарии SSP5-8.5. Распределение веса W_1 наиболее однородно в весенний сезон, наибольшее значение энтропии для этого веса составляет 0.83 и получено для мая при обоих сценариях. Для комбинированного веса W_4 значения нормированной информационной энтропии максимальны в весенние месяцы и составляют 0.78 в мае при сценарии SSP2-4.5 и в апреле при SSP5-8.5.

Согласно полученным результатам, для 2 моделей выявлены большие по сравнению с остальными значения комбинированного веса W_4 , характеризующего общее качество воспроизведения среднего режима площади снежного покрова Евразии и ее изменений: FGOALS-f3-L и MIROC6. Модели с относительно низким пространственным разрешением (IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR, NorESM2-LM) в целом характеризуются относительно малыми байесовыми весами. Подобный вывод согласуется с результатами, полученными в [18]. В [18] при анализе ансамблевых модельных расчетов отмечено отсутствие значимого влияния модельного разрешения на качество воспроизведения составляющих гидрологического цикла, в том числе осадков и стока. Это может быть связано с относительно слабыми трендами и значительной межгодовой изменчивостью анализируемых переменных. В частности, согласно [20], для режимов приповерхностной температуры с существенным трендом неопределенность оценок может уменьшаться с увеличением пространственного разрешения моделей.

С использованием полученных весов для разных моделей проанализировано влияние критерия отбора моделей внутри ансамбля на результаты осреднения. Согласно спутниковым данным, площадь снежного покрова в Евразии максимальна в январе и составляет 30.1 ± 1.1 млн км² для периода 2000–2019 гг. Оценки площади снежного покрова, полученные с использованием веса W_1 (и с комбинированным весом W_4), наиболее близки к полученным на основе спутниковых данных для начала XXI в. и составляют для января 29.5 ± 1.6 млн км² (29.4 ± 1.6 млн км²) при сценарии SSP2-4.5 и 29.5 ± 1.5 млн км² (29.4 ± 1.3 млн км²) при сценарии SSP5-8.5. Полученные оценки площади снежного покрова и внутриансамблевые среднеквадратические отклонения (СКО) для всех месяцев для начала, середины и конца XXI в., а также оценки площади по спутниковым данным для начала XXI в. приведены в табл. 2 и табл. 3. Площадь снежного покрова в Евразии в XXI в., рассчитанная с использованием весов W_2 и W_3 близка к ансамблевому среднему с весом W_0 . Эти оценки более низкие по сравнению с полученными

по данным наблюдений, в частности, для января ансамблевое среднее для начала XXI в. при использовании W_0 составляет 26.9 ± 4.5 млн км² при сценарии SSP2-4.5 и 26.8 ± 4.4 млн км² при сценарии SSP5-8.5 в начале XXI в. Для летних месяцев модельные оценки площади с учетом весов W_0 , W_2 и W_3 превышают полученные по данным наблюдений значения, а оценки с учетом веса W_1 и комбинированного веса W_4 близки к данным наблюдений. Так, в начале XXI в. для июля значение площади, оцененной с учетом весов W_1 и W_4 одинаково и составляет 0.4 ± 0.2 млн км² при обоих сценариях, что согласуется с данными наблюдений 0.3 ± 0.2 млн км² (табл. 2). Более низкие модельные ансамблевые средние значения площади снежного покрова в 1970–2014 гг. для Евразии, а также

для Северной Америки по сравнению с данными наблюдений в периоды с октября по декабрь и с января по март для моделей проекта CMIP5 получены также в [8]. При этом в [8] отмечается улучшение качества воспроизведения наблюдаемых значений площади снежного покрова в Северном полушарии в осенний и зимний сезоны по результатам расчетов с моделями проекта CMIP6.

