

УДК 551.513.11

ИЗМЕНЕНИЕ ШТОРМ-ТРЕКОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД В УСЛОВИЯХ БУДУЩЕГО КЛИМАТА ПО РАСЧЕТАМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН СМ5

© 2022 г. Ю. В. Мартынова^а, *, П. Н. Варгин^{б, д}, **, Е. М. Володин^с, ***

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
пр. Академический, 10/3, г. Томск, 634055 Россия

^бЦентральная аэрологическая обсерватория,
Московская область, ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, 141707 Россия

^сИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, г. Москва, 119017 Россия

^дИнститут вычислительной математики РАН им. Г. И. Марчука, ул. Губкина, 8, г. Москва, 119333 Россия

*e-mail: FoxuJ13@gmail.com

**e-mail: p_vargin@mail.ru

***e-mail: volodinev@gmail.com

Поступила в редакцию 22.12.2021 г.

После доработки 04.02.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Используя результаты расчетов 5-й версии совместной климатической модели ИВМ РАН СМ5 с 2015 г. по 2100 г., выполненных в рамках проекта СМIP6 по умеренному (SSP2-4.5) и экстремальному (SSP5-8.5) сценарию роста концентраций парниковых газов, исследуется отклик шторм-треков Северного полушария на изменения климата, а также на усиление и ослабление арктического стратосферного полярного вихря. При умеренном сценарии к концу XXI века ожидается существенный сдвиг обоих шторм-треков к северу, а также небольшое усиление Северо-Тихоокеанского и ослабление Северо-Атлантического шторм-трека. При экстремальном сценарии отклик обоих шторм-треков проявляется через их усиление и в меньшей степени через сдвиг к северу. Выявлено различие в отклике Северо-Тихоокеанского и Северо-Атлантического шторм-треков на усиление и ослабление стратосферного полярного вихря в разных климатических условиях. Изменения связанного со шторм-треками вихревого потока влаги демонстрируют сравнимый с изменениями их интенсивности характер как в следствие роста концентраций парниковых газов, так и изменений стратосферного полярного вихря.

Ключевые слова: шторм-треки, вихревой поток влаги, внетропические циклоны, динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы, стратосферный полярный вихрь, моделирование климата, ИВМ РАН СМ5

DOI: 10.31857/S0002351522030087

1. ВВЕДЕНИЕ

В Северном полушарии шторм-треки (ШТ) представляют собой области сильной бароклинности, расположенные в тропосфере средних широт с максимумом вблизи $\sim 40^\circ$ с. ш. и преимущественно над океанами. Доминируют Северо-Тихоокеанский и Северо-Атлантический ШТ, которые переносят большое количество тепла, импульса и влаги к высоким широтам [1–3]. Впервые ШТ появились на морских картах еще в конце XIX века [1].

В областях ШТ, расположенных севернее Северо-Атлантического и Северо-Тихоокеанского струйных течений, происходит формирование внетропических циклонов, сопровожда-

ющихся сильными ветрами и осадками и способными привести к опасным погодным условиям, включая наводнения.

Северо-Атлантический ШТ характеризуется максимальной интенсивностью в середине зимы, в то время как Северо-Тихоокеанский ШТ – осенью и весной, а в середине зимы – ослаблением [4, 5]. С мая по август ШТ каждого сектора смещаются к северу, а с октября по декабрь – к югу [6].

По результатам анализа данных реанализа и модельных расчетов показано, что на межгодовую изменчивость ШТ влияют климатическое явление Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК), квазидвухлетние колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК), а также из-

менения стратосферного полярного вихря в Арктике. Область Северо-Тихоокеанского ШТ смещается к низким широтам и расширяется в восточном направлении в сезоны сильного Эль-Ниньо. В результате сильные циклоны приносят интенсивные осадки, сопровождаемые, например, сходами селей на западе США. Сезоны Ла-Нинья характеризуются противоположными изменениями Северо-Тихоокеанского ШТ [7]. Численные эксперименты подтверждают наблюдаемую связь между поведением Северо-Атлантического ШТ и изменением температуры воздуха в этом регионе, а также между Северо-Тихоокеанским ШТ и ЭНЮК [8]. Эта связь реализуется посредством модуляции бароклинности атмосферы в локальном масштабе. Смещение Северо-Тихоокеанского ШТ прогнозируется, в целом, лучше, чем Северо-Атлантического, из-за более сильного влияния ЭНЮК [9]. Предполагается, что межсезонная вариация ШТ может быть связана с изменениями зональной циркуляции, обусловленными аномалиями конвекции в тропиках, связанными с осцилляцией Маддена-Джулиана [10].

Стратосфера может оказывать существенное влияние на тропосферу: периоды сильного стратосферного полярного вихря часто сопровождаются положительной фазой, а ослабленного – отрицательной фазой Арктической осцилляции, являющейся доминирующей модой изменчивости климата внетропических широт Северного полушария [11]. Усиление стратосферного полярного вихря сопровождается смещением ШТ и тропосферного струйного течения к северу, а его ослабление в результате внезапных стратосферных потеплений (ВСП) – в направлении к экватору [12], которое может вносить вклад в формирование экстремально низких температур в Европе и восточной части США. Значительное усиление стратосферного полярного вихря в феврале 2020 г. [13, 14] привело к усилению тропосферного струйного течения в Северной Атлантике, которое в свою очередь вызвало рост осадков в Великобритании, достигших рекордных значений [15].

Поведение шторм-треков Северного полушария также в значительной степени определяется КДК. В течение восточной фазы КДК наблюдается смещение к высоким широтам Северо-Тихоокеанского ШТ [16]. Восточная и западная фазы КДК в зимний сезон сопровождаются смещением по высоте вниз и вверх Северо-Атлантического ШТ соответственно.

В условиях сильного стратосферного полярного вихря в середине зимы может наблюдаться ослабление Северо-Атлантического ШТ, при том, что в целом за зимний сезон он более сильный, чем при ослабленном вихре [17]. С использованием данных с высоким пространственным и временным разрешением (~14 км и 3 ч) для региона Северной Атлан-

тики показано, что после возникновения ВСП в течение 30 дней наблюдается смещение Северо-Атлантического ШТ к низким широтам [18].

Анализ изменений ШТ после 24 ВСП с 1979 г. по 2019 г., выявленных в данных реанализа ERA-Interim, показал, что большая часть этих событий (2/3) сопровождается сдвигом к низким широтам и ослаблением Северо-Атлантического ШТ, а также расширением Северо-Тихоокеанского ШТ к высоким широтам и в восточном направлении [19]. Оставшаяся часть ВСП сопровождается смещением Северо-Атлантического ШТ к высоким широтам. Предположительно эти различия обусловлены особенностями погодных условий и распространением волн синоптического масштаба из субтропиков Тихого океана к Атлантике.

Учитывая значительное влияние ШТ на погодные условия, изменения ШТ из-за наблюдаемого изменения климата исследовались с использованием результатов моделирования. Выявлено значимое изменение интенсивности и смещение ШТ Северного полушария к северу [20–22], а также относительно небольшие изменения в их активности по высоте [23]. Предполагается, что значительный вклад в сдвиг ШТ вносит поведение ячейки Гадлея [24].

Предполагается, что смещение ШТ по направлению к высоким широтам связано с изменением зональной циркуляции [25]. Вместе с тем в зимний период возможно удлинение Северо-Атлантического ШТ к Европе и его ослабление в высоких широтах вследствие ослабления меридионального градиента температуры и усиливающегося потепления в Арктике [26].

Исследования, проведенные с ансамблевыми расчетами климатических моделей проектов CMIP3/5/6 (Climate Model Intercomparison Project Phase 3/5/6), показали схожесть в характере отклика ШТ Северного полушария на ожидаемые климатические изменения, задаваемые различными поколениями климатических сценариев [27]. Интересно, что отклик ШТ на изменение климата по умеренному сценарию в расчетах моделей проекта CMIP6 сильнее (для Северо-Атлантического ШТ на 50%), чем в проекте CMIP5, что отражает большую чувствительность более современных версий климатических моделей проекта CMIP6. Известно, что к важнейшим проблемам современной науки о климате относится различие в величине равновесной чувствительности климатических моделей к росту концентраций парниковых газов.

