

УДК 551.513.3:551.583

ЦЕНТРЫ ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПО РАСЧЕТАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ СМIP6 И СМIP5

© 2025 г. И. И. Мохов^{a,b,*}, А. М. Осипов^b, А. В. Чернокульский^a

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 07.09.2024 г.

После доработки 07.11.2024 г.

Принята к публикации 27.12.2024 г.

Представлены результаты анализа изменений характеристик центров действия атмосферы (ЦДА) в Северном (СП) и Южном (ЮП) полушариях, полученные на основе результатов расчетов с использованием ансамблей климатических моделей СМIP5 и СМIP6. Оценена способность современных моделей воспроизводить особенности ЦДА для исторического сценария в сравнении с данными реанализа ERA5. Получены прогностические оценки изменений режимов ЦДА в XXI веке при сценариях RCP8.5 для моделей СМIP5 и SSP5-8.5 для моделей СМIP6. Интенсивность ЦДА оценивалась как разность давления на уровне моря в регионе ЦДА и среднего давления для полушария. В СП по данным реанализа и модельным расчетам интенсивность субтропических океанических антициклонических ЦДА больше летом, чем зимой. Противоположная ситуация отмечена для интенсивности субполярных океанических циклонических ЦДА в СП. Межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА зимой в целом больше, чем летом. В ЮП сезоны с большей интенсивностью океанических антициклонических и циклонических ЦДА и ее межгодовая изменчивость различаются для разных океанов. По расчетам с моделями СМIP5 и СМIP6 получены значимые изменения интенсивности ЦДА в XXI веке. Более значимые тенденции усиления ЦДА в XXI веке проявляются в ЮП, особенно в зимние сезоны. Наиболее устойчивые тенденции ослабления отмечены над континентами для зимнего Северо-Американского максимума и летнего Азиатского минимума. Для зимнего Сибирского максимума тенденция ослабления более выражена по расчетам с моделями СМIP6, чем по расчетам с моделями СМIP5.

Ключевые слова: центры действия атмосферы, изменения климата, моделирование

DOI: 10.31857/S0002351525020047, **EDN:** GKMTSK

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные центры действия (ЦДА) – крупномасштабные структурные образования в атмосфере Земли, характеризующие общую циркуляцию в тропосфере Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий и зависящие от распределения океанов и континентов. В изменчивой атмосфере ЦДА проявляются достаточно устойчиво в поле приповерхностного давления с месячным и сезонным осреднением. Отмечаются квазипостоянные субполярные циклонические области с пониженным приповерхностным давлением и

субтропические антициклонические области с повышенным приповерхностным давлением над океанами, а также антициклонические области с повышенным приповерхностным давлением над полярными широтами [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Мохов и др., 2020].

Отмеченные особенности ЦДА связаны с трехъячейковой меридиональной циркуляцией в тропосфере каждого полушария с образованием тропических ячеек Хэдли, обратных ячеек Ферреля в средних широтах и полярных ячеек. При трехъячейковой меридиональной циркуляции в

тропосфере СП и ЮП широтные пояса с пониженным приповерхностным давлением проявляются в субполярных областях восходящих ветвей ячеек Ферреля и полярных ячеек и с повышенным приповерхностным давлением в областях нисходящих ветвей ячеек Хэдли и Ферреля — в субтропических широтах, а также в полярных широтах с нисходящими ветвями полярных ячеек. Более четко это проявляется в океанических субантарктических широтах ЮП. Наличие континентов нарушает зональную структуру атмосферной циркуляции, из-за различия теплоемкости деятельных слоев континентов и океанов в годовом цикле температурный перепад между ними меняет знак. Зимой поверхность континентов холоднее, а летом теплее поверхности океанов в тех же широтах. При этом над континентами формируются сезонные ЦДА разной завихренности: летом — циклонические, зимой — антициклонические [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018].

В СП в поле давления над океанами выделяются Алеутский и Исландский циклонические ЦДА в субарктических широтах, Азорский и Гавайский антициклонические ЦДА в субтропических широтах. В полярных широтах формируются Арктический и Гренландский максимумы. Над континентами в зимние сезоны образуются антициклонические ЦДА — Сибирский и Северо-Американский максимумы, а в летние — циклонические ЦДА — Азиатский и Северо-Американский минимумы [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018]. В ЮП над океанами в субтропических широтах формируются антициклонические ЦДА — Южно-Атлантический, Индоокеанский (Маскаренский) и Южно-Тихоокеанский максимумы. В субантарктических океанических широтах образуется непрерывная зона низкого давления, наибольшее понижение давления проявляется в областях Индоокеанского, Южно-Атлантического и Южно-Тихоокеанского минимумов. Над континентами возникают сезонные ЦДА, включая летом Южно-Африканский, Австралийский и Южно-Американский минимумы. В полярных широтах образуется Антарктический максимум [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018].

С ЦДА связаны характерные региональные особенности, а также ключевые погодно-климатические процессы полушарного и глобального масштаба [Climate Change 2013; Climate Change 2021]. Так в области влияния Сибирского максимума регистрируются самые низкие значения

приповерхностной температуры в Северном полушарии в зимние месяцы. Ряд важных показателей региональных изменений циркуляции атмосферы напрямую определяется характеристиками соответствующих ЦДА. В частности, особенности Северо-Атлантического колебания, влияющего на погодно-климатические режимы в евразийских регионах, связаны с интенсивностью Исландского циклона и Азорского антициклона. В зоне влияния Сибирского максимума в северной части Азии в последние десятилетия отмечены высокие значения тренда приповерхностного потепления в зимние сезоны [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018].

Анализу механизмов формирования ЦДА посвящено много исследований [Rossby, 1939; Haurwitz, 1940; Блинова, 1943; Smagorinsky, 1958; Wallace, 1988; Галин, Харитonenko, 1989; Переведенцев и др., 1994; Гушина, Петросянц, 1998; Мохов, Петухов, 2000; Chernokulsky et al., 2013; Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Мохов и др., 2020; Мохов и др., 2022]. В [Rossby, 1939; Haurwitz, 1940; Блинова, 1943] особенности ЦДА характеризовались на основе анализа формирующихся в атмосфере планетарных волн — волн Россби—Блиновой. Значительная часть энергии подобных планетарных волн связана со стационарной составляющей, которая проявляется в положительных и отрицательных аномалиях усредненного по времени поля давления в тропосфере. ЦДА можно также характеризовать как крупномасштабные вихревые структуры [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018]. В [Галин и Харитonenko, 1989] был сделан вывод о том, что крупномасштабные аномалии поля давления в нижней тропосфере определяются в основном термическим фактором, хотя их локализация и интенсивность зависят также от орографического влияния. В [Мохов и Петухов, 2000] получены аналитические выражения для пространственной моды, с которой связан основной вклад в формирование ЦДА. Полученные в [Мохов и Петухов, 2000] модельные выражения позволяют провести качественный анализ чувствительности характеристик ЦДА к глобальным антропогенным изменениям, вызванным изменением содержания парниковых газов в атмосфере, с оценкой роли вариаций природных факторов, в том числе различных мод естественной изменчивости типа явлений Эль-Ниньо. Глобальные климатические изменения, влияющие на вихре-волновую активность в ат-

мосфере, проявляются и в особенностях ЦДА. С ЦДА связаны значительные крупномасштабные аномалии климатических полей с экстремальными региональными режимами температуры, осадков, облачности [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018]. Существенные аномалии приповерхностной температуры в северной части Северной Америки связаны с режимом Алеутского циклона [Гущина, Петросянц, 1998; Trenberth, 1998; Мохов, Петухов, 2000; Мохов, Хон, 2005].

По данным наблюдений и реанализа отмечается значительная изменчивость характеристик ЦДА [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018]. При этом для последних десятилетий отмечены статистически значимые долгопериодные тенденции изменения характеристик ЦДА при изменении температурного режима, в частности зимой для СП [Мохов, Петухов, 2000; Мохов, Хон, 2005]. 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 [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Climate Change 2013, Climate Change 2021]. В [Хон, Мохов; 2006] получены оценки чувствительности изменений характеристик ЦДА к изменению полушарной приповерхностной температуры с использованием результатов численных расчетов с различными климатическими моделями. В частности, в [Хон, Мохов; 2006] по модельным расчетам отмечена тенденция усиления Исландского ЦДА при потеплении в XXI в. При этом отмечено, что следует ожидать ослабление зимних континентальных ЦДА. Для тихоокеанских ЦДА отмечены нелинейные изменения в XXI веке [Мохов и др., 2022].

В [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Mokhov et al., 2021] представлены оценки возможных изменений характеристик ЦДА в XXI веке при различных RCP-сценариях антропогенных воздействий с использованием результатов численных расчетов с климатическими моделями семейства CMIP5. Отмечено общее углубление циклонических ЦДА в обоих полушариях к концу XXI в. по сравнению с современными условиями. При этом отмечены разные тенденции для формирующегося в теплые сезоны Северо-Американского циклонического ЦДА по расчетам с разными моделями. Над кон-

тинентами в СП проявляется общее ослабление зимних антициклонических ЦДА. Отмеченное увеличение интенсивности океанических субтропических максимумов, 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 ЦДА более выражено в холодные сезоны, что можно связать со смещением траекторий внетропических циклонов к высоким широтам. Более значимое ослабление отмечено при сценарии более сильных антропогенных воздействий (RCP8.5) для XXI в. [Мохов и др., 2022].

В [Мохов и др., 2022] представлены результаты анализа возможных изменений характеристик ЦДА в СП по расчетам с ансамблями современных климатических моделей CMIP5 и CMIP6 при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в XXI веке. Наиболее согласованные оценки по расчетам с ансамблями CMIP6 получены для тенденций ослабления зимнего Северо-Американского максимума и летнего Азиатского минимума. Для зимнего Сибирского максимума тенденция ослабления получена более значимой по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6. При сравнительном анализе ЦДА, детектированных по модельным расчетам и данным реанализа, отмечено, что в целом, по данным реанализа 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 в зимние сезоны больше, чем в летние.

В данной работе представлен разносторонний и подробный анализ современных особенностей и ожидаемых изменений в XXI веке интенсивности основных ЦДА в обоих полушариях на основе моделирования с ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6. Для ЦДА Южного полушария подобные оценки ранее не проводились. Они сопоставляются с соответствующими результатами для ЦДА Северного полушария — более детальными, чем полученные ранее [Мохов и др., 2022].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа ЦДА использовались результаты расчетов полей давления на уровне моря в СП и ЮП с ансамблями климатических моделей международных проектов CMIP5 и CMIP6 в сопоставлении с данными реанализа. Использовались результаты численных расчетов с климатическими моделями ансамблей CMIP5 и CMIP6 при сценарии “Historical” и при сценариях RCP8.5 и SSP5-8.5 для XXI века. Качество воспроизведения особенностей ЦДА по модельным расчетам оценивалось в сопоставлении с данными реанализа ERA5 [Hersbach et al., 202] для базового периода 1981–2005 гг.

