### ——— КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ———

УДК 551.583

# ЦЕНТРЫ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В 21 ВЕКЕ ПО РАСЧЕТАМ С АНСАМБЛЯМИ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СМІР5 И СМІР6

© 2022 г. Академик РАН И. И. Мохов<sup>1,2,\*</sup>, А. М. Осипов<sup>2</sup>, А. В. Чернокульский<sup>1</sup>

Поступило 17.06.2022 г. После доработки 26.08.2022 г. Принято к публикации 28.08.2022 г.

Региональные особенности глобальных климатических изменений существенно связаны с режимами центров действия атмосферы (ЦДА) и их изменчивостью. Проведен анализ ожидаемых изменений ЦДА в Северном полушарии по расчетам с ансамблями современных климатических моделей международных проектов CMIP5 и CMIP6 при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в 21 веке. Наиболее согласованные оценки по расчетам с ансамблями моделей СМІР5 и СМІР6 получены для тенденций ослабления зимнего Североамериканского максимума и летнего Азиатского минимума. Для зимнего Сибирского максимума тенденция ослабления получена более значимой по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР6. При сравнительном анализе ЦДА, детектированных по модельным расчетам и по данным реанализа ERA5, в частности для базового периода 1981–2005 гг., отмечено, что в целом, как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, интенсивность субтропических антициклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами для летних сезонов больше, чем для зимних. Для интенсивности субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами отмечено обратное – их интенсивность в целом больше для зимних сезонов, чем для летних. При этом межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА, характеризуемая среднеквадратическим отклонением, в зимние сезоны в целом больше, чем в летние

*Ключевые слова:* центры действия атмосферы, моделирование, реанализ, климатические изменения, CMIP5, CMIP6, атмосферное давление

**DOI:** 10.31857/S2686739722601806

## введение

Ключевыми крупномасштабными структурными образованиями в атмосфере земной климатической системы являются так называемые центры действия атмосферы (ЦДА), в том числе квазипостоянные субтропические антициклонические и субполярные циклонические образования над океаном, сезонные образования над континентами с минимумом в поле приповерхностного давления летом и максимумом зимой. ЦДА четко проявляются в среднемесячных и сезонных рас-

Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия пределениях приповерхностного давления и отражают достаточно устойчивые особенности общей циркуляции атмосферы [1].

В Северном полушарии (СП) в поле давления над океанами выделяются Алеутский и Исландский циклонические ЦДА в субарктических широтах, а также Азорский и Гавайский антициклонические ЦДА в субтропических широтах. Над континентами в зимние сезоны отмечаются антициклонические ЦДА – Сибирский и Североамериканский, а в летние сезоны – циклонические ЦДА – Южноазиатский и Североамериканский. Наряду с этим выделяются и другие крупномасштабные особенности в поле приповерхностного давления, в частности квазипостоянный Гренландский антициклон. В Южном полушарии (ЮП) в субтропических широтах над океанами формируются квазипостоянные субтропические

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова

<sup>\*</sup>E-mail: mokhov@ifaran.ru

антициклонические ЦДА – Южноатлантический, Южноиндоокеанский и Южнотихоокеанский. В океанических субантарктических широтах отмечается сплошная зона пониженного давления. Над континентами можно выделить сезонные ЦДА – циклонические летние (Южноафриканский, Австралийский и Южноамериканский) и антициклонические зимние – Южноафриканский, Южноамериканский, а также максимум в области Австралии и Новой Зеландии. В полярных областях обоих полушарий проявляются повышенные области атмосферного давления – антарктический и арктический максимумы.

С особенностями ЦДА связаны как существенные региональные климатические аномалии, так и процессы полушарного и глобального масштаба [1–7]. Индекс Северо-Атлантического колебания и другие значимые индикаторы общей циркуляции атмосферы непосредственно определяются характеристиками соответствующих ЦДА. В частности, динамика Североатлантического колебания и зональный перенос, в том числе водяного пара, в тропосфере средних широт с Атлантики во внутриконтинентальные регионы зависят от режимов североатлантических ЦДА -Исландского минимума и Азорского максимума. С изменением градиента давления в тропосфере между субтропическими и субполярными широтами с соответствующими антициклоническими и циклоническими ЦДА над океанами связано также формирование атмосферных блокирований в средних широтах и, как следствие, режимов засух летом и морозов зимой. В области влияния зимнего Сибирского антициклона отмечаются рекордно низкие в СП значения приповерхностной температуры.