Для всех месяцев получены значимые на уровне 0.05 отрицательные значения тренда площади снежного покрова в Евразии в XXI в. при обоих сценариях. Тренд площади снежного покрова в Евразии в XXI в. максимален по абсолютной величине осенью и составляет при сценарии SSP2-4.5 — 42×10^3 км² год⁻¹ при учете веса

Таблица 2. Средние значения и внутриансамблевые среднеквадратические отклонения значений площади снежного покрова S (млн км²) в Евразии для периода 2000–2019 гг. по расчетам с моделями ансамбля CMIP6 при сценариях SSP2-4.5 (верхняя строка) и SSP5-8.5 (нижняя строка) и байесовом осреднении с весами W_1 , W_2 , W_3 и комбинированным весом W_4 , а также с равными весами W_0 в сопоставлении с соответствующими средними значениями и среднеквадратическими отклонениями в межгодовой изменчивости по спутниковым данным CDR для разных месяцев.

Месяц	Данные CDR	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4
январь	30.1 ± 1.1	26.9 ± 4.5	29.5 ± 1.6	25.8 ± 4.4	25.2 ± 4.1	29.4 ± 1.6
		26.8 ± 4.4	29.5 ± 1.5	25.2 ± 4.3	26.0 ± 4.0	29.4 ± 1.3
февраль	28.8 ± 1.5	26.5 ± 4.3	28.5 ± 1.3	25.8 ± 3.9	25.8 ± 3.9	29.0 ± 1.4
		26.4 ± 4.3	28.4 ± 1.3	25.0 ± 4.1	25.7 ± 3.5	28.6 ± 1.5
март	24.2 ± 1.5	23.4 ± 4.2	24.5 ± 1.4	24.6 ± 5.1	24.0 ± 3.0	24.9 ± 1.6
		23.3 ± 4.2	24.4 ± 1.4	22.9 ± 4.1	23.8 ± 3.2	24.6 ± 1.6
апрель	16.6 ± 1.0	17.1 ± 3.9	16.7 ± 1.7	17.9 ± 4.1	17.2 ± 3.8	17.1 ± 1.6
		17.0 ± 3.9	16.7 ± 1.8	16.7 ± 3.6	17.1 ± 4.0	16.6 ± 1.8
май	8.9 ± 1.0	9.1 ± 3.5	8.9 ± 1.4	10.0 ± 4.0	8.9 ± 3.7	8.7 ± 1.4
		9.0 ± 3.6	8.7 ± 1.5	9.2 ± 2.9	8.6 ± 3.3	8.6 ± 1.4
июнь	2.5 ± 1.0	2.8 ± 2.6	2.6 ± 0.6	6.4 ± 4.0	5.8 ± 2.4	2.8 ± 0.6
		2.8 ± 2.7	2.6 ± 0.6	4.6 ± 3.1	6.8 ± 2.5	2.7 ± 0.8
июль	0.3 ± 0.2	0.7 ± 0.8	0.4 ± 0.2	0.9 ± 0.8	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.2
		0.7 ± 0.9	0.4 ± 0.2	0.8 ± 0.9	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.2
август	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.8	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.5	0.5 ± 0.4	0.1 ± 0.1
		0.5 ± 0.8	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.1 ± 0.1
сентябрь	1.6 ± 0.6	2.1 ± 2.4	1.5 ± 0.5	1.4 ± 1.2	2.1 ± 2.0	1.4 ± 0.5
		2.1 ± 2.4	1.5 ± 0.5	1.4 ± 1.2	2.1 ± 1.6	1.7 ± 0.6
октябрь	11.3 ± 1.6	9.3 ± 4.0	11.2 ± 1.3	11.5 ± 2.3	14.5 ± 6.3	11.3 ± 1.1
		9.3 ± 4.0	11.1 ± 1.3	12.3 ± 3.8	12.0 ± 6.6	12.7 ± 2.5
ноябрь	21.2 ± 1.3	17.8 ± 4.6	20.9 ± 1.7	25.7 ± 5.6	18.6 ± 5.3	20.1 ± 1.3
		17.7 ± 4.6	20.6 ± 1.6	18.1 ± 5.8	18.3 ± 5.4	20.0 ± 1.2
декабрь	27.4 ± 1.1	23.9 ± 4.7	27.1 ± 1.5	23.4 ± 5.2	23.1 ± 3.5	26.8 ± 1.4
		23.8 ± 4.7	27.1 ± 1.5	24.1 ± 5.9	23.0 ± 3.8	27.0 ± 1.3