В настоящей работе исследуется отклик ШТ Северного полушария на ожидаемые в XXI веке климатические изменения с использованием расчетов климатической модели ИВМ РАН. Результаты анализа изменений параметров климата тропосферы в течение XXI века в расчетах этой модели

показали, что величина глобального потепления, предсказываемая ей меньше, чем у других моделей проекта CMIP6 [28]. Даже по экстремальному сценарию не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда. Связь естественной изменчивости климата и чувствительности модели климата ИВМ РАН к увеличению концентрации CO₂ обсуждается в работе [29].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено с использованием расчетов 5-й версии климатической модели ИВМ РАН [28, 30] для периода с 2015 г. по 2100 г. Пространственное разрешение модели ИВМ CM5 в атмосфере составляет: 2° × 1.5° по долготе и широте, по вертикали 73 уровня от поверхности до 0.2 гПа (~60 км). Пространственное разрешение в океане: 0.5° × 0.25° и 40 вертикальных уровней. Океанический модуль включает блок расчета морского льда. По сравнению с предыдущей версией пространственное разрешение в океане в 2 раза точнее, добавлены блоки, отвечающие за расчет параметров почвы, подстилающей поверхности и вегетации. Модули, отвечающие за океан и атмосферу, обмениваются данными каждые 2 ч.

Расчеты для условий будущего климата задавались по умеренному и экстремальному (жесткому) сценариям роста парниковых газов (SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно) [31]. Первый сценарий характеризует относительно умеренный рост антропогенного воздействия на окружающую среду с максимальной эмиссией парниковых газов в середине XXI века и с последующим ее плавным снижением. При этом радиационный форсинг к концу XXI века составит 4.5 Вт/м², а рост глобальной температуры вблизи поверхности достигнет 2.5°C. Экстремальный сценарий соответствует условиям продолжающегося интенсивного развития промышленности, использующей углеводороды, и с активной разработкой территорий под сельскохозяйственные угодья. Эмиссии парниковых газов при этом достигнут максимума к концу XXI века, приведя к усилению радиационного форсинга до 8.5 Вт/м² и увеличения глобальной температуры на 5°C.

Сравнение результатов модельных экспериментов по сценарию резкого 4-кратного увеличения содержания CO₂ показало, что воспроизведение моделью ИВМ РАН изменений циркуляции стратосферы близко к средним показателям других моделей [32].

Основные параметры ШТ Северного полушария в расчетах модели ИВМ РАН, а также их отклик на ослабление и усиление стратосферного полярного вихря и на Арктическое усиление, для условий современного климата воспроизводятся

достаточно реалистично и согласуются с аналогичными параметрами, выявленными в данных реанализа NCEP и ERA-Interim [33]. Увеличение пространственного разрешения в модели ИВМ РАН позволяет улучшить воспроизведение поведения ШТ Северного полушария для периода современного климата [34]. Аналогичный результат был выявлен и для других моделей [35, 36].

Анализ влияния на ШТ Арктического усиления в расчетах климатической модели ИВМ РАН для условий современного климата (сравнении двух периодов с 1998 по 2014 гг. и с 1980 по 1997 гг.) выявил ослабление Северо-Атлантического ШТ и смещение Северо-Тихоокеанского к высоким широтам. Аналогичные изменения ШТ выявлены в данных реанализа [33].

Данные расчетов модели ИВМ РАН CM5 для условий современного и будущего климата размещены в архиве проекта CMIP6 [37].

В работе были использованы данные с суточным разрешением по времени.

После применения к ежедневным данным высокочастотного фильтра [38] рассчитывалась интенсивность (амплитуда) ШТ согласно [2], позволяющая выявить изменчивость синоптических масштабов:

$$\overline{v'v'} = \overline{[v(t+24h) - v(t)]^2}, \quad (1)$$

где $v(t)$ и $v(t+24h)$ — соответственно текущий и следующий шаг по времени, надстрочная линия обозначает осреднение за месяц.

Аналогично рассчитывался вихревой поток влаги в атмосферу на север:

$$\overline{v'q'} = \overline{[v(t+24h) - v(t)][q(t+24h) - q(t)]}, \quad (2)$$

где q — удельная влажность воздуха. Величина $\overline{v'v'}$ представляет собой вихревую кинетическую энергию. Через вихревой поток влаги $\overline{v'q'}$ оценивается перенос скрытого тепла, связанного с испарением и конденсацией.

Тенденции изменения интенсивности ШТ определялись как различия между значениями $\overline{v'v'}$ или $\overline{v'q'}$, осредненными за 20-летние интервалы времени в начале и в конце периода моделирования: 2015–2035 гг. и 2080–2100 гг. Оценка статистической значимости различий осуществлялась с помощью критерия Стьюдента. Важно отметить, что критерий Стьюдента справедлив, строго говоря, только для нормально распределенных величин. Синоптические же аномалии часто бывают негауссовыми [39–41]. В связи с этим, воспользовавшись W/S-тестом [42], мы проверили оценку соответствия распределения $\overline{v'v'}$ и $\overline{v'q'}$ нормальному для всего периода с 2015 по 2100 гг. Проверка нормальности распределе-

ния была проведена отдельно для каждого месяца и для каждого узла пространственной сетки для Северного полушария. В результате при $\alpha = 0.01$ нормальность распределения была подтверждена для подавляющего большинства узлов сетки анализируемого диапазона высот (от 1000 до 50 гПа для $\overline{v'v'}$ и от 1000 до 250 гПа для $\overline{v'q'}$). Таким образом, критерий Стьюдента может быть использован для оценки статистической значимости получаемых различий.

Для исследования влияния изменений динамики стратосферы Арктики на ШТ рассматривались зимние сезоны с октября по апрель с выявленным усилением и ослаблением стратосферного полярного вихря и непрерывным распространением из средней стратосферы в тропосферу зонально осредненных аномалий геопотенциала в области 60–90° с. ш., нормированных на среднеквадратическое отклонение и превышающих по модулю выбранное пороговое значение 1.5 σ , как было предложено [43]. Ранее для условий современного климата с использованием этого критерия было показано, что распространение аномалий циркуляции стратосферы Арктики в тропосферу в расчетах модели ИВМ РАН занижено по сравнению с данными реанализа [44].

В расчетах будущего климата было выделено по 8 зимних сезонов с усилением и ослаблением стратосферного полярного вихря для умеренного сценария и по 9 сезонов для экстремального сценария (табл. 1). Выделенные сезоны распределены достаточно равномерно в течение XXI века. Для каждого составленного из выявленных зимних сезонов композита рассчитывалась интенсивность ШТ ($\overline{v'v'}$) и вихревой поток влаги ($\overline{v'q'}$), осредненные за месяц или за сезон.

Таблица 1. Зимние сезоны с усилением и ослаблением стратосферного полярного вихря для умеренного (SSP2-4.5) и экстремального (SSP5-8.5) сценария

SSP2-4.5		SSP5-8.5	
Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление
2017–2018	2015–2016	2018–2019	2016–2017
2031–2032	2022–2023	2019–2020	2021–2022
2032–2033	2025–2026	2030–2031	2028–2029
2037–2038	2041–2042	2063–2064	2032–2033
2047–2048	2046–2047	2083–2084	2043–2044
2072–2073	2052–2053	2085–2086	2045–2046
2079–2080	2062–2063	2094–2095	2051–2052
2098–2099	2066–2067	2096–2097	2070–2071
		2098–2099	2084–2085

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Тенденции изменений шторм-треков

Выявлена заметная чувствительность ШТ к состоянию климатической системы. В условиях умеренного климатического сценария к концу XXI века ожидается заметное смещение обоих ШТ к высоким широтам (рис. 1а). Для Северо-Тихоокеанского ШТ выявлено небольшое увеличение средней за зимний сезон интенсивности, тогда как для Северо-Атлантического ШТ она остается без изменения.