Эти крупномасштабные атмосферные структуры связаны с квазистационарными планетарными волнами, а с другой стороны, их можно характеризовать как крупномасштабные вихревые структуры. Двойственная природа связанных с ЦДА образований проявляется и в их вертикальной структуре [1]. В [2] отмечено, что крупномасштабные аномалии барического поля в нижней тропосфере определяются в основном термическим фактором, при этом их локализация и интенсивность зависят от орографического воздействия. В [3] получены аналитические выражения для моды, вносящей ключевой вклад в формирование ЦДА. Модельные выражения, подобные полученным в [3], позволяют провести качественный анализ чувствительности характеристик ЦДА к глобальным антропогенным воздействиям, в том числе вызванным изменениями содержания парниковых газов в атмосфере, и естественным факторам климатической изменчивости, таким, например, как явления Эль-Ниньо.

По данным наблюдений и систем реанализа отмечается значительная изменчивость характеристик ЦДА [1]. Анализ различных данных выявил для последних десятилетий статистически значимые долгопериодные тенденции изменения характеристик ЦДА при изменении температурного режима, в частности зимой для СП [3, 4]. Полученные оценки свидетельствуют о возможных значительных изменениях ЦДА при продолжении глобального потепления. Использование современных климатических моделей позволяет оценить изменения характеристик ЦДА при ожидаемых глобальных изменениях климата [1, 8, 9]. В том числе в [5] получены оценки чувствительности изменений характеристик ЦДА к изменению полушарной приповерхностной температуры с использованием результатов численных расчетов с различными климатическими моделями. В частности, в [5] по модельным расчетам отмечена тенденция усиления Исландского ЦДА при потеплении в 21 веке. При этом отмечено, что следует ожидать ослабление зимних континентальных (Сибирского и Североамериканского) ЦДА. Для тихоокеанских (Алеутского и Гавайского) ЦДА отмечены нелинейные изменения в 21 веке.

В [1, 10] представлены оценки возможных изменений характеристик ЦДА в 21 веке при сценариях RCP, в том числе при сценариях антропогенных воздействий RCP4.5 и RCP8.5, с использованием результатов численных расчетов с климатическими моделями семейства СМІР5. Отмечено, в частности, общее усиление (углубление) циклонических ЦДА (как круглогодичных, так и сезонных) в обоих полушариях к концу 21 века по сравнению с современными условиями. При этом выявлены разные тенденции для формирующегося в теплые сезоны североамериканского циклонического ЦДА по расчетам с разными моделями. Над континентами в СП проявляется общее ослабление зимних антициклонических ЦДА, развитие которых связано с выхолаживанием поверхности в холодные сезоны. Значительное ослабление отмечено для Гренландского максимума. Отмеченное увеличение интенсивности океанических субтропических максимумов (более сильное в холодные сезоны), в частности в ЮП, можно связать с изменениями меридиональной ячейки Хэдли при глобальном потеплении. В СП проявляются разнонаправленные тенденции изменений для субтропических азорского и гавайского максимумов. Отмеченное ослабление полярных (арктического и антарктического) ЦДА более выражено в холодные сезоны. Это связано со смещением к высоким широтам траекторий внетропических циклонов. Более значительное ослабление проявляется при сценарии более сильных антропогенных воздействий RCP8.5 для 21 века.

Цель данной работы — по расчетам с ансамблями современных климатических моделей оценить степень адекватности воспроизведения режимов различных ЦДА и их изменений в сопоставлении с ранее полученными оценками.

# ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При анализе режимов ЦДА использовались результаты расчетов для полей давления на уровне моря в СП с ансамблями климатических моделей в рамках международных проектов СМІР5 и СМІР6. В частности, использовались результаты численных расчетов с климатическими моделями ансамблей СМІР5 и СМІР6 при сценарии "Historical" и при сценариях RCP8.5 и SSP5-8.5 для 21 века.