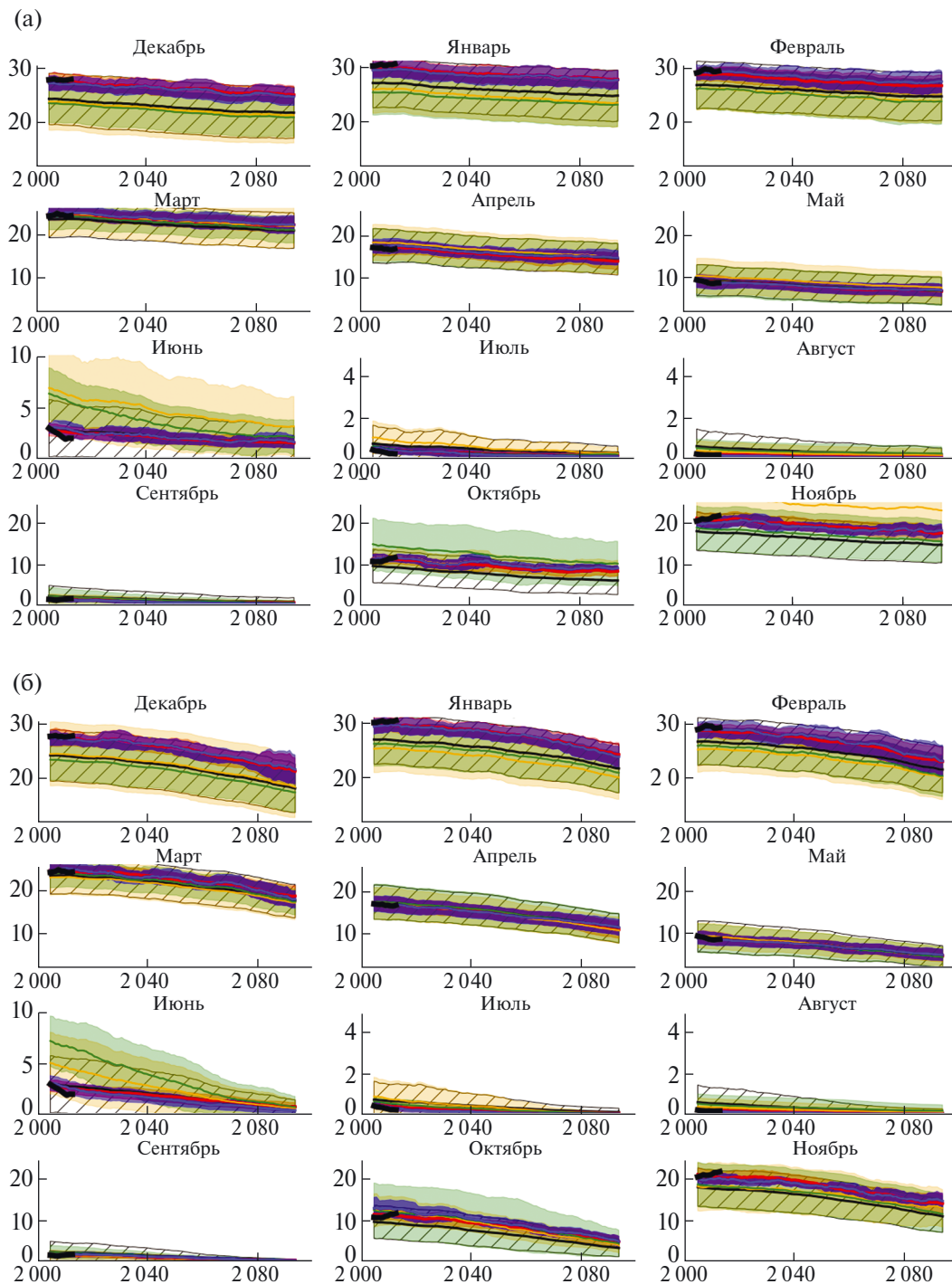


Рис. 2. Изменения площади снежного покрова (млн км²) в Евразии (скользящие 11-летние средние) для разных месяцев по расчетам с ансамблем климатических моделей и соответствующие внутриансамблевые СКО площади снежного покрова (млн км²) в Евразии в XXI в. для разных месяцев, полученные при сценариях SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б) с использованием разных байесовых весов: W₁ (красный), W₂ (оранжевый), W₃ (зеленый), W₄ (синий), а также равновзвешенные с весом W₀ (черный, штриховка) в сопоставлении со спутниковыми данными CDR (жирная черная кривая).