При экстремальном сценарии в среднем за зимний сезон выявлено не столько смещение ШТ к высоким широтам, сколько усиление их амплитуды на одинаковую величину (рис. 1г). Кроме того, к концу XXI века по этому сценарию ожидается существенное расширение каждого ШТ в меридиональном направлении.

Одновременно с изменениями интенсивности ШТ происходит перераспределение вихревых потоков влаги на более низких высотах. Для обоих сценариев характер различий между полями $\overline{v'q'}$ на 700 гПа схож с различиями, полученными для $\overline{v'v'}$ на 250 гПа. При умеренном сценарии в большей степени проявляется сдвиг областей наибольшей интенсивности вихревых потоков влаги, а при экстремальном – усиление этих потоков (рис. 1в, 1е). Высоты 500 гПа для обоих сценариев достигают только положительные аномалии $\overline{v'q'}$ (рис. 1б, 1д). Для обеих рассмотренных высот величина изменений $\overline{v'q'}$, при экстремальном сценарии должна значительно превысить изменения при умеренном.

Анализ отклика ШТ на будущие климатические изменения для каждого месяца с октября по март выявил ряд особенностей. Для умеренного сценария выявлено смещение Северо-Тихоокеанского ШТ к северу с октября по февраль. Одновременно с этим ожидается усиление его интенсивности (максимальное в декабре). Для Северо-Атлантического ШТ получен существенно менее выраженный отклик: к концу XXI века он так же смещается к северу, но уже с ноября по февраль и с небольшим ослаблением (максимальное в январе) (рис. 2а).

В условиях экстремального сценария в отличие от умеренного ожидается не столько сдвиг, сколько расширение обоих ШТ с усилением его интенсивности в центре (рис. 2в). Так усиление интенсивности для Северо-Тихоокеанского ШТ выявлено с октября по март. Одновременно с января по март ожидается его расширение с ослаблением интенсивности на южной границе и усилением на северной с последующим смещением в более высокие широты. Величина отклика, полученная для интенсивности Северо-Тихоокеанского ШТ

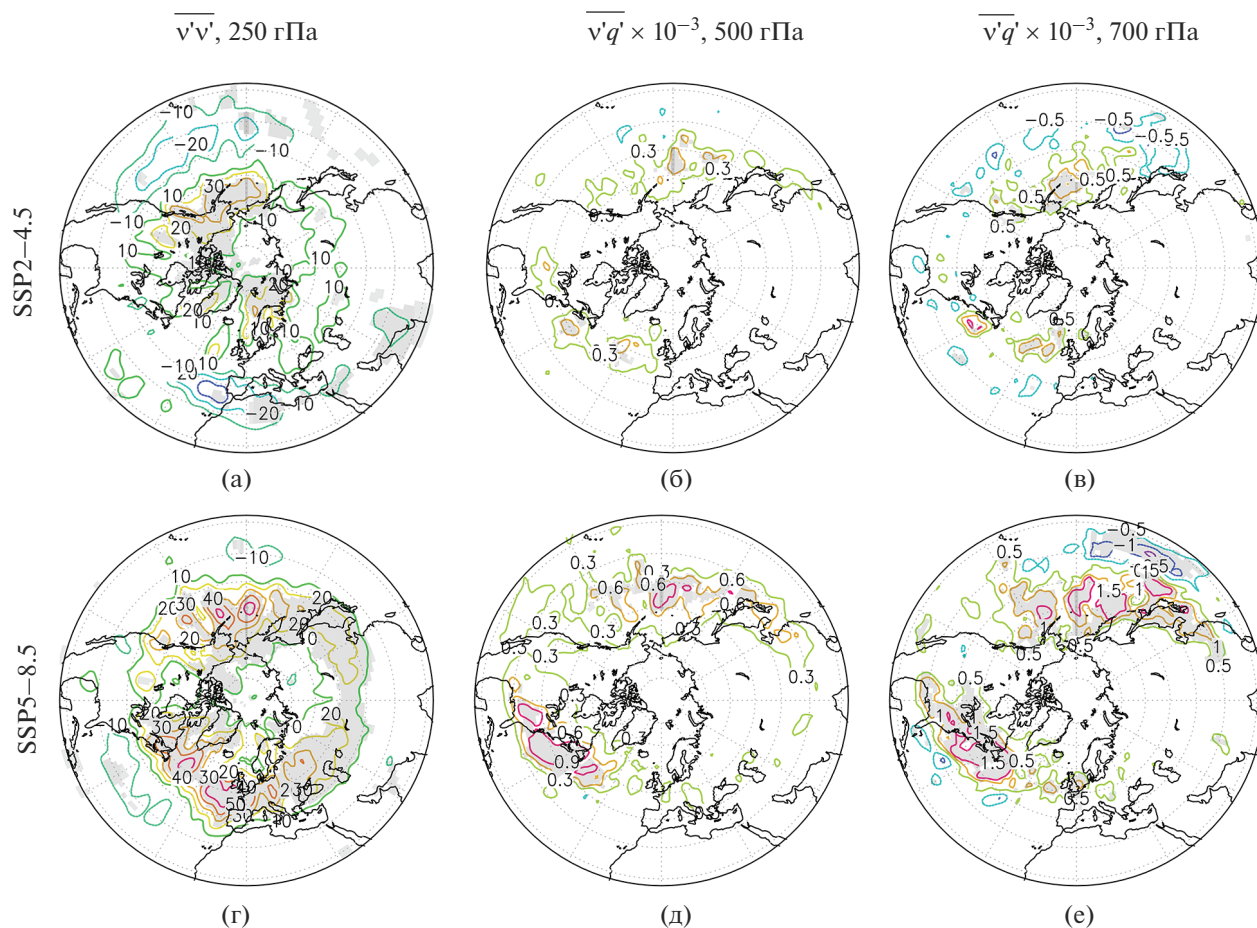


Рис. 1. Различия интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$ (а, г) и вихревого потока влаги $\overline{v'q'} \times 10^{-3}$ (б, в, д, е), осредненных за зимний сезон между периодами 2080–2100 гг. и 2015–2035 гг. для умеренного (а, б, в) и экстремального (г, д, е) сценария. Серая заливка – область статистически значимого различия для $\alpha = 0.05$.

при экстремальном сценарии сопоставима с полученной для умеренного сценария.

Для Северо-Атлантического ШТ ожидаются иные изменения (рис. 2в). В условиях экстремального сценария он значительно усиливается к концу XXI века. В октябре и ноябре отклик на изменения климата почти полностью отсутствует. В декабре возможен резкий рост его интенсивности и расширение с последующим смещением к северу в январе и феврале.

Вихревой поток влаги в тропосфере ведет себя схожим с интенсивностью ШТ образом. При умеренном сценарии для обоих ШТ получено широтное перераспределение значений $\overline{v'q'}$ (рис. 2б). При этом больший отклик демонстрирует Северо-Тихоокеанский ШТ. При экстремальном сценарии получено в большей степени усиление вихревых потоков влаги в атмосферу на север (рис. 2г).

Для рассмотренных климатических сценариев изменение интенсивности не локализуется исключительно на рассматриваемой высоте опреде-

ления ШТ (250 гПа), а распространяется вверх и вниз от этого уровня через тропосферу, достигая нижней стратосферы (рис. 3а, 3в). Аномалии вихревого потока влаги также не локализованы на рассматриваемых высотах (рис. 3б, 3г). Максимум этих аномалий проявляется на высоте 700 гПа и распространяется с уменьшением значения вниз до поверхности и вверх до высоты 300 гПа.

3.2. Влияние изменений стратосферы Арктики

Сравнение композитов, составленных для условий усиления и ослабления стратосферного полярного вихря позволило выявить особенности отклика ШТ.