Качество воспроизведения особенностей ЦДА по модельным расчетам оценивалось в сопоставлении с данными peaнализа ERA5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5) для базового периода 1981— 2005 гг.

Области, соответствующие каждому из анализировавшихся ЦДА, выделялись аналогично [17], в том числе:  $(20^\circ - 45^\circ \text{ с.ш.}, 10^\circ - 60^\circ \text{ з.д.})$  для Азорского максимума,  $(20^\circ - 45^\circ \text{ с.ш.}, 170^\circ \text{ в.д.} - 120^\circ \text{ з.д.})$ для Гавайского максимума,  $(70^\circ - 90^\circ \text{ с.ш.}, 75^\circ \text{ в.д.} - 70^\circ \text{ з.д.})$  для Арктического максимума,  $(70^\circ - 87^\circ \text{ с.ш.}, 20^\circ - 60^\circ \text{ з.д.})$  для Гренландского максимума,  $(35^\circ - 65^\circ \text{ с.ш.}, 150^\circ \text{ в.д.} - 140^\circ \text{ з.д.})$  для Алеутского минимума,  $(50^\circ - 70^\circ \text{ с.ш.}, 0^\circ - 60^\circ \text{ з.д.})$  для Исландского минимума,  $(35^\circ - 70^\circ \text{ с.ш.}, 70^\circ - 120^\circ \text{ з.д.})$ для зимнего Североамериканского максимума,  $(35^\circ - 66^\circ \text{ с.ш.}, 60^\circ - 135^\circ \text{ в.д.})$  для зимнего Сибирского максимума,  $(10^\circ - 35^\circ \text{ с.ш.}, 40^\circ - 95^\circ \text{ в.д.})$  для летнего Азиатского минимума,  $(20^\circ - 45^\circ \text{ с.ш.}, 100^\circ - 120^\circ \text{ з.д.})$ для летнего Североамериканского минимума.

В пределах соответствующей конкретному ЦДА области определялось среднее значение давления на уровне моря  $P_c$  с повышенным или пониженным давлением для антициклонических или циклонических условий соответственно. В данной работе анализируются среднесезонные значения, в том числе для зимы и лета. Интенсивность ЦДА характеризовалась как давлением на уровне моря в области ЦДА  $P_c$  (аналогично [7]), так и соответствующим перепадом давления  $I_c$  относительно среднеполушарного давления  $P_H$  на уровне моря:

$$I_{\rm c} = P_{\rm c} - P_{\rm H}.$$
 (1)

При этом анализировались также относительные изменения интенсивности ЦДА  $I_c' = I_c/\delta I_c$  – при нормировании  $I_c$  на соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО)  $\delta I_c$ . Аналогично [7] анализировались также другие характеристики ЦДА, в том числе значения абсолютного максимума (минимума) давления в центре ЦДА  $I_{cm}$  и его широта  $\varphi_C$  и долгота  $\lambda_C$ .

При анализе в рамках ансамблей СМІР5 (28 моделей) и СМІР6 (53 модели) выделялись климатические модели, наиболее адекватно воспроизводящие ЦДА с использованием двух критериев. Во-первых, степень адекватности модельных оценок интенсивности центров действия атмосферы в Северном полушарии определялась на основе результатов сравнения поля приповерхностного атмосферного давления в моделях (при сценарии Historical) с данными реанализа ERA5 для базового периода 1981-2005 гг. для разных сезонов. Во-вторых, учитывалось, для какого количества ЦДА было отмечено соответствие значений І<sub>с</sub> по модельным расчетам и по данным реанализа ERA5 в пределах их СКО. Модель отбиралась при условии, что хотя бы по одному из описанных выше критериев попадала в верхнюю четверть лучших моделей из числа всех доступных, при этом по второму критерию была в верхней половине.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены диаграммы Тэйлора, характеризующие степень соответствия модельных оценок интенсивности ЦДА в СП в разных климатических моделях и соответствующих оценок по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981—2005 гг.: по расчетам с ансамблями климатических моделей СМІР5 (а, б) и СМІР6 (в, г) для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов.