Таблица 3. Средние значения и внутриансамблевые среднеквадратические отклонения значений площади снежного покрова (млн км²) в Евразии для 2041–2060 гг. и 2081–2100 гг. по расчетам с моделями ансамбля CMIP6 при сценариях SSP2-4.5 (верхняя строка) и SSP5-8.5 (нижняя строка) и байесовом осреднении с весами W_1 , W_2 , W_3 и комбинированным весом W_4 , а также с равными весами W_0 для разных месяцев.

2041–2060 гг.					
Месяц	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4
январь	25.5±4.5	28.4±1.6	24.3±4.3	23.9±3.9	28.2±1.7
	25.1±4.6	28.1±1.5	23.5±4.4	24.4±4.0	28.0±1.5
февраль	25.4±4.3	27.1±1.7	24.6±3.9	24.5±3.9	27.7±1.8
	24.9±4.3	26.8±1.8	23.5±4.1	24.0±3.6	27.2±2.1
март	21.9±4.0	23.1±1.6	23.0±5.1	22.5±2.9	23.3±1.7
	21.4±4.0	22.5±1.6	21.0±4.1	21.7±3.1	22.7±1.8
апрель	15.4±3.6	15.0±1.5	16.0±4.0	15.5±3.6	15.4±1.5
	14.9±3.6	14.5±1.5	14.4±3.4	14.9±3.8	14.4±1.6
май	7.7±3.4	7.5±1.4	8.6±4.0	7.7±3.6	7.5±1.3
	7.2±3.2	7.0±1.2	7.2±2.6	6.9±2.9	7.0±1.2
июнь	2.0±2.1	1.9±0.6	4.3±3.6	3.0±2.1	2.0±0.6
	1.7±2.0	1.6±0.6	2.3±2.4	3.1±2.6	1.3±0.6
июль	0.4±0.5	0.2±0.1	0.5±0.5	0.2±0.2	0.2±0.1
	0.3±0.5	0.2±0.1	0.3±0.5	0.2±0.1	0.1±0.1
август	0.3±0.5	0.1±0.1	0.2±0.4	0.3±0.4	0.0±0.1
	0.2±0.4	0.1±0.1	0.2±0.3	0.3±0.4	0.0±0.0
сентябрь	1.3±1.7	0.9±0.5	0.8±0.8	1.1±1.1	0.7±0.4
	1.0±1.4	0.7±0.5	0.7±0.7	1.0±0.7	0.9±0.4
октябрь	7.4±3.8	9.4±1.5	10.4±2.3	12.1±6.3	10.4±1.3
	6.7±3.6	8.6±1.2	8.4±2.6	9.1±6.3	9.2±1.3
ноябрь	16.1±4.5	19.2±1.6	24.2±5.5	17.0±5.2	18.8±1.2
	15.4±4.5	18.3±1.6	16.4±5.6	16.3±5.3	18.1±1.0
декабрь	22.4±4.8	25.9±1.6	21.9±5.3	21.6±3.7	25.9±1.6
	21.9±4.7	25.4±1.5	22.3±6.0	21.2±3.7	25.4±1.4
2081–2100 гг.					
январь	24.6±4.7	27.7±1.6	23.3±4.4	23.0±4.1	27.5±1.7
	21.9±4.5	24.5±2.3	20.3±4.1	21.2±3.7	24.1±2.2
февраль	24.4±4.5	26.3±1.9	23.6±4.1	23.5±4.1	27.0±2.1
	21.7±4.3	23.0±2.6	20.3±4.1	20.5±3.7	23.2±2.9
март	20.8±4.1	22.0±1.8	21.9±5.2	20.9±3.0	22.1±1.9
	17.8±3.9	18.9±2.4	17.5±4.0	17.7±3.1	18.5±2.3
апрель	14.2±3.6	13.8±1.8	14.7±4.0	14.4±3.5	14.5±1.7
	11.4±3.4	11.1±2.0	10.9±3.1	11.5±3.5	11.6±1.9
май	6.7±3.1	6.7±1.4	7.5±3.7	6.7±3.3	6.8±1.4
	4.7±2.6	4.9±1.4	4.7±2.3	4.6±2.4	5.0±1.3
июнь	6.7±3.1	6.7±1.4	7.5±3.7	6.7±3.3	6.8±1.4
	4.7±2.6	4.9±1.4	4.7±2.3	4.6±2.4	5.0±1.3

