

УДК 551.583.001.572

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ КЛИМАТА INM-CM5

© 2020 г. Е. М. Володин^а, *, А. С. Грицун^а

^аИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука, ИВМ РАН, Губкина, 8, Москва, 119333 Россия

*e-mail: volodinev@gmail.com

Поступила в редакцию 08.10.2019 г.

После доработки 12.12.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

Рассматриваются результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Расчеты проведены по четырем сценариям: для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5, выполнены единичные расчеты, а для сценария SSP3-7.0 выполнен ансамбль из 5 расчетов. Анализируется изменение среднглобальной температуры и географического распределения температуры и осадков. Показано, что величина глобального потепления для рассматриваемых сценариев, предсказываемая моделью INM-CM5, меньше, чем величина потепления согласно другим моделям CMIP6. Показано, что летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Рассматривается изменение площади морского льда в Арктике и показано, что, согласно данным моделирования, ни при каком сценарии не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI в. Исследуются изменения меридиональной функции тока в атмосфере и в океане.

Ключевые слова: модель, климат, изменение, атмосфера, океан, осадки, температура, функция тока

DOI: 10.31857/S0002351520030128

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных приложений климатического моделирования является прогноз будущих изменений климата. Эта задача может решаться различными способами на различных временных масштабах. В данной работе рассмотрим вероятные изменения климата в XXI в., для воспроизведения которых наиболее важны изменения воздействий на климатическую систему, связанные с изменением концентрации или эмиссии парниковых и других газов, а также аэрозолей, связанные с деятельностью человека.

В мировом научном сообществе на настоящий момент существует несколько десятков климатических моделей, которые различаются методами решения уравнений динамики атмосферы и океана, методами параметризации физических процессов, пространственным разрешением, а также наличием или отсутствием некоторых блоков (например, химии атмосферы, аэрозольного блока, блока углеродного цикла). Каждые 7–8 лет проводится сравнение климатических моделей в рамках проекта CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), в рамках которого с моделями проводятся скоординированные эксперименты. Данные таких экспериментов поступают в единую базу данных и обрабатываются различными группами ис-

следователей. Результаты обработки экспериментов публикуются как в отдельных научных статьях, так и в Отчетах Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Эксперименты в рамках 5-й фазы проекта CMIP проходили в 2009–2011 гг., а соответствующий 5-й отчет МГЭИК вышел в свет в 2013 г. Эксперименты в рамках следующей, шестой фазы, проводились в 2017–2019 гг., а очередной, 6-й отчет МГЭИК который должен включить, кроме всего прочего, и результаты этих экспериментов, как ожидается, выйдет в 2022 г. Структура CMIP6 следующая: модельные группы должны выполнить сначала обязательные численные эксперименты. Это прединдустриальный эксперимент продолжительностью не менее 500 лет, в котором все воздействия на климатическую систему фиксированы на уровне 1850 г.; эксперименты с мгновенным и постепенным учетверением концентрации CO₂, позволяющие оценить равновесную чувствительность модели; эксперимент с атмосферным блоком модели и предписанным состоянием поверхности океана; исторический эксперимент, где моделируется изменение климата в 1850–2014 гг., и воздействия на климатическую систему задаются в соответствии с имеющимися наблюдениями в этот период времени. После выполнения обязательных экспериментов модели могут участвовать в различных

подпроектах. Одним из таких подпроектов является моделирование вероятных будущих изменений климата в XXI в. согласно различным сценариям (ScenarioMIP). Численные эксперименты, результаты которых обсуждаются в данной работе, выполнены в рамках этого подпроекта.

Поскольку под климатом подразумевается вся совокупность статистических характеристик мгновенных состояний атмосферы, океана и других компонент климатической системы, осредненная за большой промежуток времени, то в настоящей работе мы ограничимся лишь анализом некоторых наиболее важных параметров климата, таких как средняя температура, осадки, а более детальному анализу отдельных аспектов изменения климата, например, изменению экстремальных погодноклиматических ситуаций, будут, вероятно, посвящены отдельные работы. Данная работа не ставит также целью полноценное сравнение с результатами других климатических моделей, проводящих расчеты по этим же сценариям, так как результаты других моделей на момент написания этой статьи еще не опубликованы в рецензируемых изданиях.

МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для численных экспериментов используется модель климата INM-CM5 [1, 2]. Она отличается от предыдущей версии INMCM4, с которой также проводились эксперименты по воспроизведению изменений климата XXI в. [3] следующим. В модель добавлен аэрозольный блок, что позволяет на вход подавать антропогенные эмиссии аэрозолей и их предшественников, а концентрации и оптические свойства аэрозолей рассчитывать, а не предписывать, как это было в предыдущей версии. Кроме того, были заменены параметризации образования облачности и конденсации в атмосферном блоке, поднята верхняя граница в атмосферном блоке с 30 до 60 км, увеличено горизонтальное разрешение в блоке океана в 2 раза по каждой координате, и усовершенствована программная реализация, связанная с адаптацией к массивно-параллельным компьютерам, что позволяет эффективно использовать большее количество вычислительных ядер. Модель имеет разрешение в блоке динамики атмосферы и аэрозольном блоке $2 \times 1.5^\circ$ по долготе и широте и 73 уровня, в блоке океана разрешение $0.5 \times 0.25^\circ$ и 40 уровней. Счет производился на суперкомпьютерах МСЦ РАН и МГУ им. Ломоносова, обычно использовалось от 360 до 720 вычислительных ядер, и в такой конфигурации модель считает 6–10 лет за сутки реального времени.

Для моделирования климата будущего использовались 4 сценария: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-5.8. Сценарии описаны в [4], цифра после аббревиатуры SSP (Shared Socioeconomic Path-

way) означает номер пути развития человечества. Значения этих цифр расшифрованы в [4]. Число после тире означает величину радиационного форсинга (Вт м^{-2}) в 2100 г. по сравнению с доиндустриальным уровнем. Таким образом, сценарий SSP1-2.6 является наиболее умеренным и подразумевает быстрое принятие мер, резко ограничивающих антропогенную эмиссию, в нем концентрации парниковых газов имеют максимум в середине XXI столетия и после этого немного убывают к концу века. Сценарий SSP5-8.5 является самым теплым и подразумевает наиболее быстрые изменения климата. Каждый используемый сценарий содержит временные ряды концентрации углекислого газа, метана, закиси азота, озона, эмиссии антропогенных аэрозолей и их предшественников, концентрацию вулканического сульфатного аэрозоля, а также солнечной постоянной. Сценарии рекомендованы для использования в проекте по сравнению климатических моделей CMIP6 (Coupled Model Inter-comparison Project, Phase 6, [5]).