Согласно рис. 1, соответствие модельных оценок поля атмосферного давления (в том числе интенсивности центров действия атмосферы) в Северном полушарии оценкам по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981–2005 гг. по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР6 в целом заметно лучше, чем по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP5. Сравнение результатов для разных сезонов по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР5 свидетельствует о в целом заметно лучшем воспроизведении поля атмосферного давления зимой (рис. 1 а), чем летом (рис. 1 б). При этом воспроизведение атмосферного давления по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР6 существенно лучше и зимой, и летом.

В результате сравнительного анализа с данными реанализа были отобраны 11 моделей ансамбля CMIP6 (AWI-CM-1-1-MR, CAMS-CSM1-0, CIESM, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, EC-Earth3-Veg-LR, FGOALS-f3-L, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, NorESM2-LM, NorESM2-MM) и 9 моделей ансамбля CMIP5 (ACCESS1-0, bcccsm1-1, CanESM2, CMCC-CM, CMCC-CMS,



Рис. 1. Диаграммы Тэйлора, характеризующие степень соответствия поля атмосферного давления на уровне моря в СП по расчетам с полными ансамблями климатических моделей CMIP5 (а, б) и CMIP6 (в, г) (сценарий "Historical") и по данным реанализа ERA5 для зимнего (а, в) и летнего (б, г) сезонов для базового периода 1981-2005 гг. Радиальная координата характеризует пространственное стандартное отклонение давления (гПа), угловая координата – коэффициент пространственной корреляции поля давления между результатами модельных расчетов и данными реанализа. Зеленым пунктиром показано среднеквадратическое отклонение (в гПа) результатов модельных расчетов относительно соответствующих оценок по данным реанализа.

CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, NorESM1-ME), наилучшим образом воспроизводящие режимы ЦДА для базового периода в сопоставлении с данными реанализа.

На рис. 2 приведены оценки интенсивности Іс ключевых ЦДА СП для зимнего (а) и летнего (б) сезонов по данным реанализа (приведены также среднеквадратические отклонения для межгодовой изменчивости) и по расчетам с ансамблями моделей СМІР5 и СМІР6 для базового периода 1981-2005 гг. В том числе приведены значения интенсивности как для полных ансамблей моделей, так и для ансамблей отобранных моделей. Согласно рис. 2, воспроизведение ключевых ЦДА по расчетам с ансамблем отобранных климатических моделей СМІР6 в целом лучше, чем по расчетам с ансамблем отобранных климатических моделей СМІР5.

В табл. 1 представлены количественные оценки интенсивности Іс ключевых ШЛА в СП для зимнего (а) и летнего (б) сезонов по расчетам с отобранными ансамблями климатических моделей СМІР5 и СМІР6 и по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981-2005 гг. Приведены также среднеквадратические отклонения (СКО). Следует отметить, что на фоне межгодовой изменчивости режимов ЦДА не всегда может значимо определяться их среднесезонная интенсивность, тем более, если она определяется согласно (1) средней аномалией давления для большой области. Наряду с этим необходимо учитывать моды междесятилетней климатической

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ Nº 2 2022 том 507



Рис. 2. Интенсивность *I*с (гПа) ключевых центров действия атмосферы Северного полушария для зимнего (а) и летнего (б) сезонов по данным реанализа (черные кружки, приведены также среднеквадратические отклонения для межгодовой изменчивости) и расчетам с моделями СМІР5 (синие кружки) и моделями СМІР6 (оранжевые кружки) для базового периода 1981–2005 гг. Представлены оценки интенсивности как для всего ансамбля моделей (кружки без заливки), так и только для отобранных моделей (кружки с заливкой). Нумерация ЦДА на рис. 2 соответствует нумерации ЦДА в табл. 1.

изменчивости, проявляющиеся в вариациях характеристик ЦДА. С Исландским минимумом и Азорским максимумом, в частности, связана Северо-Атлантическая осцилляция.