Окончание таблицы 3

2081–2100 гг.					
Месяц	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4
июль	0.3 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.3	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1
	0.1 ± 0.2	0.1 ± 0.1	0.0 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.0 ± 0.0
август	0.2 ± 0.3	0.0 ± 0.0	0.2 ± 0.3	0.2 ± 0.3	0.0 ± 0.0
	0.1 ± 0.2	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.2	0.2 ± 0.3	0.0 ± 0.0
сентябрь	0.8 ± 1.1	0.6 ± 0.4	0.5 ± 0.6	0.6 ± 0.7	0.4 ± 0.3
	0.3 ± 0.3	0.2 ± 0.3	0.2 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.2 ± 0.3
октябрь	6.1 ± 3.4	8.3 ± 1.3	9.0 ± 1.9	10.1 ± 5.5	9.0 ± 0.9
	3.5 ± 2.3	5.0 ± 1.5	4.4 ± 2.0	4.7 ± 3.8	5.4 ± 1.4
ноябрь	14.8 ± 4.4	17.8 ± 2.0	23.3 ± 5.4	15.7 ± 5.1	18.2 ± 1.5
	11.2 ± 4.0	14.0 ± 2.2	13.1 ± 4.7	11.9 ± 4.7	14.7 ± 1.8
декабрь	21.4 ± 4.7	24.8 ± 1.7	21.0 ± 5.2	20.6 ± 3.6	24.6 ± 1.8
	18.2 ± 4.6	21.3 ± 2.5	18.5 ± 5.8	17.4 ± 3.6	21.5 ± 2.6

W_0 и $-53 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ при учете веса W_3 в октябре. При сценарии SSP5–8.5 значения тренда составляют $-80 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ при учете веса W_0 в ноябре и $-101 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ при учете веса W_2 в октябре. Тренд площади снежного покрова Евразии, оцененной с учетом комбинированного веса W_4 , максимален по абсолютной величине в апреле ($-34 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$) при сценарии SSP2–4.5 и в октябре ($-91 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$) при сценарии SSP5–8.5. Наименьшие значения тренда площади получены для летнего сезона при расчете с байесовыми весами и при равновзвешенном осреднении. Полученные оценки тренда для августа при сценарии SSP2–4.5 составляют $-4 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ и $1 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ при учете весов W_0 и W_4 , соответственно. При сценарии SSP5–8.5 значения тренда для августа составляют $-6 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ и $-2 \times 10^3 \text{ км}^2 \text{ год}^{-1}$ при учете весов W_0 и W_4 соответственно.

Наиболее существенное относительное уменьшение площади снежного покрова в Евразии к концу XXI в. относительно 2000–2019 гг. получено для летнего и осеннего сезонов. При сценариях SSP2–4.5 (SSP5–8.5) к концу XXI в. уменьшение площади составляет 60% (86%) в августе и сентябре при равновзвешенном осреднении и достигает 100% в августе при оценках при учете веса W_1 и комбинированного веса W_4 , когда по результатам расчетов с моделями снежный покров в Евразии полностью исчезает при обоих сценариях. Результаты согласуются с оценками 50–89% для периода с июля по сентябрь, полученными в [8]. В зимний сезон относительное уменьшение

площади снежного покрова в Евразии при обоих сценариях максимально в декабре и составляет 10% при учете веса W_0 и 8% при учете веса W_1 и комбинированного веса W_4 при сценарии SSP2–4.5, увеличиваясь до 24% при учете веса W_0 и 20% при учете веса W_1 и комбинированного веса W_4 при сценарии SSP5–8.5.