Для умеренного климатического сценария получено заметное различие в отклике Северо-Атлантического и Северо-Тихоокеанского ШТ к изменениям стратосферного полярного вихря. При усилении вихря ожидается ослабление Северо-Тихоокеанского ШТ в высоких широтах. При этом

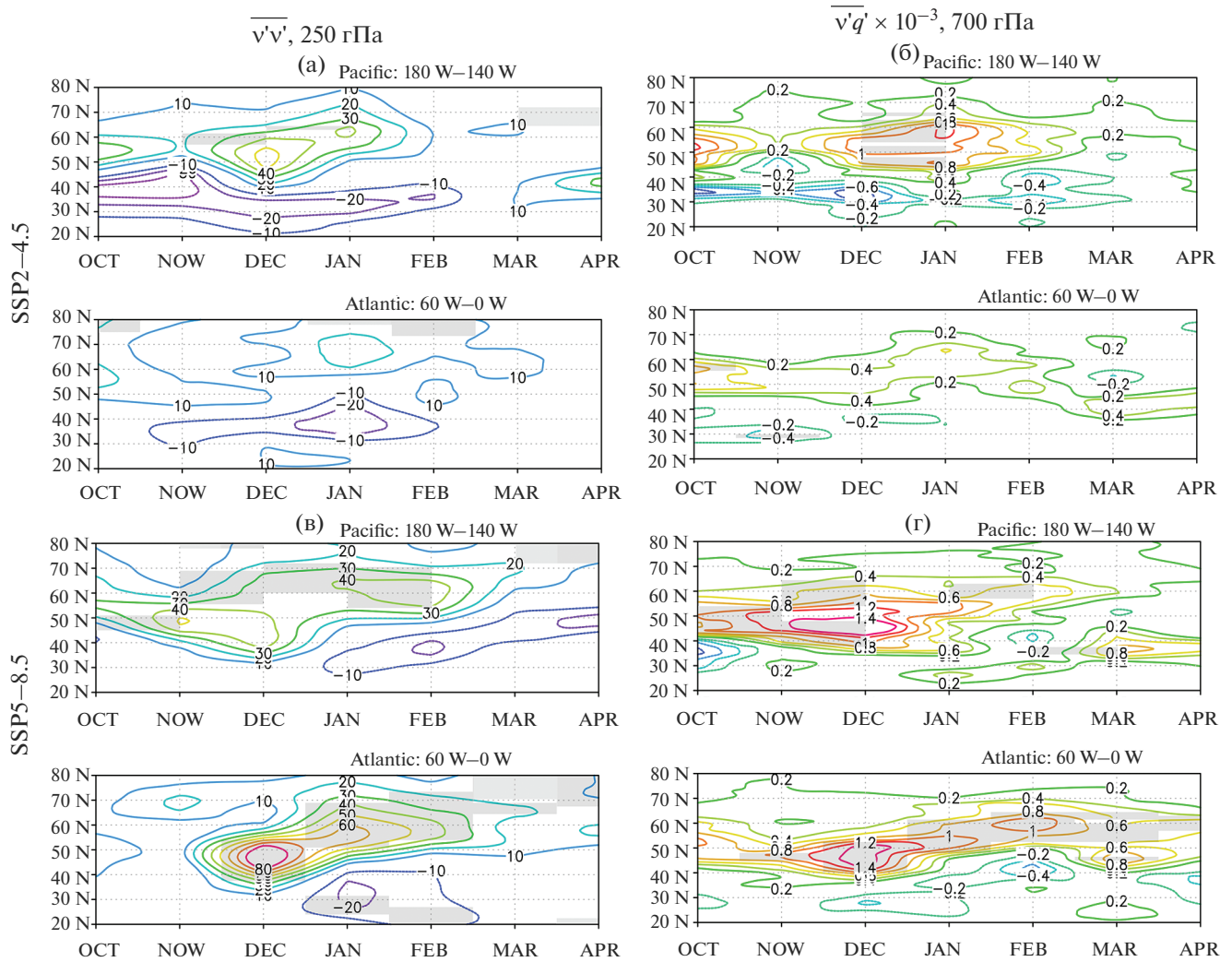


Рис. 2. Широтно-временная диаграмма различия среднемесячных значений интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$ (а, в) и вихревого потока влаги $\overline{v'q'} \times 10^{-3}$ (б, г) для Тихоокеанского и Атлантического ШТ для умеренного (а, б) и экстремального (в, г) сценария. Серая заливка – статистически значимая разница для $\alpha = 0.05$.

смещение к низким широтам выражено только в январе. Для Северо-Атлантического ШТ выявлены противоположные изменения: смещение к высоким широтам при усилении стратосферного полярного вихря по сравнению с периодами его ослабления (рис. 4а). И только в январе наблюдается смещение Северо-Атлантического ШТ к низким широтам. Широтное перераспределение вихревых потоков влаги демонстрирует схожий с интенсивностью ШТ характер (рис. 4б).

Сравнение изменений интенсивности ШТ проводилось для осредненных значений по области расположения их максимума: 40–50° с. ш. для Северо-Атлантического ШТ и 45–55° с. ш. для Северо-Тихоокеанского ШТ (рис. 5а). Северо-Тихоокеанский ШТ обладает большей интенсивностью в условиях ослабления стратосферного полярно-

го вихря в декабре, январе и марте; и в условиях усиления в ноябре. Северо-Атлантический ШТ демонстрирует противоположные по знаку различия и сдвиг по времени, равный одному месяцу. Его интенсивность больше для условий усиления вихря в ноябре, декабре, феврале и марте.

Вихревой поток влаги при умеренном сценарии для Северо-Тихоокеанского ШТ демонстрирует наличие аномалий в те же месяцы и аналогичного знака, что и интенсивность этого ШТ (рис. 5б). Для Северо-Атлантического знака аномалии $\overline{v'q'}$ совпадает с $\overline{v'v'}$, но наибольшие ее значения проявляются в январе и марте.

При экстремальном сценарии, в отличие от умеренного, для Северо-Тихоокеанского ШТ не ожидается изменений в его расположении (рис. 4в).