Для ЦДА в табл. 1 а получены значимые (на уровне статистической значимости 99% и более) оценки среднезимней интенсивности *I*с для Азорского, Сибирского и Североамериканского максимумов и для Исландского и Алеутского минимумов как по данным реанализа, так и по модельным расчетам. При этом модельные оценки интенсивности этих ЦДА хорошо согласуются с полученными по данным реанализа. Несколько меньшая среднезимняя интенсивность Алеутского минимума по оценкам с ансамблем моделей СМІР5 находится, тем не менее, в диапазоне СКО относительно полученных по данным реанализа и по расчетам с ансамблем моделей СМІР6. При этом для Гавайского и Арктического максимумов оценки среднезимней интенсивности *I*с по модельным расчетам получены статистически незначимыми (хотя бы на уровне значимости 95%), как и по данным реанализа для периода 1981–2005 гг. Что касается среднезимнего Арктического максимума, то для него характерна максимальная межгодовая изменчивость интенсивности.

Соответствующие оценки среднелетней интенсивности ЦДА *I*с в табл. 1 б по модельным расчетам значимы и хорошо согласуются для субтропических Азорского и Гавайского максимумов и для Азиатского минимума с оценками по данным Таблица 1. Интенсивность *I*с [гПа] ключевых центров действия атмосферы Северного полушария для зимнего (а) и летнего (б) сезонов по расчетам с отобранными ансамблями климатических моделей СМІР5 и СМІР6 и по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981–2005 гг. В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО) интенсивности ЦДА

(-)

(a)				
Центры действия атмосферы	Зима Северного полушария			
	реанализ	модели СМІР5	модели СМІР6	
1. Азорский максимум	4.8 (±1.6)	4.8 (±1.7)	5.0 (±2.0)	
2. Гавайский максимум	0.0 (±2.1)	0.3 (±2.3)	-0.7 (±2.4)	
3. Сибирский максимум	10.5 (±1.1)	10.4 (±1.4)	10.2 (±1.5)	
4. Североамериканский максимум	3.0 (±1.0)	2.7 (±1.2)	3.2 (±1.3)	
5. Арктический максимум	2.2 (±3.4)	1.2 (±4.5)	1.5 (±4.2)	
6. Алеутский минимум	-9.6 (±2.7)	-7.7 (±3.3)	-9.9 (±3.5)	
7. Исландский минимум	-10.9 (±2.8)	-11.3 (±2.8)	-11.4 (±3.1)	

(б)

Центры действия атмосферы	Лето Северного полушария		
	реанализ	модели СМІР5	модели СМІР6
1. Азорский максимум	8.2 (±0.6)	8.6 (±0.6)	8.4 (±0.6)
2. Гавайский максимум	7.6 (±0.6)	8.3 (±0.7)	8.0 (±0.7)
3. Арктический максимум	-0.9 (±1.6)	1.7 (±2.4)	0.4 (±2.3)
4. Алеутский минимум	3.5 (±0.8)	4.7 (±1.1)	4.7 (±1.1)
5. Исландский минимум	0.1 (±1.1)	1.8 (±1.1)	1.2 (±1.3)
6. Азиатский минимум	-8.4 (±0.3)	-8.4 (±0.3)	-8.7 (±0.5)
7. Североамериканский минимум	1.0 (±0.5)	-0.0 (±0.6)	0.2 (±0.6)

реанализа. При этом для областей Арктического максимума и Алеутского, Исландского и Североамериканского минимумов по данным реанализа получены среднелетние аномалии давления на уровне моря противоположного знака, хотя и незначимые для Арктического максимума и Исландского и Североамериканского минимумов. Стоит отметить, что для периода 1981-2005 гг. по модельным расчетам в области Арктического максимума получены положительные среднелетние аномалии давления (хотя и незначимые), в отличие от оценки по данным реанализа. Для Североамериканского минимума по модельным расчетам также, как и по данным реанализа, получены незначимые оценки среднелетней интенсивности. Полученные результаты свидетельствуют, что ЦДА, интенсивность которых опрелеляется согласно (1), в зимние сезоны проявляются в целом более значимо, чем в летние, несмотря на более сильную межгодовую изменчивость (характеризуемую СКО).

Для получения более надежных оценок возможных изменений режимов ЦДА при ожидаемых изменениях климата необходимым условием является адекватное воспроизведение в модельных расчетах современных режимов ЦДА. Согласно полученным результатам воспроизведение ЦДА и зимой, и летом по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР6 в целом существенно лучше, чем с ансамблем климатических моделей СМІР5. При этом согласно табл. 1 соответствие оценкам по данным реанализа для одних ЦДА лучше для отобранных моделей ансамбля СМІР6, для других ЦДА – лучше для отобранных моделей ансамбля СМІР5.