ЦДА детектировались аналогично [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Мохов и др., 2020]. При этом определялось среднее значение давления на уровне моря P_c в областях антициклонических или циклонических ЦДА – соответственно с повышенным (максимумы) или пониженным (минимумы) давлением относительно фоновых (полушарных) режимов. В том числе, анализировались режимы 10 ЦДА в СП и 10 ЦДА в ЮП (рис. 1, табл. 1), включая 11 ЦДА над океанами, 9 ЦДА над сушей, 13 круглогодичных ЦДА и 7 сезонных. Анализировались также соответствующие сезонные (зимние) особенности поля давления в ЮП над Австралией, Южной Америкой и Африкой – далее обозначаемые как Австралийский, Южно-Американский и Южно-Африканский максимумы.

Анализировались среднесезонные значения, в частности для зимнего и летнего сезонов. Интенсивность ЦДА характеризовалась как давлением на уровне моря в области ЦДА P_c (аналогично [Мохов и др., 2020]), так и соответствующим перепадом давления I_c относительно среднеполушарного давления P_H на уровне моря:

$$I_c = P_c - P_H. \quad (1)$$

Оценивались относительные изменения интенсивности ЦДА $I_c' = I_c / \delta I_c$ – при нормировании I_c на соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО) δI_c для базового периода 1981–2005 гг.

Следует отметить, что при оценке интенсивности ЦДА по аномалиям давления на уровне моря возможны неточности для ЦДА над кон-

тинентами с существенным влиянием орграфических эффектов или с ледовым щитом, как, например, для Гренландского максимума. При анализе ансамблевых модельных расчетов возможны также неточности, связанные с выделением общих областей, в пределах которых оцениваются аномалии давления и интенсивность ЦДА (без более детального определения их локализации). Кроме того, при оценке интенсивности ЦДА по аномалиям давления относительно фонового режима, определяемого среднеполушарным давлением на уровне моря, возможны неточности в случаях, когда региональный фоновый режим заметно отличается от полушарного.

Для анализа характеристик ЦДА использовались результаты расчетов с 25 моделями проекта CMIP5 и 32 моделями проекта CMIP6 (табл. 2). В данной работе из всех моделей CMIP5 и CMIP6 были выбраны только модели с реализациями, закодированными как “rlilpl” и “rlilplfl”, соответственно.

Для анализа также выделялись климатические модели, с использованием которых наиболее адекватно воспроизводились ЦДА («лучшие» модели) – с использованием двух критериев. Первый критерий основан на степени адекватности модели в воспроизведении поля глобального приповерхностного атмосферного давления. Оценки делались на основе сравнения смоделированных полей давления (в рамках исторического сценария “Historical”) с соответствующими полями по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981–2005 гг. для разных сезонов. Второй критерий учитывал количество ЦДА, значения I_c для которых по расчетам с моделью попадают в диапазон стандартного отклонения I_c относительно полученного по данным реанализа ERA5 (считалось, что такой ЦДА воспроизводится успешно). Модель включалась в выборку «лучших» моделей, если согласно одному из двух критериев модель попадала в четверть наиболее успешных из всех моделей, а согласно другому критерию, она попадала в половину наиболее успешных.

Значимость оценок интенсивности ЦДА оценивалась при их сравнении с соответствующими среднеквадратическими отклонениями. Минимальный уровень значимости тенденций изменения интенсивности ЦДА оценивался условием знакоопределенности измене-

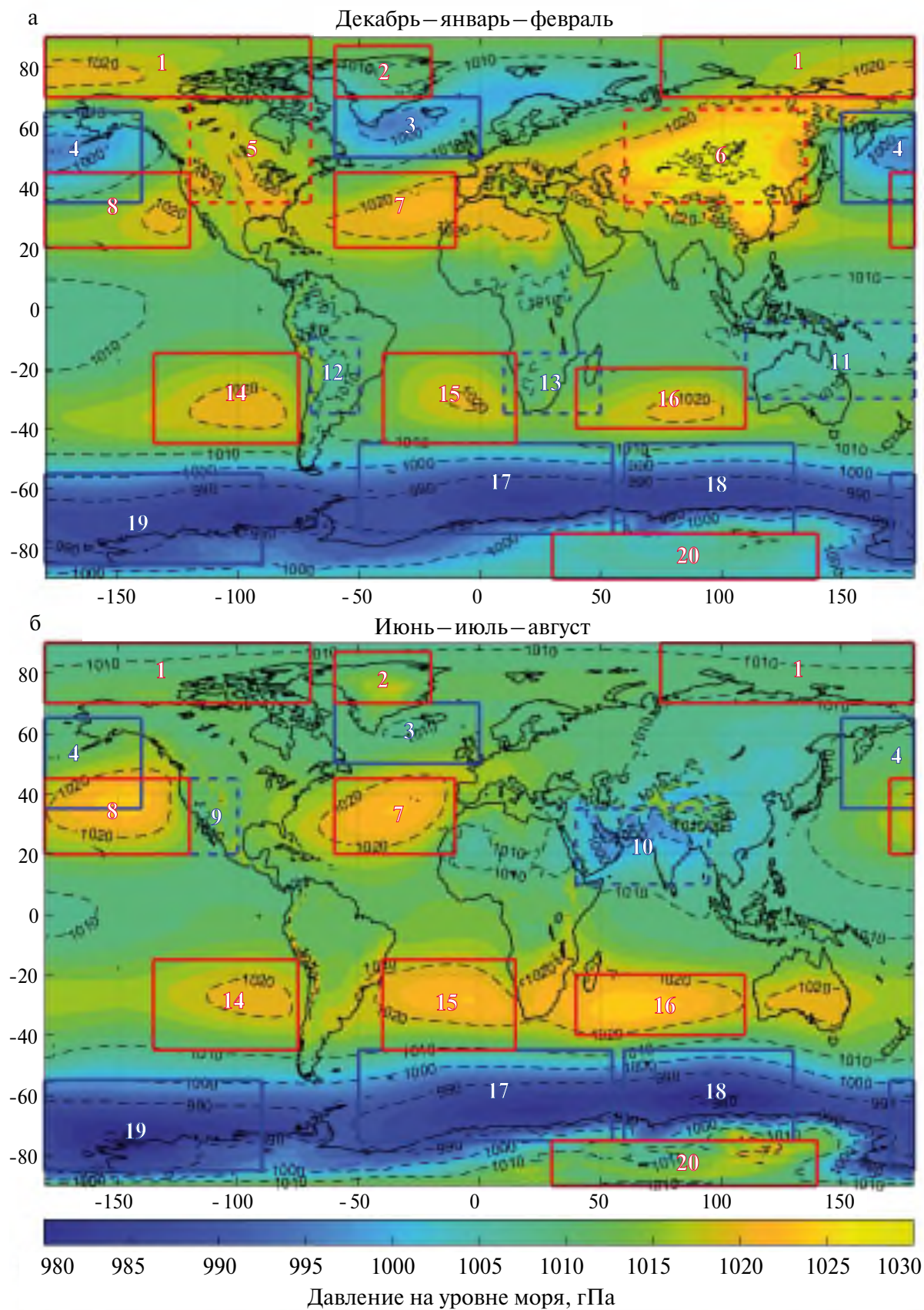


Рис. 1. Расположение анализируемых ЦДА в декабре – январе – феврале (а) и июне – июле – августе (б). Красными контурами отмечены максимумы, синими контурами – минимумы. Цифры соответствуют нумерации в табл. 1

Таблица 1. Характеристики анализируемых ЦДА

№	ЦДА	Сезоны	Тип поверхности	Регион	
				Широта	Долгота
Северное полушарие (СП)					
1	Арктический максимум	Круглогодично	Океан/лед	70—90° с.ш.	75° в.д.—70° з.д.
2	Гренландский максимум	Круглогодично	Океан/лед	70—87° с.ш.	20—60° з.д.
3	Исландский минимум	Круглогодично	Океан	50—70° с.ш.	0—60° з.д.
4	Алеутский минимум	Круглогодично	Океан	35—65° с.ш.	150° в.д.—140° з.д.
5	Северо-Американский максимум	Зима СП	Суша	35—70° с.ш.	70—120° з.д.
6	Сибирский максимум	Зима СП	Суша	35—66° с.ш.	60—135° в.д.
7	Азорский максимум	Круглогодично	Океан	20—45° с.ш.	10—60° з.д.
8	Гавайский максимум	Круглогодично	Океан	20—45° с.ш.	170° в.д.—120° з.д.
9	Северо-Американский минимум	Лето СП	Суша	20—45° с.ш.	100—120° з.д.
10	Азиатский минимум	Лето СП	Суша	10—35° с.ш.	40—95° в.д.
Южное полушарие (ЮП)					
11	Австралийский минимум	Лето ЮП	Суша	5—30° ю.ш.	110—180° в.д.
12	Южно-Американский минимум	Лето ЮП	Суша	10—35 ю.ш.	50—70° з.д.
13	Южно-Африканский минимум	Лето ЮП	Суша	15—35° ю.ш.	10—50° в.д.
14	Южно-Тихоокеанский максимум	Круглогодично	Океан	15—45° ю.ш.	75—135° з.д.
15	Южно-Атлантический максимум	Круглогодично	Океан	15—45° ю.ш.	40° з.д.—15° в.д.
16	Маскаренский максимум	Круглогодично	Океан	20—40° ю.ш.	40—110° в.д.
17	Южно-Атлантический минимум	Круглогодично	Океан	45—75° ю.ш.	50° з.д. —55° в.д.
18	Индокееанский минимум	Круглогодично	Океан	45—75° ю.ш.	60—130° в.д.
19	Южно-Тихоокеанский минимум	Круглогодично	Океан	55—85° ю.ш.	90—170° з.д.
20	Антарктический максимум	Круглогодично	Суша/лед	75—90° ю.ш.	30—140° в.д.

ний вместе с диапазоном среднеквадратических отклонений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Определение «лучших» моделей

На рис. 2 представлены диаграммы Тейлора, характеризующие степень соответствия поля атмосферного давления на уровне моря в СП и ЮП по расчетам с полными ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 (сценарий “Historical”) и по данным реанализа ERA5 для

зимнего и летнего сезонов для базового периода 1981–2005 гг.