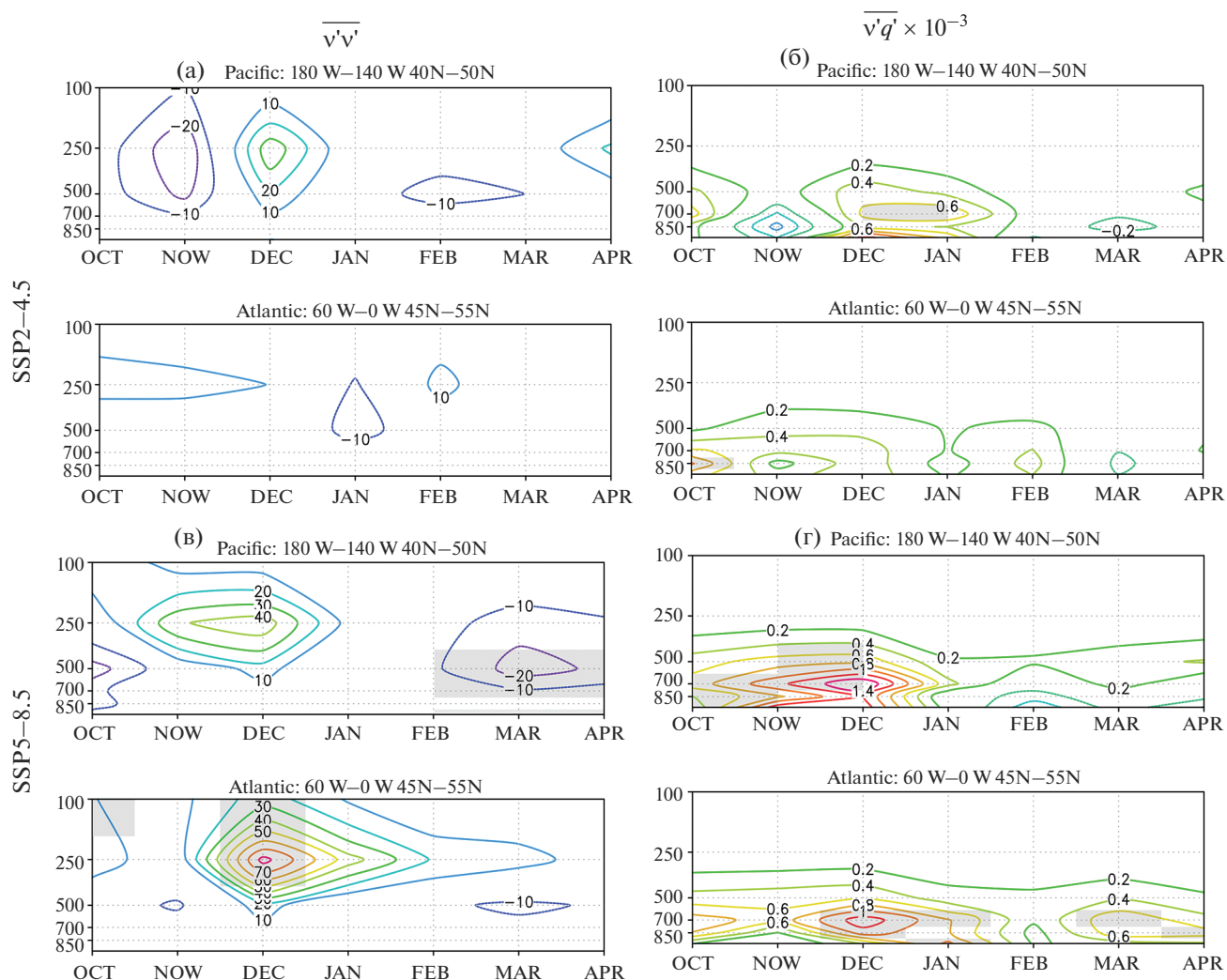


Рис. 3. Высотно-временная диаграмма различия среднемесячных значений интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$ (а, в) и вихревого потока влаги $\overline{v'q'} \times 10^{-3}$ (б, г) для Тихоокеанского и Атлантического ШТ для умеренного (а, б) и экстремального (в, г) сценария. Серая заливка – статистически значимая разница для $\alpha = 0.05$.

Небольшое смещение выявлено только для февраля. Однако, получены более сильные, чем при умеренном сценарии, различия в интенсивности. С октября по январь его интенсивность больше при усилении стратосферного полярного вихря, а в марте и апреле – при его ослаблении. В декабре различие распространяется вплоть до нижней тропосферы (рис. 5в). Различия между композициями Северо-Атлантического ШТ носит своего рода колебательный характер как для его расположения, так и для интенсивности (рис. 4в). В ноябре в условиях ослабления стратосферного полярного вихря, в сравнении с его усилением, Северо-Атлантического ШТ слабее, но имеет большую ширину. В декабре знак различия расположения меняется на противоположный. В январе получено более северное расположение Северо-Атлантиче-

ского ШТ при ослаблении вихря, и более южное с существенным увеличением интенсивности – при его усилении. С февраля по апрель в обоих композитах он располагается в одинаковых широтах, но их интенсивность существенно отличается. Северо-Атлантический ШТ демонстрирует большую интенсивность в феврале и апреле при усилении, и в марте при ослаблении вихря. Характер аномалий вихревого потока влаги при различных условиях состояния вихря полностью совпадает с характером аномалий интенсивности обоих ШТ (рис. 4г, 5г).

Анализируя динамику различий поведения ШТ при разных условиях во времени, удалось выявить сезоны с однородными изменениями. Под такими сезонами подразумевается три последовательных месяца, в течение которых характер раз-

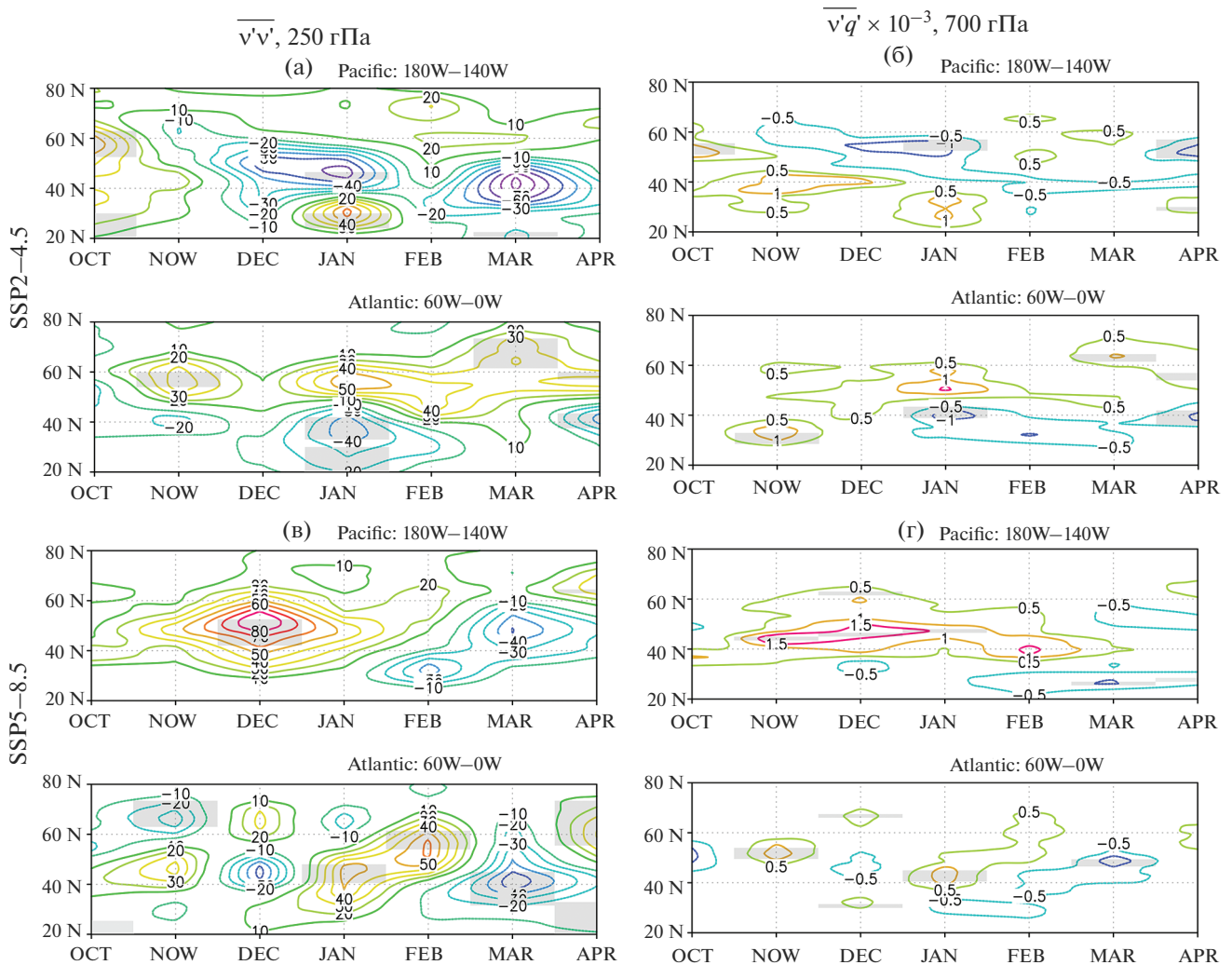


Рис. 4. Широтно-временная диаграмма различия между композитами усиления и ослабления стратосферного полярного вихря для среднемесячных значений интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$ (а, в) и вихревого потока влаги $\overline{v'q'} \times 10^{-3}$ (б, г) для Тихоокеанского и Атлантического ШТ для умеренного (а, б) и экстремального (в, г) сценария. Серая заливка – статистически значимая разница для $\alpha = 0.1$.