Для каждого из сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 было проведено по одному модельному эксперименту, который начинался в начале 2015 г. и заканчивался концом 2100 г. Начальное состояние было взято из так называемого исторического эксперимента с этой же самой моделью, где моделировались изменения климата в 1850–2014 гг., и все воздействия на климатическую систему были заданы в соответствии с наблюдениями. Результаты ансамбля исторических экспериментов с рассматриваемой моделью приведены в [6, 7]. Для сценария SSP3-7.0 был выполнен ансамбль из 5 расчетов, отличающихся начальными данными, которые были получены в разных исторических экспериментах. Ансамбль численных экспериментов нужен для увеличения статистической достоверности выводов об изменении климата.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем некоторые результаты моделирования изменений климата в XXI в. На рис. 1 представлено изменение глобально осредненной приповерхностной температуры воздуха по отношению к данным соответствующего исторического эксперимента за 1850–1899 гг. При самом теплом сценарии SSP5-8.5 температура повышается к концу XXI в. более чем на 4° , при сценарии SSP3-7.0 различные члены ансамбля показывают потепление на $3.4\text{--}3.6^\circ$, для сценария SSP2-4.5 повышение температуры составляет около 2.4° . При сценарии SSP1-2.6 максимальное потепление, равное примерно 1.7° , достигается в середине XXI века, а к концу века превышение температуры над преиндустриальной составляет 1.4° . На данный момент в рецензируемых изданиях результа-

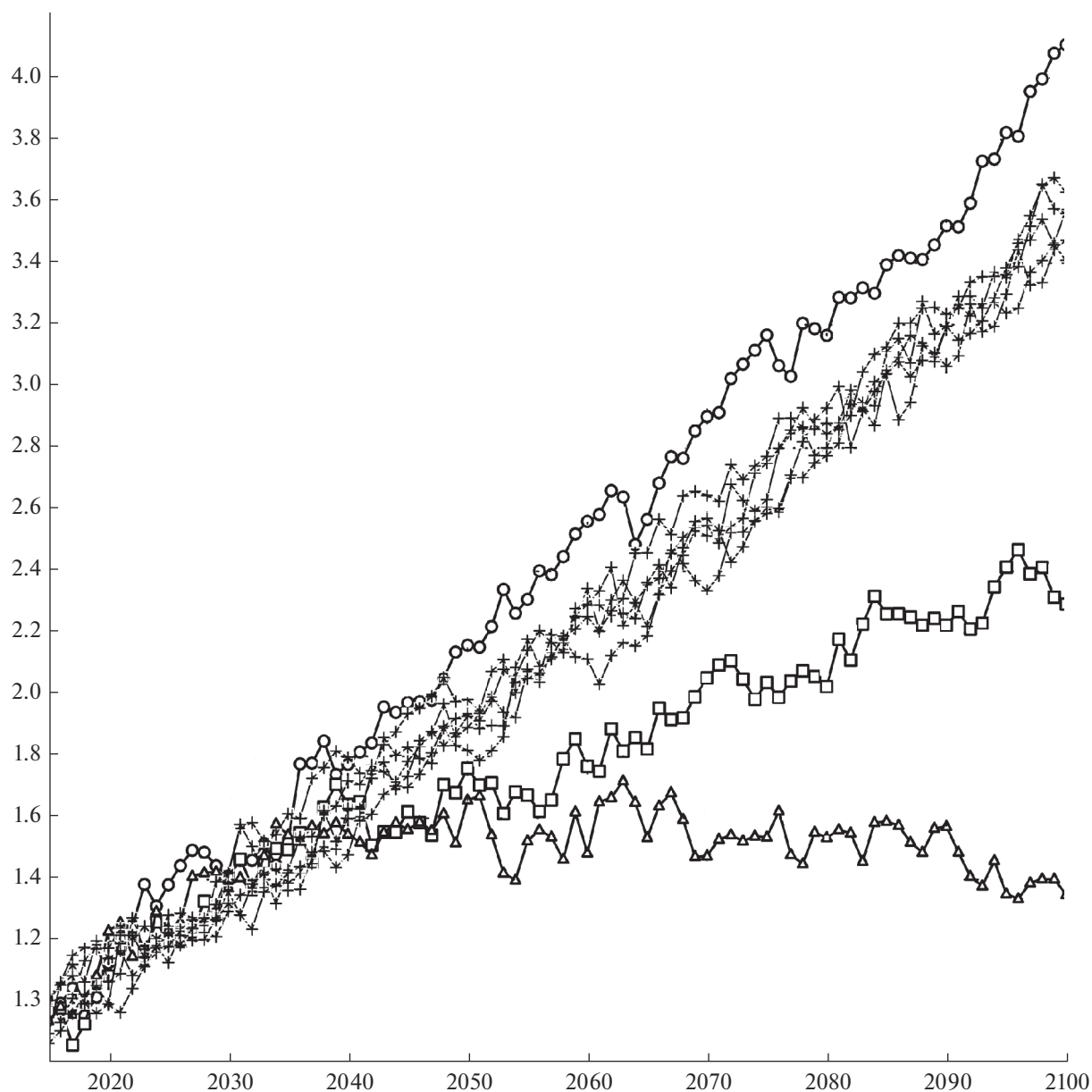


Рис. 1. Изменение глобально осредненной приповерхностной температуры (К) по отношению к преиндустриальному уровню в экспериментах по сценарию SSP1-2.6 (линия маркированы треугольниками), SSP2-4.5 (квадраты), SSP3-7.0 (кресты), SSP5-8.5 (круги).

ты для других моделей CMIP6 пока не опубликованы, однако, предварительный анализ (см., например, https://cmip6workshop19.sciencesconf.org/data/Session1_Pos-terSlides.pdf), показывает, что среди рассмотренных моделей CMIP6 модель INM-CM5 показывает наименьшее повышение температуры для всех сценариев. Это связано с наименьшей равновесной чувствительностью к удвоению концентрации CO_2 , которая для данной версии модели, как и для предыдущей, составляет около 2.1° , несмотря на замену блоков конденсации и образования облачности.