Согласно рис. 2 воспроизведение современных особенностей поля давления на уровне моря в целом лучше в климатических моделях CMIP6, чем в климатических моделях CMIP5. В СП результаты для разных сезонов по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP5 указывают, в целом, на заметно лучшее воспроизведение поля атмосферного давления зимой, чем летом. При этом уровень воспроизведения атмосферного давления в расчетах с климати-

Таблица 2. Климатические модели, расчеты с которыми использовались в данной работе

№	Модели CMIP6		Модели CMIP5	
	Название модели	Модельное разрешение (долгота × широта)	Название модели	Модельное разрешение (долгота × широта)
1	ACCESS-CM2	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$	ACCESS1-0	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$
2	ACCESS-ESM1-5	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$	ACCESS1-3	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$
3	AWI-CM-1-1-MR	$0.9375^\circ \times 0.9375^\circ$	BCC-CSM1-1	$2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$
4	BCC-CSM2-MR	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	BNU-ESM	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$
5	CAMS-CSM1-0	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	CanESM2	$2.8125^\circ \times 2.76^\circ$
6	CanESM5	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	CCSM4	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$
7	CAS-ESM2-0	$1.4^\circ \times 1.39^\circ$	CESM1-BGC	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$
8	CESM2-WACCM	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	CESM1-CAM5	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$
9	CIESM	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	CMCC-CM	$0.75^\circ \times 0.75^\circ$
10	CMCC-CM2-SR5	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	CMCC-CMS	$1.88^\circ \times 1.86^\circ$
11	CMCC-ESM2	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	CNRM-CM5	$1.4^\circ \times 1.39^\circ$
12	EC-Earth3	$0.7^\circ \times 0.7^\circ$	FIO-ESM	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$
13	EC-Earth3-Veg	$0.7^\circ \times 0.7^\circ$	GISS-E2-H	$2.5^\circ \times 2^\circ$
14	EC-Earth3-Veg-LR	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	GISS-E2-R	$2.5^\circ \times 2^\circ$
15	FGOALS-f3-L	$1.25^\circ \times 1^\circ$	INM-CM4	$2^\circ \times 1.5^\circ$
16	FGOALS-g3	$2^\circ \times 2.25^\circ$	IPSL-CM5A-LR	$3.75^\circ \times 1.9^\circ$
17	FIO-ESM-2-0	$1.25^\circ \times 0.9375^\circ$	IPSL-CM5A-MR	$2.5^\circ \times 1.2676^\circ$
18	GFDL-ESM4	$1.25^\circ \times 1^\circ$	MIROC5	$1.4^\circ \times 1.39^\circ$
19	IITM-ESM	$1.875^\circ \times 1.904^\circ$	MIROC-ESM	$2.8125^\circ \times 2.79^\circ$
20	INM-CM4-8	$2^\circ \times 1.5^\circ$	MIROC-ESM-CHEM	$2.8125^\circ \times 2.79^\circ$
21	INM-CM5-0	$2^\circ \times 1.5^\circ$	MPI-ESM-LR	$1.875^\circ \times 1.85^\circ$
22	IPSL-CM6A-LR	$2.5^\circ \times 1.25^\circ$	MPI-ESM-MR	$1.875^\circ \times 1.85^\circ$
23	KACE-1-0-G	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$	MRI-CGCM3	$1.125^\circ \times 1.1^\circ$
24	KIOST-ESM	$1.88^\circ \times 1.86^\circ$	NorESM1-M	$2.5^\circ \times 1.9^\circ$
25	MIROC6	$1.40625^\circ \times 1.40625^\circ$	NorESM1-ME	$2.5^\circ \times 1.9^\circ$
26	MPI-ESM1-2-HR	$0.9375^\circ \times 0.935^\circ$	—	—
27	MPI-ESM1-2-LR	$1.875^\circ \times 1.8652^\circ$	—	—
28	MRI-ESM2-0	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	—	—
29	NESM3	$1.875^\circ \times 1.865^\circ$	—	—
30	NorESM2-LM	$2.5^\circ \times 1.89474^\circ$	—	—
31	NorESM2-MM	$1.25^\circ \times 0.9375^\circ$	—	—
32	TaiESM1	$1.25^\circ \times 0.9375^\circ$	—	—

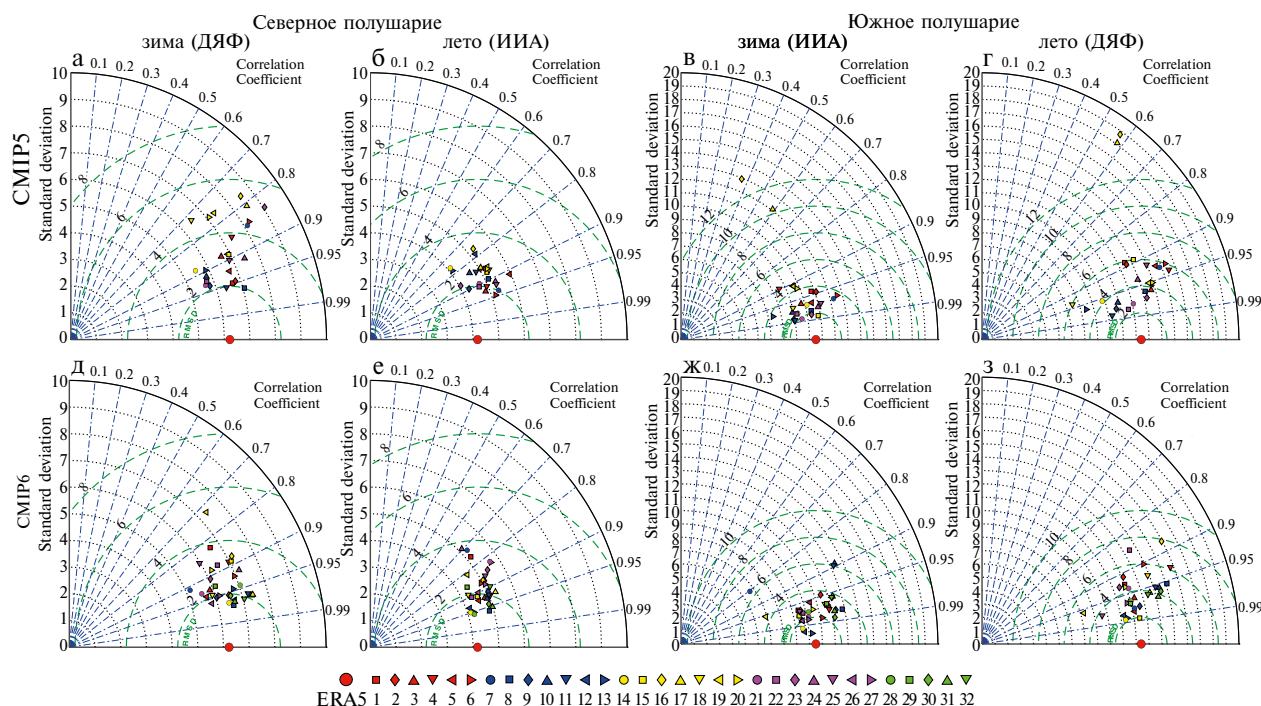


Рис. 2. Диаграммы Тейлора, характеризующие степень соответствия поля атмосферного давления на уровне моря в СП (а,б,д,е) и ЮП (в,г,ж,з) по расчетам с полными ансамблями климатических моделей CMIP5 (а–г) и CMIP6 (д–з) («исторический» сценарий) и по данным реанализа ERA5 для зимнего (а, в, д, ж) и летнего (б, г, е, з) 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. Зеленая пунктирная линия характеризует стандартное отклонение (в гПа) результатов модельных расчетов относительно соответствующих оценок из данных реанализа. Номера моделей те же, что и в табл. 2

ческими моделями CMIP6 (характеризуемый коэффициентами пространственной корреляции результатов модельных расчетов с данными реанализа) существенно выше, чем по расчетам с климатическими моделями CMIP5, как зимой, так и летом. В ЮП общее соответствие модельных расчетов поля атмосферного давления (включая интенсивность ЦДА) данным реанализа ERA5 лучше для климатических моделей CMIP6, чем для климатических моделей CMIP5, но не столь существенно, как для СП.

В целом, в СП климатическими моделями лучше воспроизводятся ЦДА зимой, тогда как для ЮП подобная особенность не проявляется (рис. 3, табл. 3). Для ряда моделей в ансамблях CMIP5 и CMIP6 успешно воспроизводятся все ЦДА зимой в СП. Летом в СП по расчетам с некоторыми моделями адекватно не воспроизводится ни один ЦДА. Что касается ЮП, то не выявлено ни одной модели, по расчетам с которой воспроизводятся все ЦДА, но не отмечено и ни одной модели, которая не воспроизводит

ни один ЦДА (как зимой, так и летом, как для моделей CMIP5, так и для моделей CMIP6). При отмеченном общем улучшении воспроизведения ЦДА моделями CMIP6 по сравнению с моделями CMIP5 в обоих полушариях как зимой, так и летом (табл. 3) для некоторых ЦДА было отмечено ухудшение воспроизведения в рамках CMIP6 по сравнению со CMIP5 (например, для Маскаренского и Южно-Тихоокеанского максимумов) (рис. 4). В целом круглогодичные ЦДА воспроизводятся лучше сезонных (рис. 4). Среди всех ЦДА лучше всего воспроизводятся Южно-Тихоокеанский максимум (как для июня–июля–августа, так и для декабря–января–февраля) и Исландский минимум (для декабря–января–февраля), а хуже всего воспроизводятся Южно-Американский минимум и Антарктический максимум (рис. 4).