При учете весов W_1 и W_4 получены наименьшие значения внутриансамблевого среднеквадратического отклонения площади снежного покрова в Евразии в зимний и весенний сезоны по сравнению с оценками с учетом весов W_2 и W_3 , а также с учетом веса W_0 . Для зимних сезонов в 2000–2019 гг. внутриансамблевое СКО при байесовом осреднении с весом W_1 составляет 1.3–1.6 млн км^2 в зависимости от сценария. Это сопоставимо с интервалом межгодовой изменчивости площади снежного покрова в Евразии по данным наблюдений (1.1–1.5 млн км^2) для этого периода (табл. 2). В летние месяцы внутриансамблевые байесовы СКО площади снежного покрова в Евразии, рассчитанной с использованием веса W_1 и комбинированного веса W_4 , также меньше соответствующих СКО при осреднении с весом W_0 . Для октября и ноября в начале XXI в. по спутниковым данным на фоне общего сокращения площади снежного покрова в Евразии было отмечено увеличение площади, которое не проявляется по расчетам с климатическими моделями проекта CMIP6 (рис. 2) при рассматриваемых сценариях, а также с моделями проекта CMIP5 [8] (см. также [11, 12, 15]). В середине XXI в. значения СКО при учете веса W_1 (и комбинированного веса W_4)

примерно одинаковы для всех месяцев при обоих сценариях. В конце XXI в. для зимних месяцев межмодельный разброс увеличивается, при сценарии SSP5–8.5 при учете весов W_1 и W_4 СКО почти в полтора раза превышает соответствующие значения при сценарии SSP2–4.5.

Согласно полученным результатам, при использовании байесова осреднения с учетом весов W_1 и W_4 неопределенность оценок площади снежного покрова в Евразии может быть уменьшена почти вдвое по сравнению с равновзвешенным ансамблевым средним. При обоих сценариях SSP2–4.5 и SSP5–8.5 в случае использования байесова осреднения наибольшие межмодельные различия связаны с учетом трендовой составляющей и межгодовой изменчивости площади снежного покрова Евразии. При учете комбинированного веса W_4 максимальное значение площади снежного покрова в Евразии в январе может уменьшиться к концу XXI в. относительно его начала на 1.9 млн км² при сценарии SSP2–4.5 и на 5.3 млн км² при SSP5–8.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ количественных оценок площади снежного покрова в Евразии и ее изменений по расчетам с ансамблем глобальных климатических моделей в рамках международного проекта CMIP6 в сопоставлении со спутниковыми данными CDR для периода 2000–2019 гг. с использованием байесова подхода. Учитывалась степень воспроизведения в модельных расчетах многолетнего среднего, трендовой составляющей и межгодовой изменчивости площади снежного покрова в Евразии. На основе результатов расчетов с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP6 получены количественные оценки изменений площади снежного покрова в Евразии в XXI в. при сценариях антропогенных воздействий SSP2–4.5 и SSP5–8.5. Наибольшие межмодельные различия оценок, увеличивающиеся для летних и осенних месяцев, связаны с воспроизведением трендовой составляющей и межгодовой изменчивости (дисперсии) площади снежного покрова Евразии, а также при равновзвешенном осреднении. Получено, что при использовании байесовых весов неопределенность оценок площади снежного покрова может быть уменьшена вдвое по сравнению с ансамблевым средним при равных весах моделей. Полученные ансамблевые оценки площади снежного покрова с использованием комбинированных байесовых весов превышают соответствующие оценки при равновзвешенном осреднении.