Изменение приповерхностной температуры в основном почти подобны для всех сценариев, поэтому приведем разность температур в 2071–2100 гг. и 1981–2010 гг. для сценария SSP5-8.5 и SSP1-2.6 (рис. 2). Больше всего теплеет в Арктике, потепление достигает соответственно 10 и 3° . Остальные особенности в основном соответствуют данным CMIP5 [8], в том числе и модели INMCM4, участвовавшей в этом сравнении. Потепление на континентах Северного полушария примерно в 2 раза превышает среднее, Южное полушарие теплеет заметно меньше Северного. В целом по-

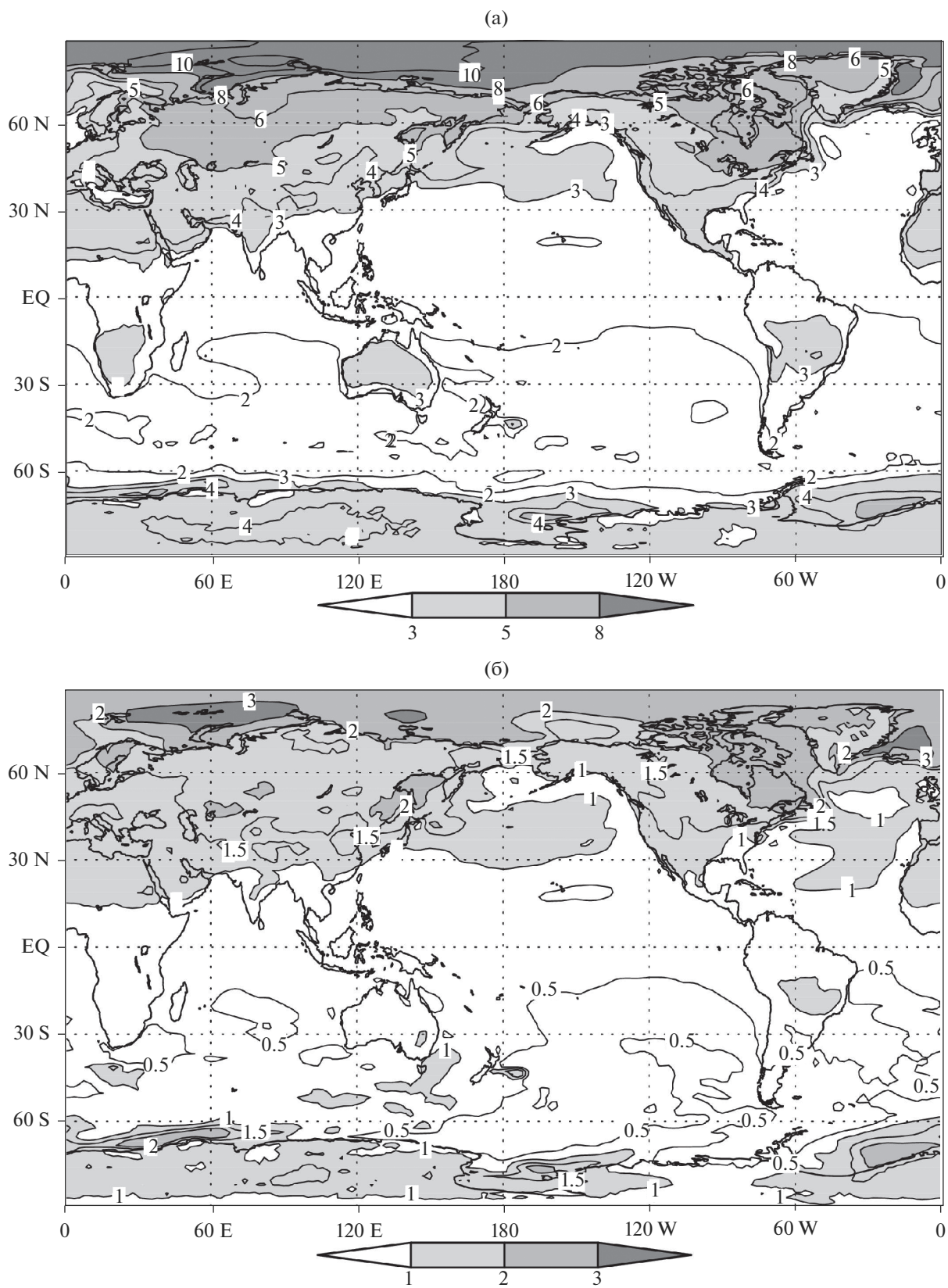


Рис. 2. Отличие среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (K) в 2071–2100 г. по сравнению с 1981–2010 г. для сценария SSP5-8.5 (а) и SSP1-2.6 (б).

верхность суши теплее сильнее, чем поверхность океана для всех сценариев, кроме SSP1-2.6, что можно объяснить тем, что в этом сценарии предполагается уменьшение парникового эффекта во второй половине XXI в., и большая теплоемкость океанов не дает им остыть так быстро, как суше.

Изменения температуры в отдельные сезоны могут заметно отличаться от среднегодовых, а изменения экстремальных температур — от изменения средних. Подробно изменение экстремальных погодно-климатических событий в сценарных экспериментах будет, по-видимому, рассмотрено в отдельной работе. Качество воспроизведения индексов экстремальности моделью INM-CM5 при воспроизведении современного климата обсуждается в работе [9]. Здесь приведем лишь, как изменилась средняя температура летом в 2071–2100 г. по сравнению с 1980–2010 г. на территории Евразии в ансамбле из 5 экспериментов по сценарию SSP3-7.0, а также температура самого теплого месяца за эти 30-летия. Самое большое повышение средней за лето температуры происходит на юге Европы, что связано с более интенсивным высыханием почвы и уменьшением испарения. Изменения температуры в самый теплый месяц за 30-летие на большей части земного шара, в основном, соответствует повышению средней за лето температуры. Однако на большей части России, как видно из рис. 3, экстремально высокие температуры растут быстрее средних. Вероятная причина, обсуждаемая, например, в [10] — то, что почва, как правило, остается влажной, но может высыхать иногда, и в сочетании с подходящими динамическими условиями это дает особенно высокую температуру.