По результатам сравнительного анализа с данными реанализа были отобраны 9 моделей ансамбля CMIP6 (AWI-CM-1-1-MR, CAMS-CSM1-0, CIESM, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg,

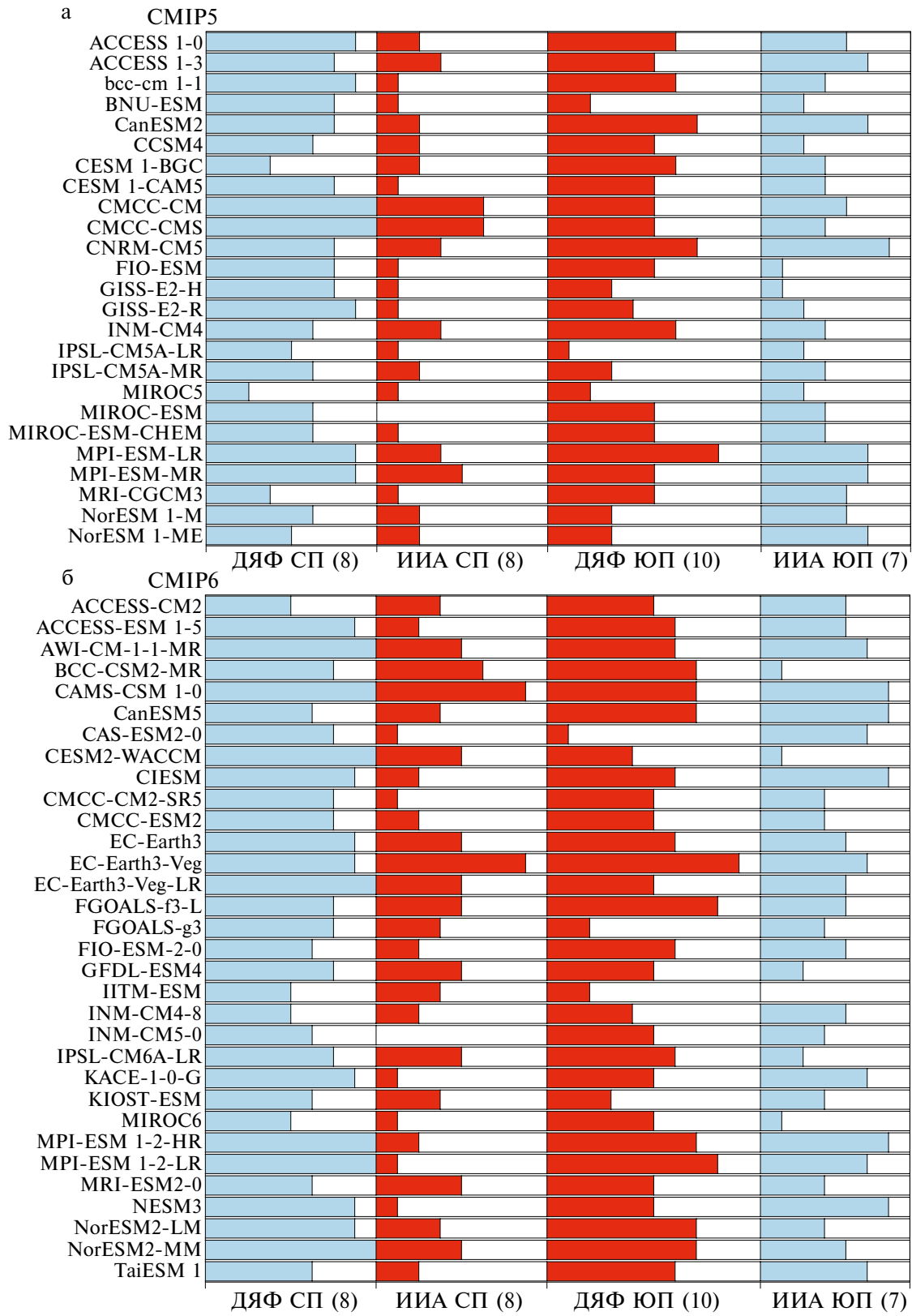


Рис. 3. Количество ЦДА, для которых отмечено согласие значений I_c (в пределах их стандартного отклонения) по данным реанализа ERA5 и по расчетам моделей CMIP5 (а) и CMIP6 (б) для разных полушарий и разных сезонов. Общее количество ЦДА для каждого полушария/сезона указано в скобках ниже. ЦДА в зимние сезоны отмечены синим цветом, в летние — красным

Таблица 3. Среднее количество успешно воспроизведенных ЦДА (в скобках указано количество анализирувавшихся зимних и летних ЦДА в каждом полушарии) по расчетам с ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 (и в процентах от общего количества ЦДА) для базового периода 1981–2005 гг.

Ансамбли	СП, зима (8)	СП, лето (8)	ЮП, лето (10)	ЮП, зима (7)
CMIP5	5.6 (70%)	2.0 (25%)	4.7 (47%)	3.3 (47%)
CMIP6	6.2 (78%)	2.9 (36%)	5.5 (55%)	3.8 (54%)

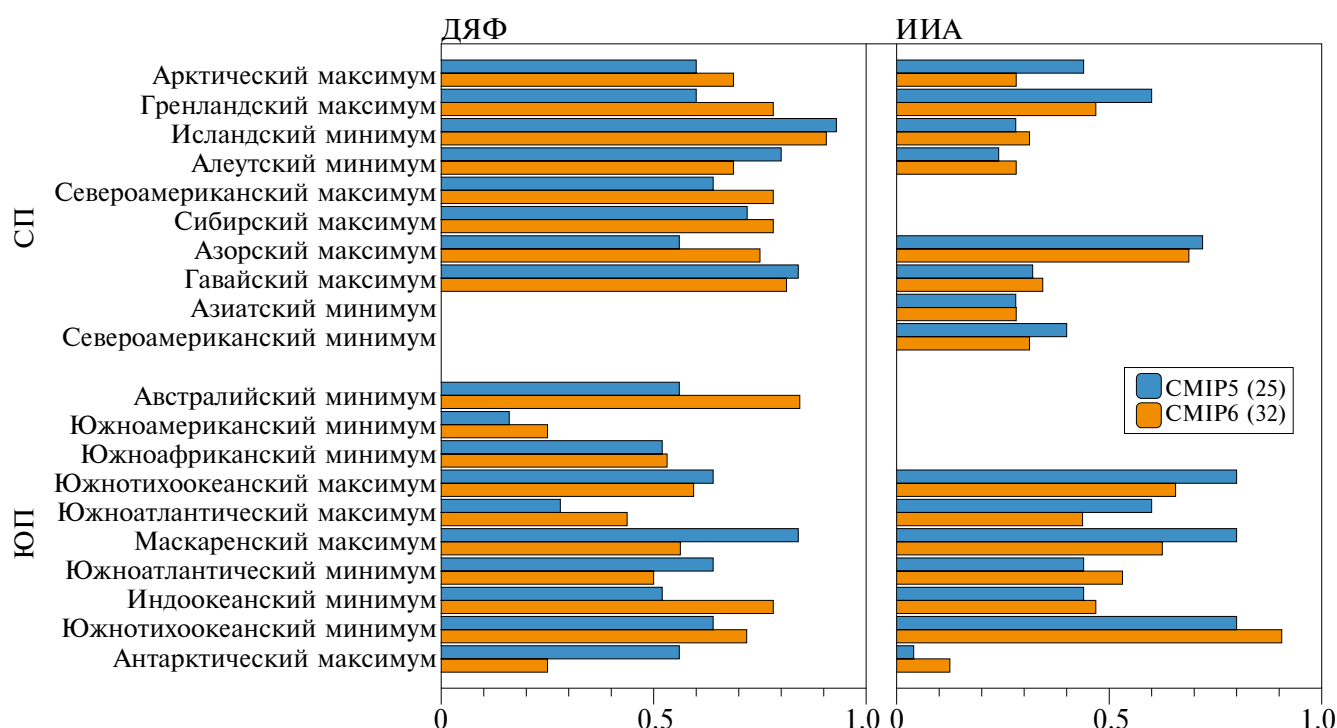


Рис. 4. Доля моделей, для которых получено согласие значений I_s (в пределах их стандартного отклонения) с соответствующими значениями по данным реанализа ERA5 для разных ЦДА для разных сезонов (в скобках отмечено общее количество моделей для каждого ансамбля)

FGOALS-f3-L, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, TaiESM1) и 8 моделей ансамбля CMIP5 (ACCESS1-0, ACCESS1-3, BCC-CSM1-1, CESM1-CAM5, CMCC-CM, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, NorESM1-ME), по расчетам с которыми наилучшим образом воспроизводятся режимы анализируемых ЦДА для базового периода в сравнении с данными реанализа.

3.2. Сравнение характеристик ЦДА по модельным расчетам и по данным реанализа для современных климатических условий

3.2.1. Северное полушарие

В табл. 4 приведены количественные оценки интенсивности I_s ключевых ЦДА в СП для зимнего и летнего сезонов, оцененные по данным

реанализа ERA5 и с использованием ансамблевых средних по расчетам со всеми и «лучшими» моделями CMIP5 и CMIP6 для базового периода 1981–2005 гг. Также представлены межгодовые стандартные отклонения. Среднесезонная интенсивность ЦДА не всегда может быть достоверно определена на фоне их межгодовой изменчивости, особенно когда она определяется согласно (1) средней аномалией давления для большой территории. Также следует учитывать моды междесятилетней изменчивости климата, влияющие на характеристики ЦДА. В частности, Северо-Атлантическое колебание связано с Исландским минимумом и Азорским максимумом.

Для ЦДА в табл. 4а получены значимые (на уровне статистической значимости 99% и выше)

Таблица 4. Интенсивность I_s [гПа] ключевых ЦДА в СП для зимнего (а) и летнего (б) сезонов, оцененная по данным реанализа ERA5 и по ансамблевым средним по расчетам со всеми анализировавшимися моделями CMIP5 и CMIP6 для базового периода 1981–2005 гг. В скобках указаны межгодовые стандартные отклонения интенсивности ЦДА. В квадратных скобках приведены соответствующие оценки для «лучших» моделей

(а)

ЦДА Северное полушарие	Зима (декабрь–январь–февраль)		
	Реанализ	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Арктический максимум	2.2 (± 3.4)	0.9 (± 3.6) [2.2 (± 3.3)]	2.3 (± 3.3) [1.9 (± 3.5)]
Гренландский максимум	–5.0 (± 3.9)	–3.3 (± 4.3) [–4.1 (± 3.7)]	–4.3 (± 4.2) [–5.0 (± 4.5)]
Исландский минимум	–10.7 (± 3.0)	–11.3 (± 2.8) [–11.2 (± 2.8)]	–11.0 (± 3.0) [–11.7 (± 3.2)]
Алеутский минимум	–9.6 (± 2.7)	–9.5 (± 3.2) [–8.5 (± 3.1)]	–9.5 (± 3.3) [–9.5 (± 3.4)]
Северо-Американский максимум	3.1 (± 1.0)	2.6 (± 1.3) [2.9 (± 1.3)]	3.0 (± 1.2) [3.2 (± 1.3)]
Сибирский максимум	10.6 (± 1.2)	10.4 (± 1.4) [11.0 (± 1.3)]	10.8 (± 1.5) [10.6 (± 1.5)]
Азорский максимум	4.9 (± 1.6)	5.2 (± 1.6) [5.3 (± 1.5)]	4.9 (± 1.8) [5.0 (± 1.8)]
Гавайский максимум	0.1 (± 2.0)	–0.1 (± 2.1) [0.2 (± 2.1)]	–0.6 (± 2.3) [–0.7 (± 2.3)]

(б)