личий в поведении ШТ кардинально не менялся. Таким образом, можно рассматривать горизонтальное распределение различий на высоте максимума ШТ – 250 гПа, осредненное за эти сезоны. Для рассмотрения были выделены сезоны: ноябрь–декабрь–январь (NDJ), декабрь–январь–февраль (DJF) и февраль–март–апрель (FMA) (рис. 6). При переходе от сезона к сезону для умеренного сценария получено смещение областей различий в интенсивности обоих ШТ в направлении по часовой стрелке вдоль круга широты.

Для экстремального сценария характер изменения различий отличается от выявленного ранее для умеренного сценария. Снижение интенсивности в условиях усиления и ее увеличение в условиях ослабления стратосферного полярного вихря выявлено для Северо-Тихоокеанского ШТ.

Смещение областей различий происходит только к концу зимы-весне. При этом Северо-Атлантический ШТ проявляет существенно меньший отклик на различия условий стратосферы. При переходе от сезона к сезону он сначала немного усиливается, а затем смещается к северу.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате климатических изменений происходит изменение и перераспределение, в частности, региональных вертикальных и горизонтальных градиентов температуры. Эти изменения наиболее сильно проявляются в умеренных и Арктических широтах, что влияет на расположение и интенсивность ШТ, определяющих формирование внетропических циклонов, переносящих

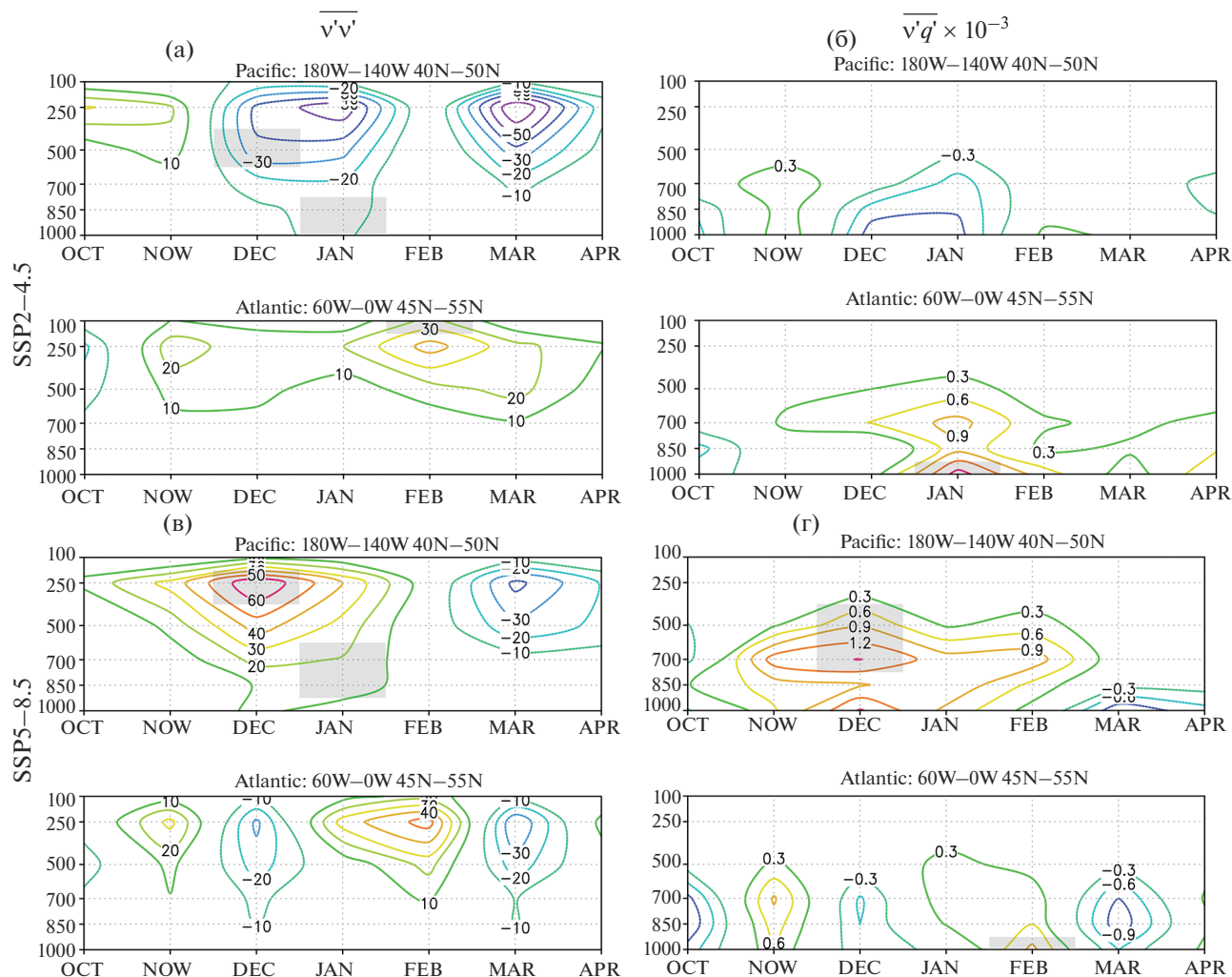


Рис. 5. Высотно-временная диаграмма различия между композитами усиления и ослабления стратосферного полярного вихря для среднемесячных значений интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$ (а, в) и вихревого потока влаги $\overline{v'q'} \times 10^{-3}$ (б, г) для Тихоокеанского и Атлантического ШТ для умеренного (а, б) и экстремального (в, г) сценария. Серая заливка – статистически значимая разница для $\alpha = 0.1$.

большое количество тепла, импульса и влаги к высоким широтам.

На основе анализа результатов расчетов климатической модели ИВМ РАН CM5 по умеренному и экстремальному сценарию роста концентраций парниковых газов в течение XXI века выявлены существенные различия между откликом Северо-Тихоокеанского и Северо-Атлантического ШТ.

При умеренном сценарии (SSP2-4.5) к концу XXI века происходит существенный сдвиг обоих ШТ к северу. Выявлено небольшое усиление Северо-Тихоокеанского и ослабление Северо-Атлантического ШТ. Северо-Тихоокеанский ШТ проявляет большую, чем Северо-Атлантический, чувствительность к климатическим изменениям. При экстремальном сценарии (SSP5-8.5), наобо-

рот, большую чувствительность проявляет Северо-Атлантический ШТ. Отклик обоих ШТ проявляется через их усиление и в небольшой степени через сдвиг к северу. Для обоих сценариев изменение интенсивности не локализуется исключительно на высоте определения максимальной интенсивности ШТ (250 гПа), а распространяется вверх и вниз от этого уровня через тропосферу, достигая нижней стратосферы.

Поскольку ШТ представляют собой области сильной бароклинности, то их интенсивность, соответственно, зависит от горизонтального градиента температуры и степени вертикальной неустойчивости атмосферы. При увеличении антропогенного воздействия происходит существенное сокращение площади льдов и рост аккумуляции тепла в Арктике, и, как следствие, уменьшение горизонтального