Изменение осадков в декабре–феврале и июне–августе для сценария SSP3-7.0 осредненное по 5 членам ансамбля представлено на рис. 4. На значительной части умеренных и высоких широт все члены ансамбля дают увеличение осадков в зимний сезон. Летом граница между увеличением и уменьшением осадков проходит в Евразии в основном около или севернее 60° , а в южной и центральной Европе все члены ансамбля показывают уменьшение осадков. Увеличиваются осадки также в районе летнего азиатского муссона. Увеличиваются осадки над приэкваториальным Тихим океаном вследствие уменьшения апвеллинга и повышения температуры поверхности океана (ТПО). Распределение изменения осадков в основном соответствует приведенному в [6] рис. 12.22 для всех моделей CMIP5.

Большой интерес представляет изменение площади арктического морского льда в сентябре, когда покрытие океана льдом минимально в годовом ходе. Как показывает рис. 5, в 2015–2019 г. сентябрьская площадь морского льда составляет во всех экспериментах в основном 4–6 млн км², что соответствует оценке по данным наблюдений

[11]. Ни в одном из экспериментов и ни при каком сценарии в данной модели не получается полного таяния арктического морского льда. В то же время, согласно ([8], рис. 12.28, 12.31), заметное количество моделей-участников CMIP6, у которых площадь арктического льда была в начале XXI в. близка к наблюдаемой, показывают полное отсутствие льда к концу XXI века, особенно при сценарии RCP8.5 аналогичному SSP5-8.5. Причина данных различий — более низкая равновесная чувствительность модели INM-CM5. Заметим, что разброс данных между экспериментами по различным сценариям в первой половине XXI в. примерно такой же, как между различными членами ансамбля для сценария SSP3-7.0, и лишь после 2070 г. разброс между данными различных сценариев становится больше, а значения площади льда сортируются в соответствии с радиационным форсингом сценария лишь начиная с 2090 г. Это говорит о большом вкладе естественной изменчивости климата в площадь арктического льда. В эксперименте SSP1-2.6 площадь арктического льда в конце XXI в. примерно соответствует площади в начале эксперимента.

Климатические изменения прослеживаются и в циркуляции мирового океана. На рис. 6 представлено изменение 5-летней средней интенсивности атлантической меридиональной циркуляции, определенной как максимум меридиональной функции тока на 32° с.ш. Все эксперименты показывают, что интенсивность меридиональной циркуляции в XXI в. уменьшается, и на фоне этого уменьшения происходят естественные колебания. Для сценария SSP5-8.5 уменьшение составляет около 4.5–5 Св. Это близко к тому, что получается по моделям CMIP5 ([8], рис. 12.35) при сценарии RCP8.5. При более мягких сценариях ослабление меридиональной циркуляции выражено слабее. Причина такого ослабления меридиональной циркуляции в Атлантике, насколько известно авторам, на настоящий момент до конца не выяснена. В первой половине XXI в. разброс данных экспериментов для разных сценариев, но стартовавших с одних и тех же начальных условий, меньше, чем разброс данных ансамбля экспериментов для одного сценария SSP3-7.0, разные члены которого стартовали с разных начальных данных. Это может быть свидетельством потенциальной предсказуемости интенсивности меридиональной циркуляции по начальным данным на срок до нескольких десятков лет. В то же время, разброс ансамбля для сценария SSP3-7.0 заметно уменьшается к концу XXI столетия, что может означать уменьшение величины естественной изменчивости в более теплом климате.

Перечислим еще несколько изменений динамики океана, которые происходят к концу XXI в. по сравнению с концом XX-го во всех сценарных экспериментах кроме SSP1-2.6.