ЦДА Северное полушарие	Лето (июнь–июль–август)		
	Реанализ	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Арктический максимум	–0.8 (± 1.6)	–1.8 (± 1.9) [–1.8 (± 1.7)]	–1.4 (± 1.7) [–1.8 (± 1.7)]
Гренландский максимум	1.5 (± 2.0)	2.6 (± 2.5) [1.7 (± 2.4)]	0.2 (± 2.3) [1.6 (± 2.2)]
Исландский минимум	0.1 (± 1.1)	0.0 (± 1.2) [–0.6 (± 1.2)]	–1.0 (± 1.3) [–0.8 (± 1.3)]
Алеутский минимум	3.4 (± 0.7)	2.1 (± 1.1) [2.2 (± 1.0)]	2.2 (± 1.1) [2.1 (± 1.2)]
Азорский максимум	8.2 (± 0.6)	5.8 (± 0.7) [5.8 (± 0.8)]	5.8 (± 0.8) [5.9 (± 0.7)]
Гавайский максимум	7.5 (± 0.6)	5.6 (± 0.8) [5.3 (± 0.8)]	5.5 (± 0.8) [5.4 (± 0.8)]
Северо-Американский минимум	0.9 (± 0.6)	–1.8 (± 0.6) [–2.8 (± 0.6)]	–3.1 (± 0.7) [–2.2 (± 0.6)]
Азиатский минимум	–8.4 (± 0.3)	–11.2 (± 0.7) [–12.0 (± 0.7)]	–11.7 (± 0.7) [–11.6 (± 0.6)]

оценки средней зимней интенсивности I_c для Азорского, Сибирского и Северо-Американского максимумов, а также 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 более низкая средняя зимняя интенсивность Алеутского минимума, оцененная по расчетам с ансамблем моделей CMIP5, находится в диапазоне стандартных отклонений относительно полученных по данным реанализа и по расчетам с ансамблем моделей CMIP6. В то же время для Гавайского и Арктического максимумов оценки средней зимней интенсивности I_c , основанные на модельных расчетах, получены статистически незначимыми (по крайней мере, на уровне значимости 95%), как и по данным реанализа для периода 1981–2005 гг. Что касается зимнего Арктического максимума, то он характеризуется максимальной межгодовой изменчивостью интенсивности.

Соответствующие оценки средней летней интенсивности ЦДА I_c в табл. 4б по модельным расчетам значимы и хорошо согласуются с оценками по данным реанализа для субтропических Азорского и Гавайского максимумов и для Азиатского минимума. При этом для областей Арктического максимума и Алеутского, Исландского и Северо-Американского минимумов по данным реанализа получены средние летние аномалии давления на уровне моря противоположного знака, хотя и незначимые для Арктического максимума и Исландского и Северо-Американского минимумов.

Стоит отметить, что для базового периода 1981–2005 гг., в отличие от оценки по данным реанализа, модельные расчеты дали положительные (хотя и незначительные) средние летние аномалии давления в области Арктического максимума. Для Северо-Американского минимума по модельным расчетам также, как и по данным реанализа, получены незначимые оценки средней летней интенсивности. Полученные результаты свидетельствуют, что ЦДА, интенсивность которых определяется согласно (1), в зимние сезоны проявляются в целом более значимо (при сравнении со среднеквадратическими отклонениями), 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 CMIP6 в целом существенно лучше, чем с ансамблем климатических моделей CMIP5. При этом согласно табл. 4 соответствие оценкам по данным реанализа для одних ЦДА лучше для отобранных моделей ансамбля CMIP6, для других ЦДА – лучше для отобранных моделей ансамбля CMIP5.

В табл. 5 приведены межмодельные СКО для интенсивности ЦДА в СП зимой и летом по расчетам с ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 и с отобранными («лучшими») моделями. Согласно табл. 5 межмодельные СКО для интенсивности ЦДА летом по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 в целом меньше, чем с ансамблем моделей CMIP5, в том числе и для отобранных («лучших») моделей. (Обратное отмечено только для Арктического антициклона летом.) Для зимних сезонов аналогичная тенденция отмечена для Арктического, Гавайского, Сибирского и Северо-Американского максимумов. Для Азорского максимума и Исландского минимума это проявляется только при учете всех моделей, без выбора «лучших». (Обратная тенденция отмечена для Алеутского минимума, а также для Исландского минимума и Азорского максимума, но только для отобранных моделей).

3.2.2. Южное полушарие

В табл. 6 представлены количественные оценки интенсивности I_c и их СКО для ключевых ЦДА в ЮП для зимнего и летнего сезонов по расчетам с полными ансамблями использовавшихся моделей и с отобранными ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 и по данным реанализа ERA5 для базового периода 1981–2005 гг.

Согласно табл. 6а в ЮП получены значимые (на уровне статистической значимости 99% и более, с превышением интенсивности ЦДА не менее трех СКО) оценки средней для зимнего сезона интенсивности I_c как по данным реанализа, так и по модельным расчетам для всех ЦДА, кроме Антарктического максимума. При этом модельные оценки интенсивности этих ЦДА в

Таблица 5. Межмодельный разброс (стандартные отклонения для базового периода 1981–2005 гг.) интенсивности ЦДА в СП зимой и летом между климатическими моделями ансамбля CMIP5 и между климатическими моделями ансамбля CMIP6 по расчетам со всеми и с «лучшими» (в квадратных скобках) моделями

ЦДА Северное полушарие	Межмодельные стандартные отклонения			
	Зима (декабрь—январь—февраль)		Лето (июнь—июль—август)	
	Модели CMIP5	Модели CMIP6	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Арктический максимум	4.0 [2.3]	2.8 [2.0]	2.0 [1.4]	2.1 [1.4]
Гренландский максимум	4.3 [1.6]	3.3 [2.2]	3.0 [1.3]	2.3 [1.5]
Исландский минимум	2.0 [1.2]	1.9 [2.0]	1.7 [1.2]	1.5 [0.9]
Алеутский минимум	2.3 [1.8]	2.4 [2.3]	1.8 [2.0]	1.7 [1.5]
Северо-Американский максимум	2.1 [1.2]	1.1 [0.8]	—	—
Сибирский максимум	1.3 [1.2]	1.1 [1.0]	—	—
Азорский максимум	2.1 [1.2]	1.5 [1.3]	0.9 [0.7]	0.9 [0.4]
Гавайский максимум	1.7 [1.0]	1.6 [0.7]	1.6 [1.3]	1.4 [1.2]
Северо-Американский минимум	—	—	2.0 [1.7]	1.9 [1.1]
Азиатский минимум	—	—	1.6 [0.7]	1.3 [0.7]

целом хорошо согласуются с полученными по данным реанализа. Соответствующие оценки средней для летних сезонов интенсивности ЦДА I_c в ЮП в табл. 6б по модельным расчетам значимы и достаточно хорошо согласуются с оценками по данным реанализа для всех ЦДА над океанами. Полученные результаты свидетельствуют, что ЦДА, интенсивность которых определяется согласно (1), в зимние сезоны проявляются в целом более значительно, чем в летние, несмотря на более сильную межгодовую изменчивость (характеризуемую СКО) интенсивности ЦДА летом. В частности, летом в ЮП плохо диагностируются особенности ЦДА циклонического типа над Южной Америкой, Африкой и Австралией, в отличие от более четких особенностей ЦДА антициклонического типа над этими континентами зимой. Антарктический антициклонический ЦДА также диагностируется неадекватно летом.

В ЮП, как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, средняя интенсивность субтропического антициклонического ЦДА над Тихим океаном для летних сезонов больше, а межгодовая изменчивость меньше, чем для зимних. При этом для субтропических антициклонических ЦДА над Атлантическим и Индийским океанами в ЮП, как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, средняя интенсивность и межгодовая изменчивость субтропических антициклонических ЦДА на для летних сезонов меньше, чем для зимних.

Для субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами в ЮП, как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, средняя интенсивность в целом больше для зимних сезонов, чем для летних, за исключением Южно-Тихоокеанского минимума при использо-

Таблица 6. То же, что и в табл. 4, но для ЮП

(а)

ЦДА Южное полушарие	Зима (июнь–июль–август)		
	Реанализ	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Австралийский максимум	4.7 (± 0.7)	6.6 (± 0.6) [6.6 (± 0.6)]	6.8 (± 0.6) [6.8 (± 0.6)]
Южно-Американский максимум	6.0 (± 0.9)	8.9 (± 0.9) [9.0 (± 1.0)]	8.5 (± 1.0) [8.5 (± 0.9)]
Южно-Африканский максимум	10.5 (± 0.7)	12.2 (± 0.9) [12.2 (± 0.8)]	12.1 (± 0.8) [12.0 (± 0.8)]
Южно-Тихоокеанский максимум	7.2 (± 1.5)	7.9 (± 1.5) [8.5 (± 1.3)]	8.5 (± 1.6) [8.1 (± 1.5)]
Южно-Атлантический максимум	9.2 (± 0.9)	10.9 (± 1.0) [11.2 (± 1.0)]	11.4 (± 1.0) [10.9 (± 1.0)]
Маскаренский максимум	11.3 (± 1.2)	12.2 (± 1.2) [13.2 (± 1.1)]	13.2 (± 1.1) [13.0 (± 1.0)]
Южно-Атлантический минимум	-15.8 (± 0.9)	-13.6 (± 1.7) [-12.8 (± 1.6)]	-13.6 (± 1.6) [-14.3 (± 1.6)]
Индоокеанский минимум	-17.8 (± 1.3)	-16.3 (± 2.0) [-16.3 (± 1.8)]	-16.6 (± 1.8) [-16.9 (± 1.8)]
Южно-Тихоокеанский минимум	-20.7 (± 4.0)	-17.7 (± 3.7) [-17.3 (± 3.8)]	-17.3 (± 3.9) [-17.9 (± 3.7)]
Антарктический максимум	2.5 (± 3.6)	1.1 (± 4.6) [-6.5 (± 4.3)]	-1.3 (± 4.3) [-0.9 (± 4.7)]

(б)

ЦДА Южное полушарие	Лето (декабрь–январь–февраль)		
	Реанализ	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Австралийский минимум	0.5 (± 0.8)	0.7 (± 0.7) [0.3 (± 0.7)]	0.5 (± 0.7) [0.3 (± 0.7)]
Южно-Американский минимум	2.6 (± 0.5)	1.7 (± 0.6) [1.8 (± 0.6)]	1.5 (± 0.6) [2.1 (± 0.5)]
Южно-Африканский минимум	4.4 (± 0.4)	4.1 (± 0.6) [4.2 (± 0.6)]	3.9 (± 0.6) [4.3 (± 0.6)]
Южно-Тихоокеанский максимум	9.8 (± 1.0)	8.7 (± 0.9) [9.3 (± 1.0)]	9.6 (± 0.9) [9.7 (± 0.9)]
Южно-Атлантический максимум	7.9 (± 0.6)	7.8 (± 0.9) [8.1 (± 0.9)]	8.3 (± 0.7) [8.2 (± 0.7)]
Маскаренский максимум	8.7 (± 0.7)	8.3 (± 0.9) [8.6 (± 0.8)]	8.8 (± 0.7) [8.7 (± 0.7)]
Южно-Атлантический минимум	-13.5 (± 1.0)	-12.2 (± 1.3) [-12.6 (± 1.4)]	-12.7 (± 1.1) [-13.1 (± 1.1)]
Индоокеанский минимум	-12.4 (± 1.1)	-11.3 (± 1.3) [-11.6 (± 1.2)]	-12.0 (± 1.1) [-12.3 (± 1.1)]
Южно-Тихоокеанский минимум	-18.3 (± 2.8)	-15.8 (± 2.9) [-16.4 (± 2.9)]	-17.6 (± 2.7) [-17.5 (± 2.6)]
Антарктический максимум	-1.7 (± 3.4)	-1.4 (± 4.1) [-6.6 (± 4.2)]	-7.4 (± 3.5) [-5.8 (± 3.5)]

вании всего ансамбля моделей CMIP6. Межгодовая изменчивость интенсивности субполярных циклонических ЦДА в ЮП летом меньше, чем зимой. При этом по данным реанализа отмечено небольшое увеличение межгодовой изменчивости интенсивности Южно-Атлантического минимума летом, по сравнению с зимой.