Наибольшие межмодельные различия оценок, увеличивающиеся в летние и осенние месяцы получены при учете трендовой составляющей и межгодовой изменчивости площади снежного покрова Евразии, а также при равновзвешенном осреднении. Получено, что модели с более низким пространственным разрешением в целом характеризуются относительно малыми байесовыми весами. Оценки информационной энтропии свидетельствуют о более высокой согласованности модельных расчетов в воспроизведении средних значений, трендовой составляющей и межгодовой изменчивости площади снежного покрова в Евразии в весенний период. Получено, что при использовании байесова осреднения ансамблевые модельные оценки площади снежного покрова Евразии при сценариях SSP2–4.5 и SSP5–8.5 выше соответствующих оценок при равновзвешенном осреднении. При этом неопределенность оценок площади снежного покрова может быть уменьшена почти вдвое по сравнению с рассчитанной для равновзвешенного ансамблевого среднего. Согласно полученным результатам, максимальное значение площади снежного покрова в Евразии в январе к концу XXI в. относительно его начала уменьшится на 1.8 млн км² при сценарии SSP2–4.5 и на 4 млн км² при SSP5–8.5. В летние месяцы относительное уменьшение площади снежного покрова к концу XXI в. максимально и составляет 60–86% в зависимости от сценария при равновзвешенном осреднении, а в августе может достигать 100% при оценках с байесовыми весами.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ 19-17-00240 с использованием результатов, полученных в рамках соглашения № 075-15-2021-577 Министерства науки и высшего образования РФ с ИФА им. А.М. Обухова РАН. Статистический анализ данных был проведен в рамках проекта РНФ № 23-47-00104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
2. Мохов И. И. Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 271 с.
3. Кислов А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 351 с.

4. Barry R., Gan T.Y. The global cryosphere: past, present and future. Cambridge Univ. Press, New York, NY. 2011. 472 p.
5. Мохов И.И. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в условиях глобального потепления // ДАН. 2014. Т. 455. № 5. С. 585–588.
6. McCrystall M.R., Stroeve J., Serreze M., Forbes B.C., Screen J. New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. // Nat Commun. 2021. V. 12. P. 6765–6777.
7. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // Nature Clim Change. 2018. V. 8. P. 924–928.
8. Zhu X., Lee S.-Y., Wen X., Wei Z., Ji Z., Zheng Z., Dong W. Historical evolution and future trend of Northern Hemisphere snow cover in CMIP5 and CMIP6 models // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 065013.
9. Robinson D.A., Estilow T.W., and NOAA CDR Program. NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. NOAA National Centers for Environmental Information. 2012. doi: 10.7289/V5N014G9.
10. Hersbach H., Bell D., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janiskova M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // Q. J.R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146A (730). P. 1999–2049.
11. 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.
12. Парфенова М.Р., Аржанов М.М., Мохов И.И. Изменения площади снежного покрова в Евразии в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 299–308.
13. Brown R.D., Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing? // Environ. Res. Lett. 2013. V. 8. № 2. P. 1–7.
14. 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.
15. 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.
16. Елизеев А.В. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
17. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // Global and Planetary Change. 2012. V. 57–65. P. 57–65.
18. Лунавский А.С., Елизеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 64–82.
19. Парфенова М.Р., Елизеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации 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.
20. Lehner F., Deser C., Maher N., Marotzke J., Fischer E.M., Brunner L., Knutti R., Hawkins E. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6 // Earth Syst. Dyn. 2020. V. 11. № 2. P. 491–508.

BAYESIAN ESTIMATES OF SNOW COVER AREA IN EURASIA IN THE 21ST CENTURY BASED ON THE RESULTS OF CALCULATIONS WITH THE CMIP6 ENSEMBLE OF CLIMATE MODELS

M. M. Arzhanov^{a, #}, Academician of the RAS I. I. Mokhov^{a, b}, M. R. Parfenova^a

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: arzhanov@ifaran.ru*

Based on the results of calculations with the ensemble of global climate models CMIP6, quantitative estimates of changes in the area of snow cover in Eurasia in the 21st century were obtained under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 of anthropogenic impacts using the Bayesian averaging. The contribution (weight) of the models to the overall ensemble estimates was determined by accuracy of reproduction of the long-term average, trend, and interannual variability of the snow cover area in Eurasia by satellite data. The largest inter-model variations in estimates, the most significant of which were calculated for the summer and autumn months, are associated with the description of the trend component and interannual variability of the snow cover area of Eurasia, as well as with equally weighted averaging. It is shown that when using Bayesian weights, the uncertainty of snow cover area estimates can be halved compared to the ensemble average with equal model weights. The obtained ensemble estimates of the snow cover area using combined Bayesian weights exceed the corresponding estimates for equally weighted averaging.

Keywords: snow cover area, global climate models, satellite data, Bayesian averaging