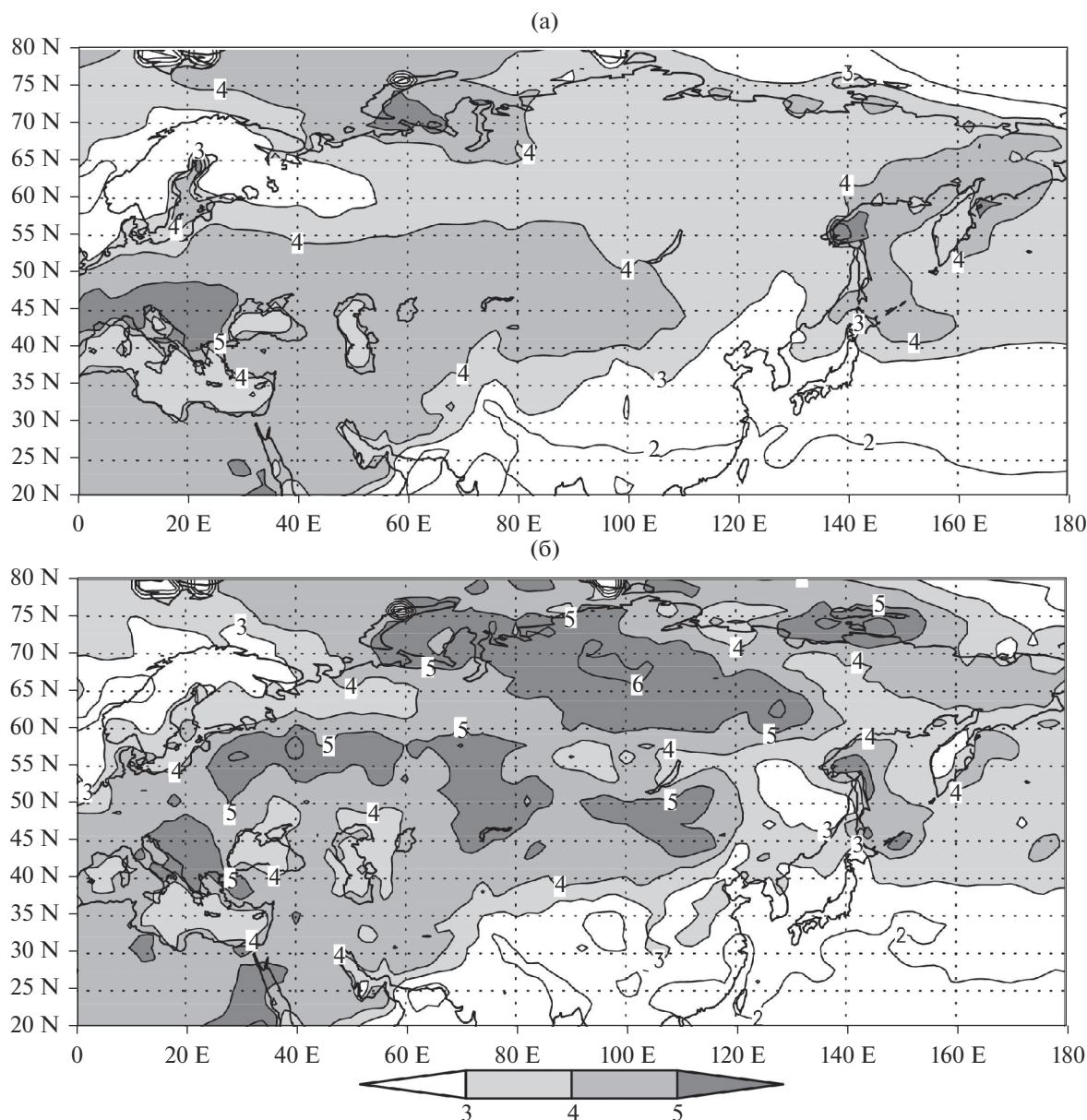


Рис. 3. Отличие приповерхностной температуры (K) в июне–августе 2071–2100 гг. по сравнению с 1981–2010 гг. за летний сезон в среднем (а) и за самый теплый месяц тридцатилетия (б).

Отметим уменьшение интенсивности апвеллинга на экваторе в Тихом океане, происходящее, вероятно, вследствие уменьшения скорости пассатов. Это приводит к росту ТПО более существенному, чем на более удаленных от экватора широтах и росту осадков в окрестности экватора.

Увеличивается приток атлантической воды в Северный Ледовитый океан вдоль западного побережья Европы, и поток арктических вод в Северную Атлантику вдоль восточного побережья Гренландии. Это может быть обусловлено как воздействием ветра (увеличение индекса северо-

атлантического колебания), так и изменением градиентов плотности. В Атлантике существенно, на 0.5–1 промилле, увеличивается поверхностная соленность от экватора до 40° с.ш. и, примерно также, уменьшается соленность в умеренных широтах (40–65° с.ш.). У границы льда на севере Баренцева моря вновь происходит рост соленности. Эти изменения соленности в модели подобны тому, что происходит в моделях CMIP5 ([8], рис. 12.34).

Уменьшается интенсивность Гольфстрима в Мексиканском заливе и у побережья Флориды. Точка отрыва Гольфстрима сдвигается на север.

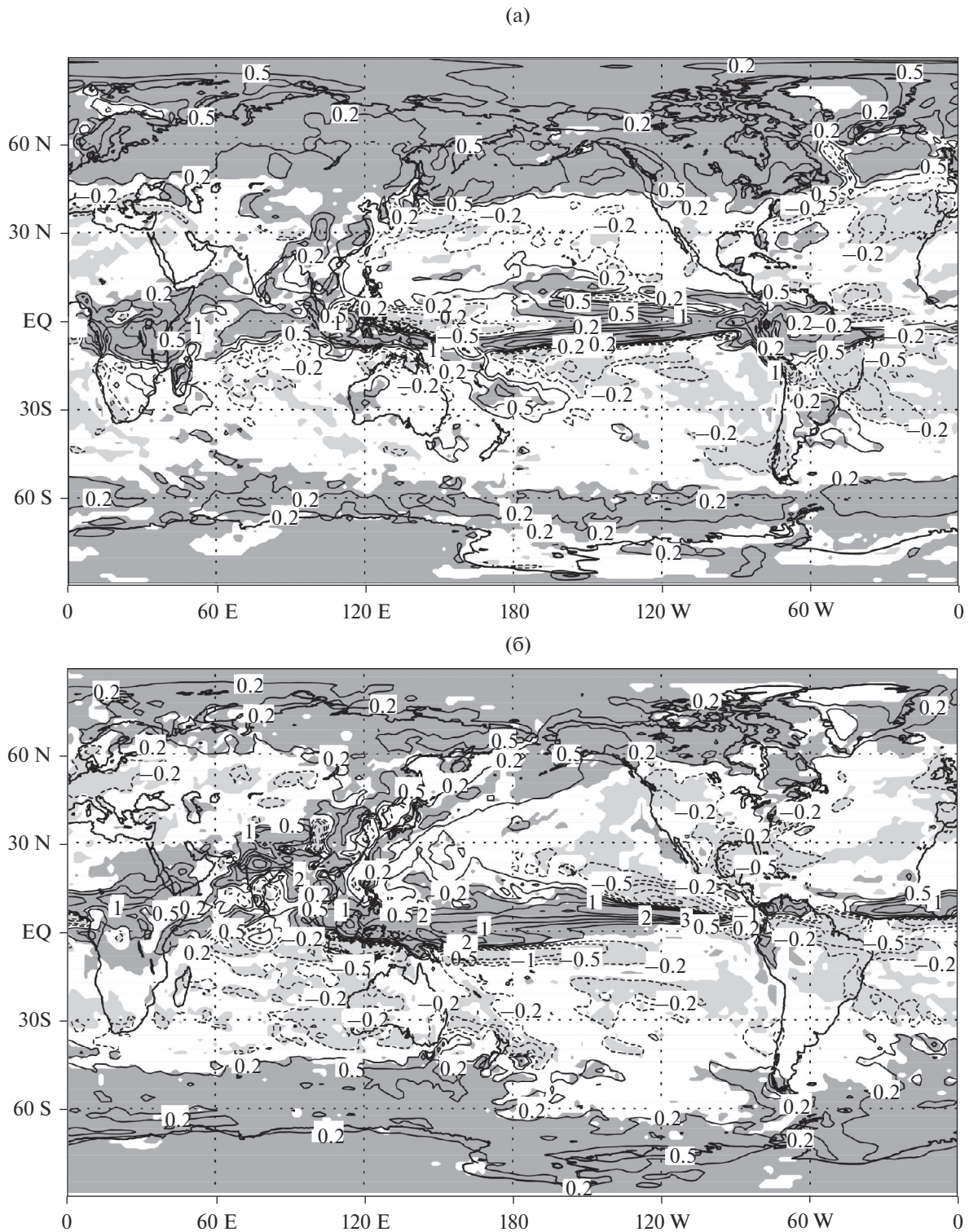


Рис. 4. Изменение осадков (мм/сут) в декабре–феврале (а) и июне–августе (б) 2071–2100 гг. и 1981–2010 гг. осредненное по 5 экспериментам по сценарию SSP3-7.0. Отрицательные изолинии показаны штриховой линией. Серым закрашены области, где все 5 экспериментов показывают изменение одного знака.