Согласно полученным результатам, воспроизведение ЦДА в ЮП и зимой, и летом по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 в целом существенно лучше, чем с ансамблем климатических моделей CMIP5. При этом согласно табл. 6 соответствие оценкам по данным реанализа для одних ЦДА лучше для отобранных моделей ансамбля CMIP6, для других ЦДА – лучше для отобранных моделей ансамбля CMIP5.

В табл. 7 приведены межмодельные СКО для интенсивности ЦДА в ЮП летом и зимой по расчетам с ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 и с отобранными («лучшими») моделями. Согласно табл. 7 межмодельные СКО для интенсивности ЦДА зимой по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 в целом меньше, чем с ансамблем моде-

лей CMIP5, в том числе и для отобранных («лучших») моделей. (Обратное отмечено только для Австралийского максимума для ансамбля с отобранными моделями.) Различия межмодельных СКО для интенсивности летних ЦДА по расчетам с ансамблями моделей CMIP6 и CMIP5 существенно, вплоть до знака, отличаются для разных ЦДА.

3.3. Ансамблевые модельные оценки ожидаемых изменений характеристик ЦДА в XXI веке

3.3.1. Северное полушарие

В этом разделе представлены оценки возможных изменений интенсивности ЦДА в СП по расчетам с ансамблями всех и «лучших» климатических моделей CMIP5 и CMIP6 при сценариях RCP8.5 и SSP5-8.5, соответственно (рис. 5.1, 5.2). На рис. 5.1 представлены оценки относительных (нормированных на стандартное отклонение для базового периода 1981–2005 гг.) изменений интенсивности I_c' Азорского, Сибирского и Северо-Американского максимумов

Таблица 7. То же, что и в табл. 5, но для ЮП

ЦДА Южное полушарие	Межмодельные стандартные отклонения			
	Лето (декабрь–январь–февраль)		Зима (июнь–июль–август)	
	Модели CMIP5	Модели CMIP6	Модели CMIP5	Модели CMIP6
Южно-Американский минимум	1.4 [0.9]	1.3 [0.8]	—	—
Южно-Африканский минимум	1.0 [0.3]	0.8 [0.4]	—	—
Австралийский минимум	1.2 [0.8]	0.7 [0.5]	—	—
Южно-Тихоокеанский максимум	1.5 [1.0]	1.2 [1.1]	1.5 [0.8]	1.4 [0.8]
Южно-Атлантический максимум	1.2 [1.2]	1.3 [0.9]	1.4 [0.9]	1.3 [0.8]
Маскаренский максимум	0.9 [0.5]	0.8 [0.6]	1.6 [0.8]	1.4 [0.4]
Южно-Атлантический минимум	1.4 [0.8]	1.5 [0.8]	2.4 [1.4]	2.2 [1.1]
Индоокеанский минимум	1.7 [1.2]	1.3 [0.6]	3.7 [2.0]	2.6 [0.9]
Южно-Тихоокеанский минимум	2.9 [1.7]	3.0 [2.4]	4.1 [2.3]	3.1 [1.9]
Антарктический максимум	12.2 [5.3]	6.0 [5.3]	18.8 [7.3]	11.0 [6.9]

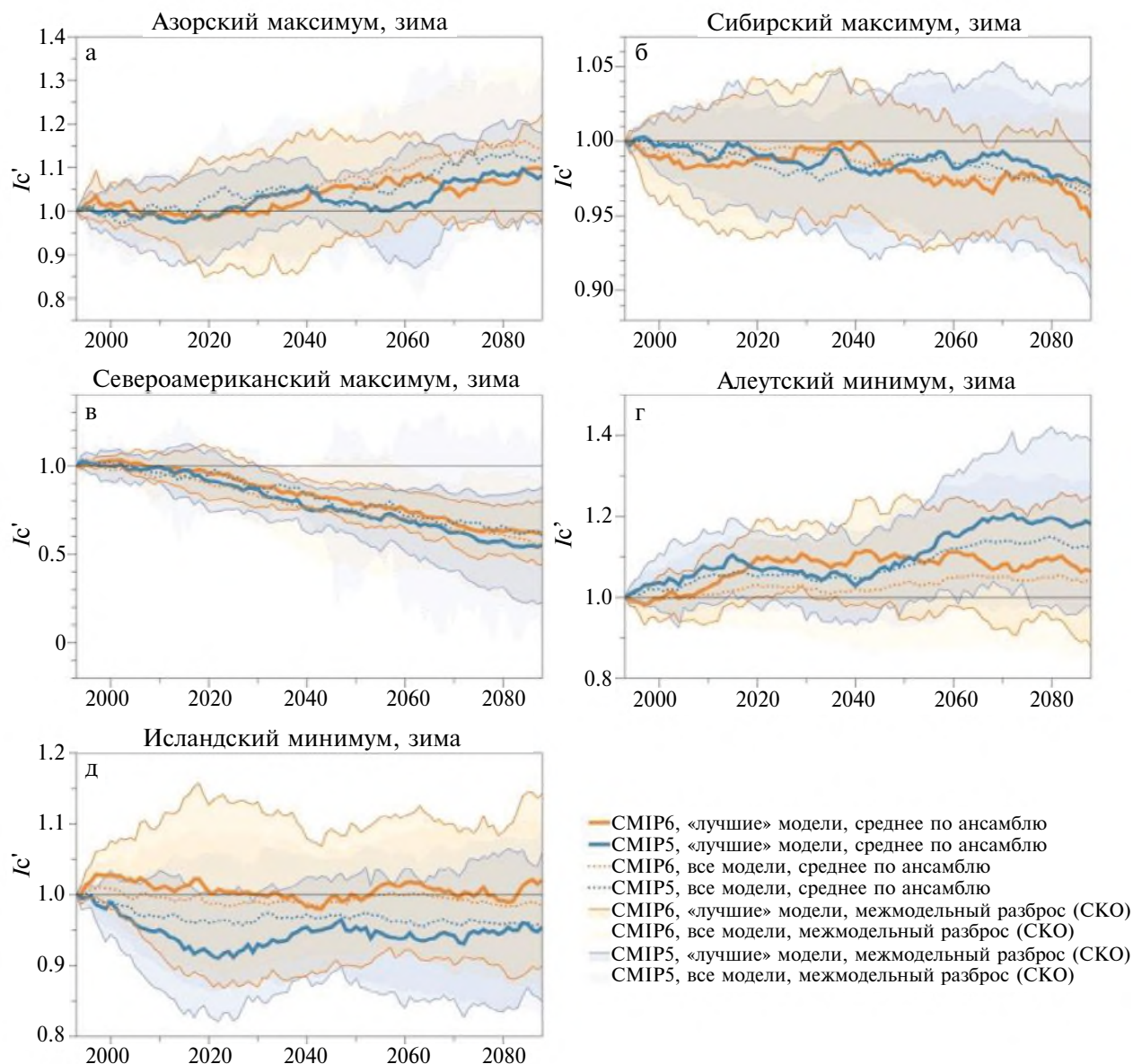


Рис. 5.1. Изменения интенсивности I_c' (нормированной на среднее значение для базового периода 1981–2005 гг.) ключевых зимних ЦДА в СП: (а) Азорский максимум, (б) Сибирский максимум, (в) Североамериканский максимум, (г) Алеутский минимум, (д) Исландский минимум. Показаны 25-летние скользящие средние для ансамблей моделей CMIP5 в сценарии RCP8.5 (синий цвет) и моделей CMIP6 в сценарии SSP5-8.5 (оранжевый цвет), обе объединены с соответствующим историческим сценарием. Толстые линии соответствуют среднему значению ансамбля; тонкие линии характеризуют диапазоны (с затенением) стандартных межмодельных отклонений. Сплошные линии представляют «лучшие» модели, пунктирные линии представляют «все» модели. Оценки $I_c' > 1$ соответствуют усилению ЦДА (как для минимумов, так и для максимумов), а $I_c' < 1$ — ослаблению ЦДА

и Алеутского и Исландского минимумов зимой в XXI в. Для этих ЦДА было получено наилучшее соответствие интенсивности по модельным расчетам и по данным реанализа для базового периода 1981–2005 гг.

Согласно рис. 5.1, изменения интенсивности различных ЦДА существенно различаются,

в том числе и по знаку. Диапазон изменчивости для различных ЦДА в целом увеличивается в XXI в. Для зимнего Азорского антициклона интенсивность существенно увеличивается к концу XXI в. при сценарии RCP8.5. Зимний Алеутский минимум также существенно усиливается, особенно по расчетам модели CMIP5.

В то же время для XXI в. отмечено снижение интенсивности Сибирского и Североамериканского максимумов и Исландского минимума зимой, наиболее существенное для Северо-Американского максимума и наименее существенное для Сибирского максимума. Интенсивность зимнего Азорского максимума увеличивается к концу XXI в. по расчетам как с моделями CMIP6, так и с моделями CMIP5, более существенно для моделей CMIP5 (рис. 5.1а). Для Исландского минимума зимой (рис. 5.1д), нормализованная интенсивность практически не изменяется по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 и незначимо уменьшается по расчетам с моделями CMIP5.

Аналогично рис. 5.1 для зимних ЦДА в СП, на рис. 5.2 показаны соответствующие изменения нормированной интенсивности Азорского и Гавайского максимумов и Азиатского минимума в летние сезоны. Значительное ослабление получено для летнего Азиатского минимума. Незначительное усиление отмечено для Гавайского максимума. Для Азорского максимума в летние сезоны, по сравнению с зимними сезонами, от-

мечены менее значительные изменения в XXI в. (рис. 5.2а). В целом, результаты расчетов изменений интенсивности ЦДА в летние сезоны с моделями CMIP6 и CMIP5 согласуются друг с другом (рис. 5.2).