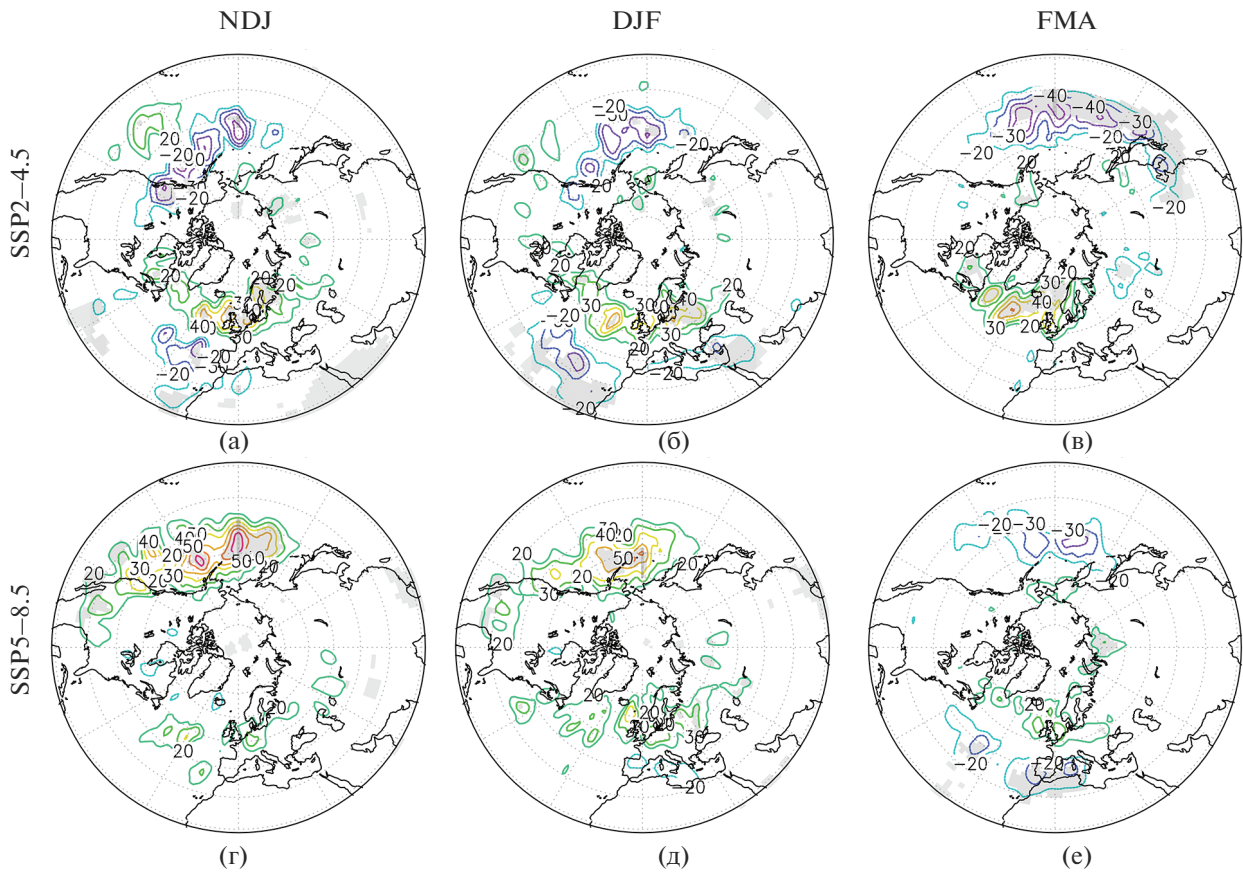


Рис. 6. Различия между композитами усиления и ослабления стратосферного полярного вихря для значений интенсивности ШТ $\overline{v'v'}$, осредненных за ноябрь-январь (а, г); декабрь-февраль (б, д); и февраль-апрель (в, е) для умеренного (а, б, в) и экстремального (г, д, е) сценария для высоты 250 гПа. Серая заливка – статистически значимая разница для $\alpha = 0.05$.

градиента температуры. Этот фактор способствует снижению интенсивности ШТ совместно с расширением этих областей. Второй из приведенных факторов, вертикальная устойчивость атмосферы, может в существенной степени определяться вертикальными потоками явного и скрытого тепла. В частности, в настоящей работе мы получили существенное усиление потоков влаги, выступающих в качестве потоков скрытого тепла при экстремальном климатическом сценарии (рис. 1, 2, 3). Увеличение потока влаги связано с тем, что при росте температуры происходит и рост влагосодержания. Кроме того, потепление в Арктике уменьшает меридиональный градиент температуры лишь в нижней тропосфере, а в верхней тропосфере меридиональный градиент температуры при развитии глобального потепления возрастает, вследствие нескольких причин, одна из которых – более высокая тропопауза в тропиках, чем в Арктике. И именно это увеличение градиента температуры является основной причиной увеличения интенсивности ШТ при агрессивном сценарии.

Таким образом, несмотря на уменьшение горизонтального градиента температуры, ШТ могут получить возросшую энергетическую подпитку, как минимум, за счет потока скрытого тепла. Необходимо также упомянуть влияние неоднородностей распределения гидротермических характеристик океана (температуры поверхности, внутренней структуры течений, солености воды и т.д.), вследствие чего отклик на изменение климата рассматриваемых ШТ может отличаться даже при одном и том же климатическом сценарии. В этой связи для проведения исследований возможных изменений ШТ желательно провести сравнение результатов модельных расчетов с интерактивным и “фиксированным” океаном. Однако, исследование влияния изменений параметров океана из-за изменений климата на ШТ находится вне рамок настоящей работы.

Выявлены различия в поведении ШТ в результате ослабления или усиления стратосферного полярного вихря, сопровождаемых распространением аномалий циркуляции стратосферы в

тропосферу. Отметим, что анализ расчетов модели ИВМ СМ5 показал к концу XXI века усиление межгодовой изменчивости стратосферного полярного вихря в нижней и средней стратосфере Арктики, а также увеличение максимальных значений “объема” полярных стратосферных облаков по сравнению с началом века особенно при экстремальном сценарии SSP5-8.5 [45].

В условиях умеренного сценария ожидается смещение Северо-Тихоокеанского ШТ при усилении стратосферного полярного вихря к низким широтам, а при его ослаблении — смещение к высоким широтам. Для Северо-Атлантического ШТ выявлены противоположные изменения: смещение к высоким широтам при усилении вихря по сравнению с периодами его ослабления

При экстремальном сценарии картина различий меняется. Во-первых, Северо-Тихоокеанский ШТ до середины зимы при усилении стратосферного полярного вихря обладает существенно большей интенсивностью, чем при ослаблении. Далее до середины весны ситуация меняется на противоположную. Во-вторых, отклик Северо-Атлантического ШТ на стратосферные условия носит своего рода колебательный характер как для его расположения, так и для интенсивности. Возможно, это связано и с выявленным к концу XXI века усилением стратосферного полярного вихря и его межгодовой изменчивости.

Анализ связанного с ШТ вихревого потока влаги, характеризующего перенос скрытого тепла, выявил сравнимый характер изменений с изменениями интенсивности ШТ как в следствие роста концентраций парниковых газов, так и изменений стратосферного полярного вихря. При сравнении конца и начала XXI века ожидаемые изменения вихревого потока влаги при экстремальном сценарии значительно превышает изменения при умеренном.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-05-00370. Авторы благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания и комментарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chang E., Lee S., Swanson K.* Storm Track Dynamics // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 2163–2182.
2. *Chang E., Guo Y., Xia X., Zheng M.* Storm-Track Activity in IPCC AR4/CMIP3 Model Simulations // *J. Climate*. 2013. V. 26. P. 246–260.
3. *Lehmann J., Coumou D.* The influence of mid-latitude storm tracks on hot, cold, dry and wet extremes // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. № 1. P. 1–9.
4. *Nakamura H.* Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific // *J. Atmos. Sci.* 1992. V. 49. P. 1629–1642.
5. *Hoskins B.J., Hodges K.I.* The annual cycle of Northern Hemisphere storm tracks. Part I: Seasons // *J. Climate*. 2019-a. V. 32. № 6. P. 1743–1760.
6. *Hoskins B.J., Hodges K.I.* The annual cycle of Northern Hemisphere storm tracks. Part II: Regional detail // *J. Climate*. 2019-b. V. 32. № 6. P. 1761–1775.
7. *Straus D., Shukla J.* Variations of midlatitude transient dynamics associated with ENSO // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. P. 777–790.
8. *Wang J., Kim H. M., Chang E. K.* Changes in Northern Hemisphere winter storm tracks under the background of Arctic amplification // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 10. P. 3705–3724.
9. *Nie Y., Ren H. L., Scaife A. A.* Enhanced mid-to-late winter predictability of the storm track variability in the North Pacific as a contrast with the North Atlantic // *Environ. Res. Lett.* 2020. V. 15. № 9. P. 094037.
10. *Guo Y., Shinoda T., Lin J., Chang E. K.* Variations of Northern Hemisphere storm track and extratropical cyclone activity associated with the Madden–Julian oscillation // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 13. P. 4799–4818.
11. *Thompson D.W., Wallace J.M.* The Arctic Oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1297–1300.
12. *Kidston J., Scaife A.A., Hardiman S.C., Mitchell D.M., Butchart N., Baldwin M.P., Gray L.J.* Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. № 6. P. 433–440.
13. *Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R.* The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. V. 125. P. 909 e2020JD033271.
14. *Lee S.H., Lawrence Z., Butler A., Karpechko A.* Seasonal forecasts of the exceptional Northern Hemisphere winter of 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL090328.
15. *Davies P., McCarthy M., Christidis N., Dunstone N., Fereday D., Kendon M., Knight J., Scaife A., Sexton D.* The wet and stormy UK winter of 2019/2020 // *Weather*. 2021. <https://doi.org/10.1002/wea.3955>
16. *Wang J., Kim H.-M., Chang E.* Interannual Modulation of Northern Hemisphere Winter Storm Tracks by the QBO // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 2786–2794.
17. *Afargan H., Kaspi Y.* A midwinter minimum in North Atlantic storm track intensity in years of a strong jet // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 12511–12518.
18. *Gavrikov A. V., Krinitsky M., Tilinina N., Zyulyaeva Y., Dufour A., Gulev S. K.* Response of the atmospheric rivers and storm tracks to the Sudden Stratospheric Warming events on the basis of North Atlantic Atmospheric Downscaling (1979+) // In IOP Conference

- Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606. № 1. P. 012011. IOP Publishing.
19. *Afargan-Gerstman H., Domeisen D.* Pacific Modulation of the North Atlantic Storm Track Response to Sudden Stratospheric Warming Events // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 2. P. e2019GL085007.
 20. *Eichler T.P., Gaggini N., Pan Z.* Impacts of global warming on Northern Hemisphere winter storm tracks in the CMIP5 model suite // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 3919–3932.
 21. *Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.* О некоторых особенностях динамики общей циркуляции атмосферы в условиях глобального изменения климата // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 3. С. 1–12.
 22. *Tamarin T., Kaspi Y.* The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. № 20. P. 10–666.
 23. *Lehmann J., Coumou D., Frieler K., Eliseev A.V., Levermann A.* Future changes in extratropical storm tracks and baroclinicity under climate change // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. № 8. P. 084002.
 24. *Mbengue C., Schneider T.* Storm-track shifts under climate change: Toward a mechanistic understanding using baroclinic mean available potential energy // *J. Atmos. Sci.* 2017. V. 74. № 1. P. 93–110.
 25. *Shaw T.A.* Mechanisms of future predicted changes in the zonal mean mid-latitude circulation // *Current Climate Change Reports.* 2019. V. 5. № 4. P. 345–357.
 26. *Harvey B., Shaffrey L., Woollings T.* Equator-to-pole temperature differences and the extra-tropical storm track responses of the CMIP5 climate models // *Climate Dynamics.* 2011. V. 43. P. 1171–1182.
 27. *Harvey B.J., Cook P., Shaffrey L.C., Schiemann R.* The Response of the Northern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams to Climate Change in the CMIP3, CMIP5, and CMIP6 Climate Models // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. V. 125. № 23. P. e2020JD032701.
 28. *Володин Е.М., Грицун А.С.* Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020. Т. 56. № 3. С. 1–12.
 29. *Володин Е.М.* Связь естественной изменчивости климата и чувствительности модели климата ИВМ РАН к увеличению концентрации CO₂ // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2021. Т. 57. № 5. С. 509–513.
 30. *Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г.* Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 2. С. 164–178.
 31. *O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B. M.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3461–3482.
 32. *Ayarzagüena B. et al.* Uncertainty in the response of sudden stratospheric warmings and stratosphere-troposphere coupling to quadrupled CO₂ concentrations in CMIP6 models // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. V. 125. № 6. P. e2019JD032345.
 33. *Варгин П.Н., Мартынова Ю.В., Володин Е.М., Кострыкин С.В.* Исследование шторм-треков Северного полушария // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем.* 2019. Т. 1. № 4. С. 145–152.
 34. *Vargin P.N., Martynova Yu.V., Volodin E.M., Kostrykin S.V.* Investigation of boreal storm tracks in historical simulations of INM CM5 and reanalysis data // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 386. P. 012007.
 35. *Willison J., Robinson W.A., Lackmann G.M.* North Atlantic storm-track sensitivity to warming increases with model resolution // *J. Climate.* 2015. V. 28. № 11. P. 4513–4524.
 36. *Priestley M.D., Ackerley D., Catto J.L., Hodges K.I., McDonald R.E., Lee R.W.* An overview of the extratropical storm tracks in CMIP6 historical simulations // *J. Climate.* 2020. V. 33. № 15. P. 6315–6343.
 37. <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>.
 38. *Wallace J., Lim G., Blackmon M.* Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides // *J. Atmos. Sci.*, 1988, 45. 439–62.
 39. *Petoukhov V., Eliseev A.V., Klein R., Oesterle H.* On statistics of the free-troposphere synoptic component: an evaluation of skewnesses and mixed third-order moments contribution to the synoptic-scale dynamics and fluxes of heat and humidity // *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 2008. V. 60. № 1. P. 11–31.
 40. *Логонов С.В., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Влияние негауссовой статистики атмосферных переменных на экстремальные внутримесячные аномалии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 3. С. 307–317.
 41. *Garfinkel C.I., Harnik N.* The non-Gaussianity and spatial asymmetry of temperature extremes relative to the storm track: The role of horizontal advection // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 2. P. 445–464.
 42. *Kanji G.K.* 100 statistical tests, third edition / London: SAGE Publications. 2006. 242 p.
 43. *Runde T., Dameris M., Garny H., Kinnison D.* Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6665–6672.
 44. *Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М.* Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН // *Метеорология и гидрология.* 2018. № 11. С. 100–109.
 45. *Vargin P.N., Kostrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K.* Arctic stratosphere circulation changes in XXI century in simulations of INM CM5 // *Atmosphere.* 2022. V. 13. No. 1. P. 25.

Variations of the Northern Hemispheric Storm-Tracks in Winter under Future Climate Change in INM-CM5 Simulations

Yu. V. Martynova^{1, *}, P. N. Vargin^{2, 4, **}, and E. M. Volodin^{3, ***}

¹ *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Academichesky, Tomsk, 634055 Russia*

² *Central Aerological Observatory, Pervomayskaya, 3, Moscow region, Dolgoprudny, 141707 Russia*

³ *Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkina, 8, Moscow, 119333 Russia*

⁴ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric RAS, 3, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: FoxyJ13@gmail.com*

***e-mail: p_vargin@mail.ru*

****e-mail: volodinev@gmail.com*

The response of Northern Hemispheric storm-tracks (North Atlantic and North Pacific) to climate change is investigated, as well as their response to the strengthening and weakening of the stratospheric polar vortex. The results of INM-CM5.0 climate model simulation for SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios (2015–2100) are used. A significant shift of both storm-tracks to the north as well as a slight strengthening of the North Pacific and weakening of the North Atlantic storm-track are expected by the end of the XXIst century under the SSP2-4.5. In SSP5-8.5, the response of both storm-tracks manifests itself mainly through amplification and, to a lesser extent, through a shift to the North Pole. Moreover, under different climatic conditions, a difference in the response of the North Pacific and North Atlantic storm-tracks to the stratospheric polar vortex strengthening and weakening was revealed. Changes in the storm-tracks associated with eddy moisture flux demonstrate a character comparable to changes in their intensity, both due to an increase in greenhouse gas concentrations and changes in the stratospheric polar vortex.

Keywords: storm-tracks, eddy moisture flux, extratropical cyclones, stratosphere-troposphere dynamical coupling, stratospheric polar vortex, climate modeling, INM-CM5