Увеличивается интенсивность Куро시오. Увеличивается интенсивность антарктического циркумполярного течения.

Все отмеченные изменения динамики океана при развитии парникового эффекта, насколько представляют себе авторы, не имеют четкого объ-

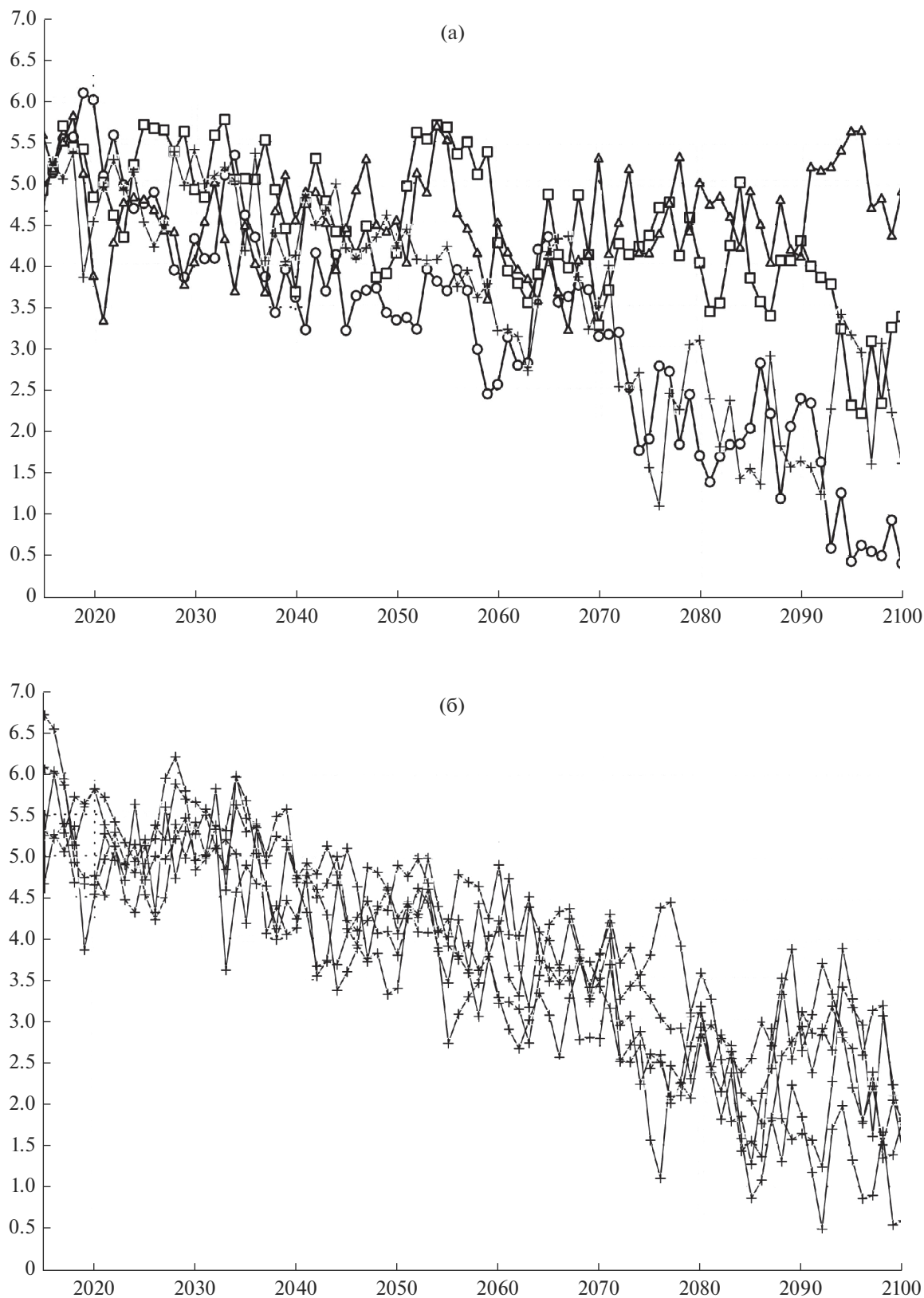


Рис. 5. Площадь арктического льда (млн км²) в сентябре. а – данные эксперимента по сценарию SSP1-2.6 (треугольники), SSP2-4.5 (квадраты), SSP3-7.0, первый член ансамбля (кресты), SSP5-8.5 (кружки). б – данные 5 экспериментов по сценарию SSP3-7.0.