3.3.2. Южное полушарие

На рис. 6.1 представлены оценки изменений в XXI в. относительной интенсивности I_c' (нормализованной на стандартное отклонение для базового периода 1981–2005 гг.) Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического, Индоокеанского, Южно-Американского, Южно-Африканского и Австралийского максимумов, а также Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического и Индоокеанского минимумов для зимних сезонов. В целом, тенденции значительного увеличения интенсивности для зимних ЦДА, общие для ансамблей моделей CMIP6 и CMIP5, проявляются в ЮП в XXI в., за исключением Южно-Американского и Южно-Атлантического максимумов, которые показывают незначительные изменения.

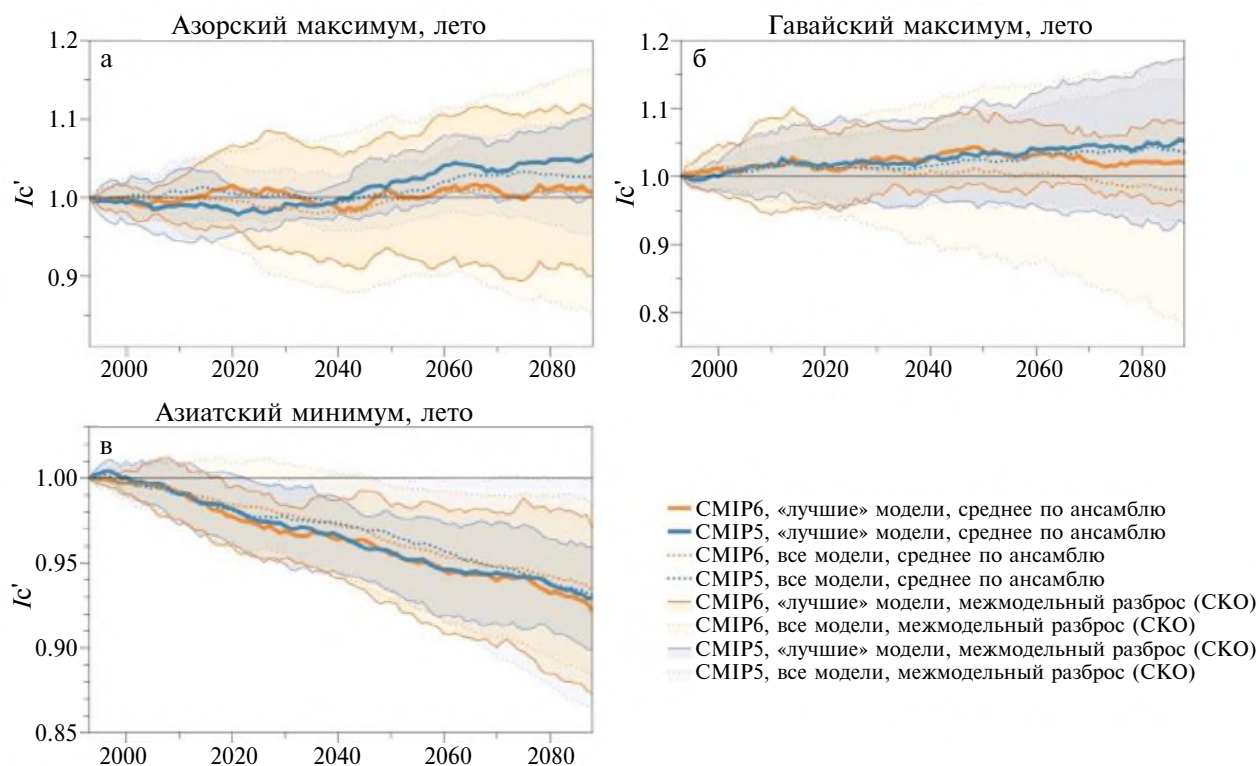


Рис. 5.2. То же, что и на рис. 5.1, но для летнего сезона (июнь–июль–август) для (а) Азорского максимума, (б) Гавайского максимума и (в) Азиатского минимума

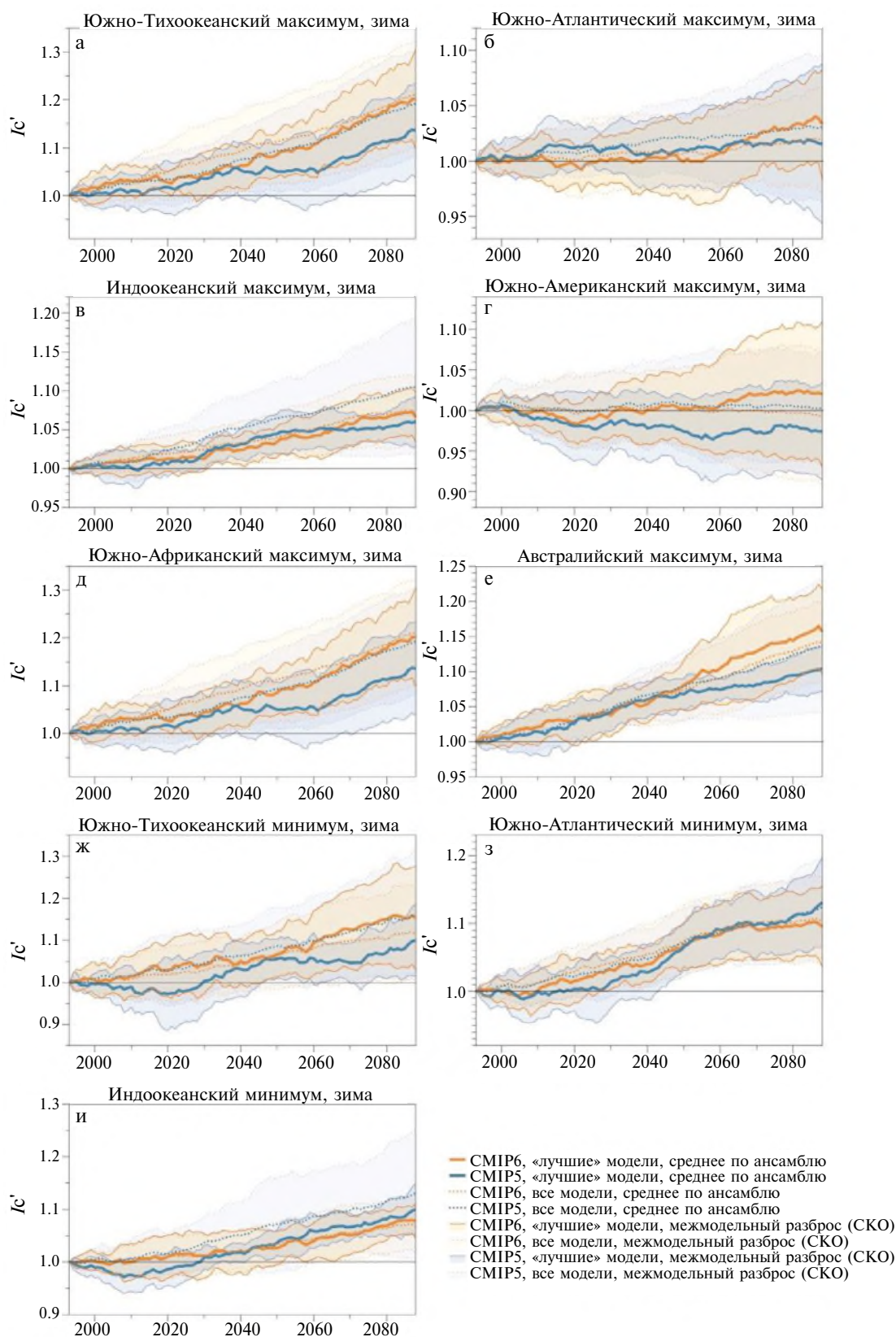


Рис. 6.1. То же, что и на рис. 5.1, но для ЮП для зимнего сезона (июнь—июль—август) для (а) Южно-Тихоокеанского максимума, (б) Южно-Атлантического максимума, (в) Индоокеанского максимума, (г) Южно-Американского максимума, (д) Южно-Африканского максимума, (е) Австралийского максимума, (ж) Южно-Тихоокеанского минимума, (з) Южно-Атлантического минимума, (и) Индоокеанского минимума