На рис. 3 представлены оценки возможных изменений по расчетам с отобранными климатическими моделями обоих ансамблей – СМІР5



**Рис. 3.** Изменения интенсивности *Ic*' (нормированной на СКО для базового периода 1981–2005 гг.) ключевых центров действия атмосферы в Северном полушарии при 25-летнем скользящем осреднении по расчетам с ансамблями отобранных моделей СМІР5 при сценарии RCP8.5 (синий цвет) и моделей СМІР6 при сценарии SSP5-8.5 (оранжевый цвет). Толстые линии соответствуют межмодельному среднему, тонкие линии характеризуют диапазоны (с заливкой) среднеквадратических межмодельных отклонений. Здесь: (а) Азорский максимум, (б) Сибирский максимум, (в) Североамериканский максимум, (г) Алеутский минимум, (д) Исландский минимум – зимние ЦДА; (е) Азорский максимум, (ж) Гавайский максимум, (д) Азиатский минимум – летние ЦДА.

при сценарии RCP8.5 и CMIP6 при сценарии SSP5-8.5. Приведены оценки изменений для интенсивности ЦДА, для которых получено наилучшее соответствие интенсивности по модельным расчетам и по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981–2005 гг.

На рис. 3 представлены оценки относительных (нормированных на СКО для базового периода 1981–2005 гг.) изменений интенсивности *Iс*' Азорского, Сибирского и Североамериканского максимумов и Алеутского, и Исландского минимумов зимой, а также Азорского и Гавайского максимумов и Азиатского минимума летом. Согласно рис. 3, тенденции изменений интенсивности разных ЦДА существенно различаются, в том числе по знаку. При этом в целом для разных ЦДА увеличивается диапазон изменчивости в 21 веке. Для зимнего Азорского антишиклонического ЦДА к концу 21 века при сценарии RCP8.5 интенсивность увеличивается до уровня, значимого на уровне СКО. Еше более значимо усиливается зимний Алеутский циклонический ЦДА. При этом для интенсивности Сибирского и Североамериканского антициклонических и Исландского циклонического ЦДА зимой отмечено уменьшение в 21 веке, наиболее значимое для Североамериканского ЦДА, а наименее значимое – для Сибирского антициклона. Значимое, хотя и относительно небольшое, ослабление получено для летнего Азиатского циклонического ЦДА. Незначимое ослабление проявилось для Гавайского антициклонического ЦДА. Для Азорского

339

максимума в летние сезоны, в отличие от зимних, тенденций изменения в 21 веке не выявлено.

По расчетам с отобранными климатическими моделями ансамбля СМІР6 для зимнего Азорского антициклонического ЦДА к концу 21 века при сценарии SSP5-8.5, как и по расчетам с отобранными климатическими моделями ансамбля СМІР5 при сценарии RCP8.5, интенсивность увеличивается, хотя и менее значимо (рис. 3). А вот для изменений зимнего Алеутского циклонического ЦДА не проявляется тенденция общего роста интенсивности в 21 веке, отмеченная по расчетам с моделями ансамбля СМІР5 при сценарии RCP8.5. При этом для интенсивности Сибирского и Североамериканского антициклонических ЦДА зимой выявлено более значимое, особенно для Североамериканского антициклона, уменьшение в 21 веке. Для Исландского ЦДА зимой тенденции изменения в 21 веке по расчетам с моделями ансамбля СМІР6 при сценарии SSP5-8.5 не проявляются, в отличие от оцененных с моделями CMIP5 при сценарии RCP8.5. Для летнего Азиатского циклонического ЦДА изменения с общим уменьшением интенсивности по расчетам с ансамблями моделей СМІР6 и СМІР5 в целом согласуются, как согласуются и незначимые изменения для Гавайского и Азорского антициклонических ЦДА в летние сезоны.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ возможных изменений режимов ШЛА по расчетам с ансамблями современных климатических моделей СМІР5 и СМІР6 выявил неоднозначные тенденции изменений для разных ЦДА в Северном полушарии, в частности при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в 21 веке. Полученные оценки разного уровня статистической значимости. С ансамблями моделей СМІР5 и СМІР6 наиболее согласованные оценки получены для тенденций ослабления зимнего Североамериканского антициклонического и летнего Азиатского циклонического ЦДА. Для зимнего Сибирского антициклонического ЦДА тенденция ослабления получена более значимой по расчетам с ансамблем климатических моделей СМІР6. Для уточнения выявленных тенденций изменений ЦДА и анализа причин их различий необходимы дальнейшие исследования.