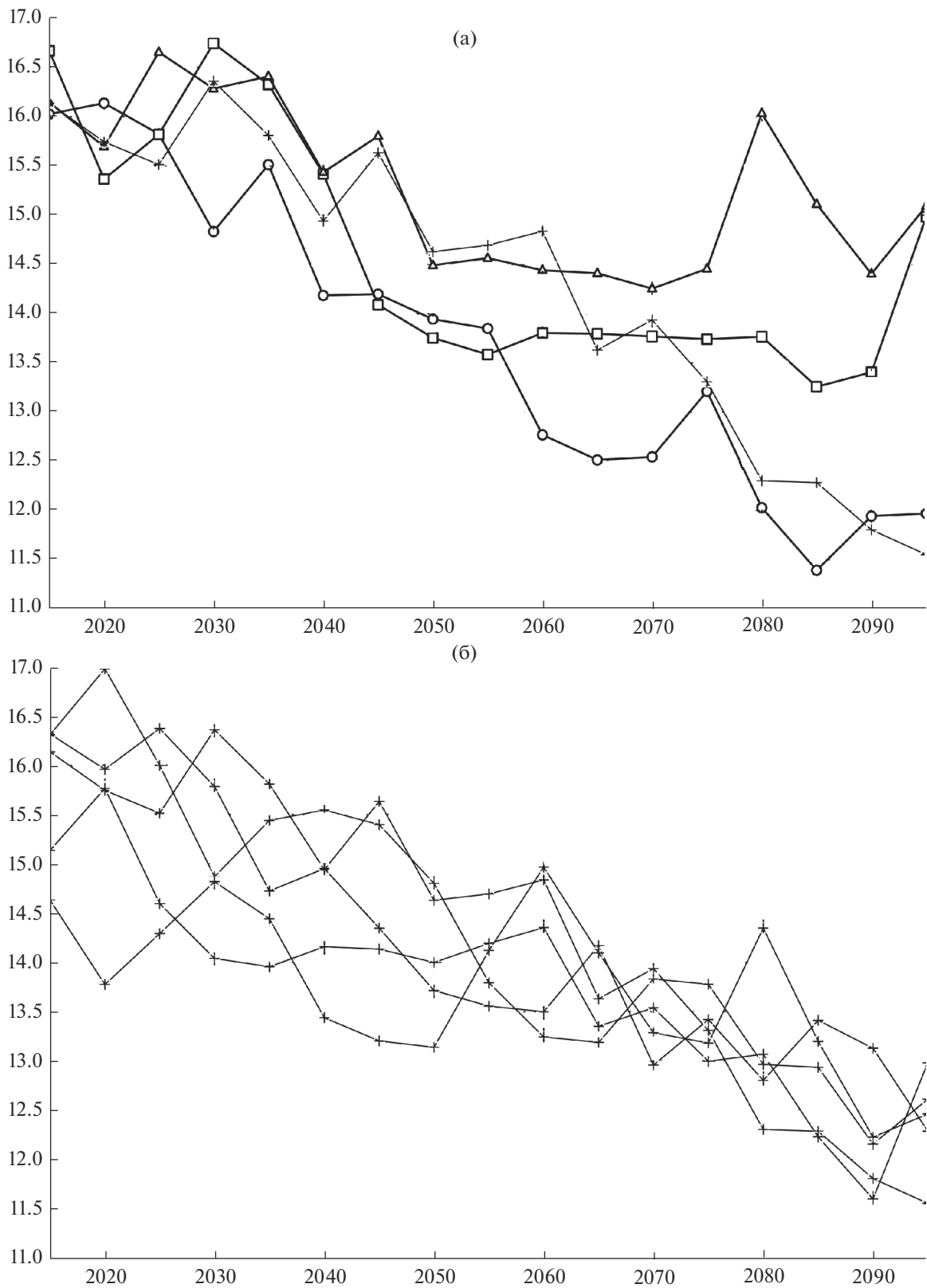


Рис. 6. 5-летняя средняя интенсивность меридиональной циркуляции в Атлантике (Св), определяемая как максимум меридиональной функции тока на 32° с.ш. а – данные эксперимента по сценарию SSP1-2.6 (треугольники), SSP2-4.5 (квадраты), SSP3-7.0, первый член ансамбля (кресты), SSP5-8.5 (кружки). б – данные 5 экспериментов по сценарию SSP3-7.0.

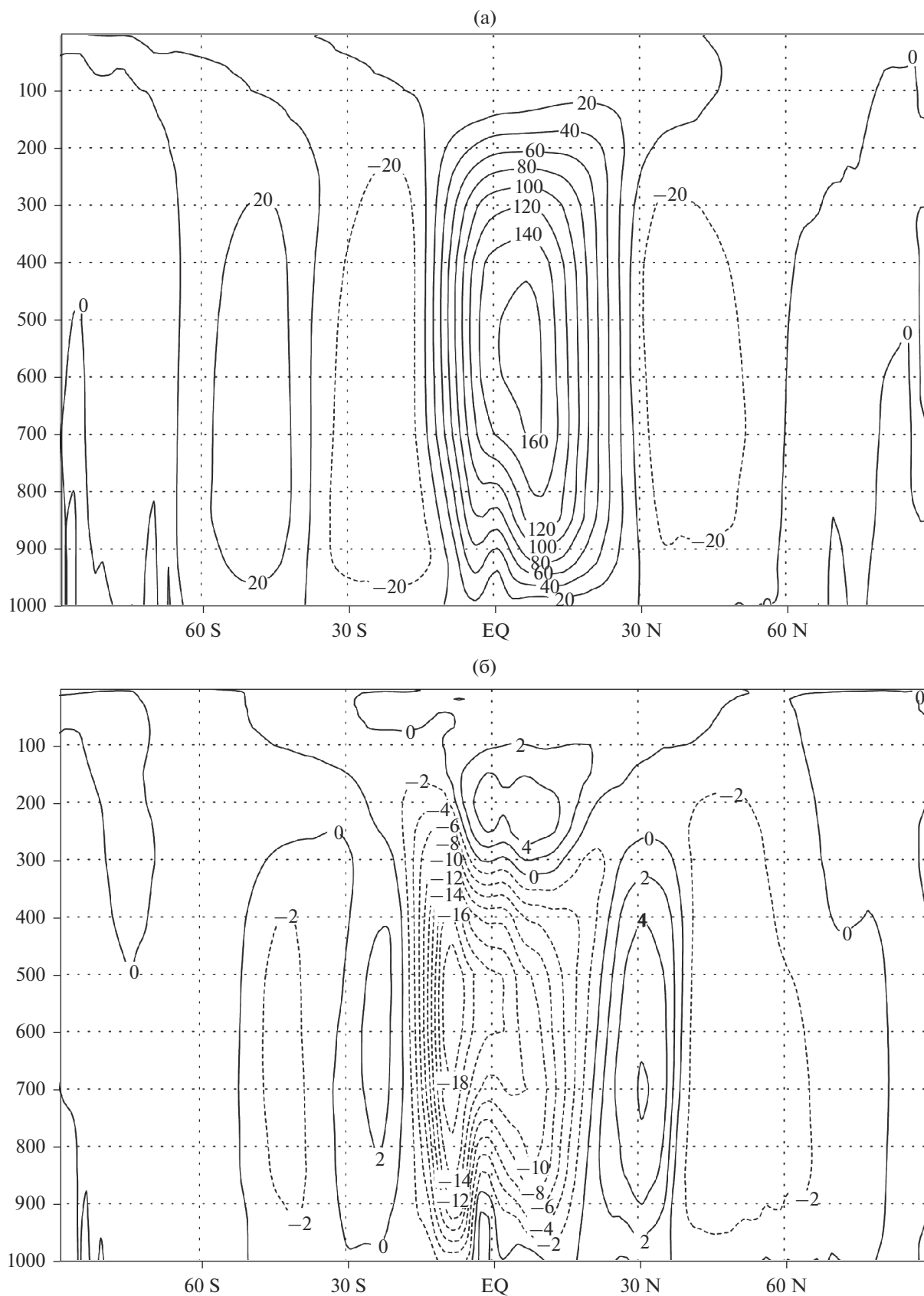


Рис. 7. а – меридиональная функция тока (10^9 кг с^{-1}) в атмосфере осредненная за декабрь–февраль 1981–2010 гг. б – ее изменение в 2071–2100 гг. по сравнению с 1981–2010 гг.