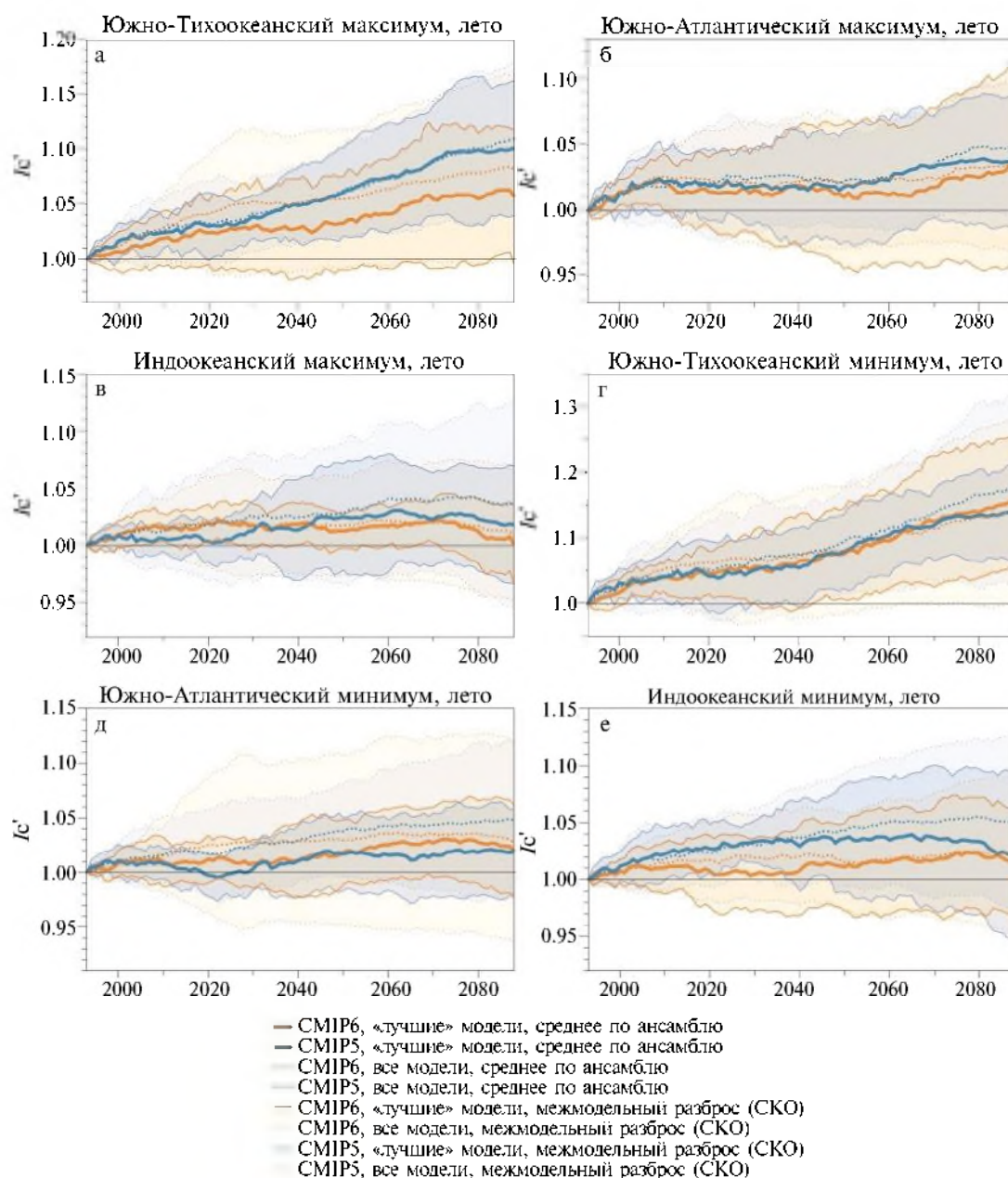


Рис. 6.2. То же, что и на рис. 5.2, но для ЮП для летнего сезона (декабрь—январь—февраль) для (а) Южно-Тихоокеанского максимума, (б) Южно-Атлантического максимума, (в) Индоокеанского максимума, (г) Южно-Тихоокеанского минимума, (д) Южно-Атлантического минимума, (е) Индоокеанского минимума

На рис. 6.2 представлены соответствующие оценки изменений относительной интенсивности ЦДА I_c' (нормализованной на стандартное отклонение для базового периода 1981–2005 гг.) в ЮП в течение XXI века для летних сезонов (декабрь—январь—февраль): Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического и Индоокеанского максимумов и Южно-Тихоокеанского, Южно-Атлантического и Индоокеанского минимумов. В целом, летом, как и зимой, отмечается общее усиление в XXI веке анализируемых ЦДА в ЮП, более су-

шественное для Южно-Тихоокеанских ЦДА. Интенсификация Южно-Тихоокеанского максимума заметно слабее согласно расчетам с ансамблем CMIP6, чем согласно расчетам с ансамблем CMIP5 в летние сезоны в отличие от зимних сезонов. Наблюдаемая относительная интенсификация соответствующих ЦДА летом, как правило, меньше, чем зимой. Наибольшее относительное увеличение интенсивности было получено для летних тихоокеанских ЦДА — субтропического максимума и субполярного минимума.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Результаты моделирования с климатическими моделями CMIP5 и CMIP6 выявили неоднозначные тенденции изменений для разных ЦДА в СП, в частности, при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в XXI в. Полученные оценки имеют разные уровни статистической значимости. С ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 наиболее согласованные оценки были получены для тенденций ослабления зимнего Северо-Американского максимума и летнего Азиатского минимума. Для зимнего Сибирского максимума тенденция ослабления получена более значимой при моделировании с ансамблем климатических моделей CMIP6.

При выявлении ЦДА и оценке тенденций их интенсивности отмечен ряд сезонных и региональных особенностей. В частности, для базового периода 1981–2005 гг., как по данным реанализа, так и по модельным расчетам, средняя интенсивность субтропических антициклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами в целом более значимо определяется для летних сезонов, чем для зимних. 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 проявляется несмотря на то, что межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА (характеризуемая стандартным отклонением) в целом больше в зимние сезоны.

В ЮП для субтропических антициклонических ЦДА над Атлантическим и Индийским океанами как по данным реанализа, так и по модельным расчетам средняя интенсивность и межгодовая изменчивость меньше для летних сезонов, чем для зимних. В то же время для субтропического антициклонического ЦДА над Тихим океаном средняя интенсивность больше для летних сезонов, чем для зимних, а межгодовая изменчивость меньше. Для субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами в ЮП как данные реанализа, так и модельные расчеты показывают, что средняя интенсивность в целом больше зимой, чем летом, за исключением Южно-Тихоокеанского минимума, когда учитывались расчеты со всеми моделями ансамбля CMIP6, рассматриваемыми

в данной работе. Межгодовая изменчивость интенсивности субполярных циклонических ЦДА в ЮП меньше летом, чем зимой. Данные реанализа выявляют небольшое увеличение межгодовой изменчивости интенсивности Южно-Атлантического минимума летом по сравнению с зимой. Согласно полученным ансамблевым модельным оценкам, в частности согласно расчетам с моделями CMIP6, проявляется общее усиление анализируемых ЦДА в ЮП летом и зимой при потеплении в XXI в. Отмеченное относительное увеличение интенсивности летних ЦДА в целом меньше, чем зимних. Наибольшее увеличение относительной интенсивности отмечено для летних тихоокеанских ЦДА — субтропического максимума и субполярного минимума.

Следует отметить, что изменчивость характеристик ЦДА и тенденции их изменения в условиях глобальных изменений климата связана с влиянием различных факторов — естественных и антропогенных. Как отмечено в [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018] (см. также [Мохов, Петухов, 2000]) изменения интенсивности ЦДА связаны с изменениями вертикального градиента температуры в тропосфере, зонального ветра в средней тропосфере и незональных аномалий приповерхностной температуры. Существенные вариации характеристик ЦДА связаны также с ключевыми квазициклическими климатическими процессами типа Эль-Ниньо [Мохов, Хон, 2005; Железнова, Гущина, 2016; Мохов и др., 2020]. С явлениями Эль-Ниньо связаны, в частности, изменения зонального ветра на уровне струйного течения и в тропосфере [Интенсивные атмосферные вихри..., 2018; Безотеческая и др., 2023]. При общем прогрессе современных климатических моделей остаются существенные проблемы в адекватном воспроизведении региональной климатической изменчивости и ее особенностей на фоне глобальных климатических изменений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленные результаты получены в рамках проекта РНФ № 24-17-00211 с использованием результатов, полученных в рамках проекта РНФ № 24-17-00357 и государственного задания Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (FMWR-2025-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безотеческая Е.А., Чхетиани О.Г., Мохов И.И. Изменчивость струйных течений в атмосфере Северного полушария в последние десятилетия (1980–2021 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 265–274.
- Блинова Е.М. Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Доклады АН СССР. 1943. Т. 39. № 7. С. 284–287.
- 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.
- Гущина Д.Ю., Петросянец М.А. О связи температуры поверхности экваториальной части Тихого океана с циркуляцией скорости ветра в центрах действия атмосферы // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 5–22.
- Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Аномалии циркуляции в центрах действия атмосферы в период Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 41–55.
- Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под. ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
- Мохов И.И., Осипов А.М., Чернокульский А.В. Центры действия атмосферы в Северном полушарии: современные особенности и ожидаемые изменения в XXI в по расчетам с ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 174–182.
- Мохов И.И., Петухов В.К. Центры действия в атмосфере и тенденции их изменения // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 3. С. 321–329.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии. Анализ данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 6. С. 723–732.
- 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.
- Переведенцев Ю.П., Исмаилов П.В., Шанталинский К.М. Центры действия и их взаимосвязь с макроциркуляционными процессами Северного полушария // Метеорология и гидрология. 1994. № 3. С. 43–50.
- 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(4). P. 045012. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045012
- 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, New York. 2013. 1535 pp.
- 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, New York, 2021. 2391 pp.
- Cohen J., Saito K., Entekhabi D. The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 299–302.
- Haurwitz B.J. The motion of atmospheric disturbances on the spherical Earth // Marine Res. 1940. V. III (1–3).
- Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Mokhov I.I., Osipov A.M., Chernokulsky A.V. Atmospheric centers of action in the Northern Hemisphere: Possible changes in the XXI st century from CMIP6 model simulations // Research Activities in Earth System Modeling, E. Astakhova (ed.), 2022. Rep. 52, S. 7, 9–10.
- Rossby C.G. et al. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centres of action // J. Marine Res. 1939. V. II (1). P. 38–55.
- Smagorinsky J. The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1953. V. 79. P. 342–366.
- Sun X.J., Wang P.X., Wang J.X.L. An assessment of the atmospheric centers of action in the northern hemisphere winter // Clim. Dyn. 2017. V. 48. P. 1031–1047.
- Trenberth K.E., Branstator G.W., Karoly D., Kumar A., Lau N.-C., Ropelewski C. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 14291–14324.
- Wallace J.M. The climatological mean stationary waves: observational evidence / In: Large-scale Dynamical Processes in the Atmosphere. Eds. B. Hoskins and R. Pearce. London, Acad. Press. 1988. P. 27–53.

ATMOSPHERIC CENTERS OF ACTION: MODERN FEATURES AND POSSIBLE CHANGES FROM SIMULATIONS WITH CMIP6 AND CMIP5 MODELS

© 2025 I. I. Mokhov^{1,2,*}, A. M. Osipov², A. V. Chernokulsky¹

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Pyzhevsky per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, bld. 2, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

The results of an analysis of changes in the characteristics of atmospheric centers of action (ACAs) in the Northern (NH) and Southern (SH) hemispheres using results of simulations with the CMIP5 and CMIP6 ensembles of climate models are presented. The ability of models to simulate ACA features is estimated for the historical scenario in comparison with ERA5 reanalysis data. The projected changes are evaluated under RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios for CMIP5 and CMIP6 models, respectively. The ACA intensity is evaluated that defined as the difference in sea level pressure averaged over the ACA region and the entire hemisphere. In NH, reanalysis and models show greater intensity of subtropical oceanic anticyclonic ACAs in summer than in winter. The opposite is found for the intensity of NH subpolar oceanic cyclonic ACAs. The interannual variability of the ACA intensity in winter is generally greater than in summer. In SH, the season with greater intensity of oceanic anticyclonic and cyclonic ACAs and its interannual variability varies from ocean to ocean. CMIP5 and CMIP6 models show substantial changes of ACAs intensity in the XXIst century. More significant trends in the strengthening of ACAs in the XXIst century appear in the SH, especially in the winter seasons. The most consistent weakening trends are found over continents for winter North American maximum and the summer Asian minimum. For the winter Siberian maximum, the weakening trend is found more pronounced in CMIP6 models than in CMIP5.

Keywords: atmospheric centers of action, climate change, modeling