При детектировании ЦДА и оценке тенденций изменения их интенсивности отмечен ряд сезонных и региональных особенностей. В частности, для базового периода 1981—2005 гг., в целом, как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, средняя интенсивность субтропических антициклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами для летних сезонов определяется более значимо, чем для зимних. При этом для средней интенсивности субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами отмечено обратное — их интенсивность в целом более значимо определяется для зимних сезонов, чем для летних. Это проявилось несмотря на то, что межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА, характеризуемая СКО, в зимние сезоны в целом больше.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная выполнена в рамках проекта РНФ (№ 19-17-00240).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС. 2018. 482 с.
- 2. Галин М.Б., Харитоненко В.М. Роль орографических и термических неоднородностей поверхности в формировании планетарных волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 473–484.
- 3. *Мохов И.И., Петухов В.К.* Центры действия в атмосфере и тенденции их изменения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 3. С. 321–329.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменения центров действия атмосферы в Северном полушарии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 6. С. 723–732.
- 5. Хон В.Ч., Мохов И.И. Модельные оценки чувствительности центров действия атмосферы к глобальным климатическим изменениям // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 749–756.
- Chernokulsky A.V., Mokhov I.I., Nikitina N.G. Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966-2010 // Environ. Res. Lett. 2013. V. 8. No 4. P. 045012. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045012
- Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 5–23.
- Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, NewYork, 2013. 1535 pp.
- 9. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, NewYork, 2021.
- Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centres of action in the Northern and Southern Hemispheres: Tendencies of change in the 21<sup>st</sup> century from model simulations // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 7. P. 11–12.

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 507 № 2 2022

# **ATMOSPHERIC CENTERS OF ACTION IN THE NORTHERN HEMISPHERE: CURRENT FEATURES AND EXPECTED CHANGES IN THE 21ST CENTURY BASED ON SIMULATIONS WITH THE CMIP5 AND CMIP6 ENSEMBLES OF CLIMATE MODELS**

## Academician of the RAS I. I. Mokhov<sup>*a,b,#*</sup>, A. M. Osipov<sup>*b*</sup>, and A. V. Chernokulsky<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation <sup>b</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation <sup>#</sup>*E*-mail: mokhov@ifaran.ru

Regional features of global climate changes are significantly related to the regimes of atmospheric centers of action (ACA) and their variability. The analysis of the expected ACA changes in the Northern Hemisphere was carried out using simulations with ensembles of modern climate models of the international projects CMIP5 and CMIP6 under the scenarios of anthropogenic forcings RCP8.5 and SSP5-8.5 in the 21st century. The most consistent estimates based on simulations with the ensembles of the CMIP5 and CMIP6 models were obtained for the weakening tendencies of the winter North American High and the summer Asian Low. For the winter Siberian High, the weakening trend was found to be more significant according to simulations with the CMIP6 ensemble of climate models. In a comparative analysis of ACAs detected by model simulations and ERA5 reanalysis data, in particular for the base period 1981–2005, it was noted that, in general, the intensities of subtropical anticyclonic ACAs over the Atlantic and Pacific oceans are larger for summer than for winter according to both reanalysis data and model simulations. For the intensity of subpolar cyclonic ACAs over the Atlantic and Pacific oceans, the opposite peculiarity is noted: their intensity is generally higher for winter than for summer. At the same time, the interannual variability of the ACAs intensity, characterized by a standard deviation, is generally greater in winter than in summer.

Keywords: atmospheric centers of action, modeling, reanalysis, climate change, CMIP5, CMIP6, air pressure