яснения в современной научной литературе и нуждаются в дальнейших исследованиях.

Динамика атмосферы также немного меняется в результате увеличения парникового эффекта. Здесь рассмотрим лишь изменение меридиональной циркуляции в течение зимнего сезона Северного полушария (декабрь—февраль), когда эти изменения видны лучше всего (рис. 7). Изображенная на рисунке меридиональная функция тока определена так, что вокруг максимума происходит движение по часовой стрелке, а вокруг минимума — в обратном направлении. На верхнем рисунке, изображающем среднее состояние, хорошо видны ячейки Хэдли и Ферреля Северного и Южного полушарий. В конце XXI века происходит уменьшение интенсивности циркуляции Хэдли в обоих полушариях, связанная, по-видимому, с тем, что при более высокой температуре влагосодержание воздуха возрастает, а скорость роста осадков меньше. Поэтому вертикальный поток массы воздуха, сопровождающий выпадение осадков, уменьшается. В то же время, как следует из рисунка, ячейка Хэдли распространяется вверх. Кроме того, циркуляционная ячейка Хэдли расширяется в сторону полюсов, что особенно хорошо видно в Северном полушарии. Если за ее границу считать нулевую изолинию функции тока, то северная граница сдвигается к полюсу примерно на 1° широты. Вероятная причина этого — изменение (сдвиг на север) потоков импульса, порождаемых среднеширотными волнами Россби, поддерживающими циркуляцию Ферреля, но чтобы строго доказать это, нужны дополнительные исследования. Сдвигается на север и несколько усиливается и сама ячейка Ферреля.

Происходят изменения и в динамике стратосферы. Как и по данным других моделей CMIP5 ([8], рис. 12.19), происходит усиление западного ветра в умеренных широтах вследствие потепления тропосферы и похолодания стратосферы, и более высокой тропопаузы в тропиках, чем в умеренных широтах. Это вызывает интенсификацию вертикального распространения волн в умеренных широтах и усиление циркуляции Брюера—Добсона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные эксперименты по воспроизведению изменений климата в XXI в. по четырем сценариям программы CMIP6 ([4, 5]), в том числе для сценария SSP3-7.0 рассчитан ансамбль из 5 экспериментов. Проанализированы изменения глобальной средней температуры поверхности и показано, что глобальное потепление, предсказываемое моделью INM-CM5 находится на нижней границе среди опубликованных к настоящему моменту данных моделей CMIP6. Рассмотрено географическое распределение из-

менения температуры и осадков. Показано, что температура в самый теплый летний месяц согласно данным модели будет на территории России увеличиваться быстрее, чем температура летнего сезона в среднем.

Показано, что ни в одном из рассмотренных экспериментов не происходит полного освобождения Арктики ото льда до конца XXI в. Проанализированы некоторые изменения динамики океана, в том числе скорости течения и меридиональная функция тока. Рассмотрены изменения в циркуляции Хэдли и Ферреля в атмосфере.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке гранта РФФИ 18-05-60184 (расчет ансамбля сценарных экспериментов SSP3-7.0 и анализ изменений в Арктике) и программы РАН “Новые вызовы климатической системы Земли” (расчет и анализ остальных сценарных экспериментов). Счет модели проводился на суперкомпьютерах Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 климатической модели ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. V. 53. № 2. P. 164–178.
2. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostrykin S.V., Galin V.Y., Lykosov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate Dynamics*. 2017. T. 49. № 11–12. С. 3715–3734.
3. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI вв. с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. T. 49. № 4. P. 379–400.
4. 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.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev*. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
6. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // *Earth System Dynamics*. 2018. V. 9. P. 1235–1242.
7. Володин Е., Грицун А. О Природе замедления глобального потепления в начале XXI в. // Докл. АН. 2018. T. 482. № 3. С. 315–318.
8. Collins, M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fiechfet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M. Long-term Climate Change: Projections,

- Commitments and Irreversibility// In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
9. Володин Е.М., Тарасевич М.А. Воспроизведение индексов погоднo-климатической экстремальности климатической моделью ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2018. № 11. С. 68–76.
 10. Volodin E.M., Yurova A.Y. Summer temperature standard deviation, skewness and strong positive temperature anomalies in the present day climate and under global warming conditions// Climate Dynamics. 2013. V. 40. № 5–6. P. 1387–1398.
 11. Comiso J.C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data // J. Geophys. Res.-Oceans. 2008. V. 113. № C2. P. 1–22.
<https://doi.org/10.1029/2007JC004257>

Simulation of Possible Future Climate Changes in 21 Century with Climate Model INM-CM5

E. M. Volodin^{1,*} and A. S. Gritsun¹

¹Marchuk Institute of Numerical Mathematics, RAS, INM RAS, Gubkina, 8, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: volodinev@gmail.com

Simulation of climate changes in 2015–2100 with climate model INM-CM5 are considered. Simulations are performed using four scenarios: for scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5, single runs were performed, while ensemble of 5 model runs was done for scenario SSP3-7.0. Global mean temperature change as well as spatial distribution of temperature and precipitation are analysed. It is shown, that global warming value predicted by model INM-CM5 for considered scenarios is smaller than that one in other CMIP6 models. It is shown that in summer in Russia temperature of the hottest month can rise faster than seasonal mean temperature. Change of Arctic sea ice is considered, and it is shown that according to model data, under any scenario there is no complete Arctic summer ice melting in XXI century. Changes of meridional streamfunction in atmosphere and ocean are considered.

Keywords: model, climate, ensemble, change, atmosphere, ocean, precipitation, temperature, streamfunction