

УДК 551.583.001.572

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА МОДЕЛЮ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ INMCM60

© 2023 г. Е. М. Володин^{a, b, *}

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

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

*e-mail: volodinev@gmail.com

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 06.09.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Рассматривается воспроизведение климата последних десятилетий с помощью новой версии модели климата ИВМ РАН. Модель отличается от предыдущей версии изменением в схеме расчета облачности и конденсации, что приводит к более высокой чувствительности к увеличению концентрации CO_2 . Изменения внесены также в расчет эволюции аэрозолей, непрямого эффекта аэрозолей, расчет эволюции снежного покрова, параметризацию атмосферного пограничного слоя и некоторые другие блоки. Модель лучше, чем предыдущая версия, воспроизводит поля приземной температуры, осадков, давления, радиационно-облачного воздействия и другие. Наиболее существенно уменьшились систематические ошибки, связанные с занижением температуры в тропической тропосфере и вблизи полярной тропопаузы, а также с завышением температуры поверхности в Южном океане. Рассматривается воспроизведение изменений климата в 1850–2021 гг. двумя версиями модели.

Ключевые слова: модель, климат, параметризация, температура, осадки, облачность, чувствительность, аэрозоль

DOI: 10.31857/S0002351523010133, **EDN:** EHBSHC

ВВЕДЕНИЕ

На основе версии модели климатической системы [1] создана новая версия. В [2] показано, что внося изменения только в параметризацию облачности, можно получать версии модели климата с разными значениями равновесной чувствительности к удвоению концентрации CO_2 , в интервале от 1.8 до 4.1 градуса. Версия модели INMCM48 имеет чувствительность равную 1.8 градуса, что является самым низким значением среди моделей CMIP6. Поэтому возникает закономерный вопрос: как сказываются изменения в параметризациях, приводящие к увеличению равновесной чувствительности, на воспроизведении современного климата и изменений климата, наблюдавшихся в последние десятилетия.

В версии модели INMCM48 неплохо воспроизводится современный климат, однако, ей присущи некоторые систематические ошибки, которые имеют место для многих современных климатических моделей, а также ошибки, характерные лишь для этой модели. Например, большинство климатических моделей завышают температуру поверхности и приземного воздуха в умеренных широтах Южного полушария, и у восточных бе-

регов тропического Тихого и Атлантического океанов, и занижают приземную температуру в Арктике (см., например, [3]). Характерной ошибкой многих современных моделей, как и модели INMCM48, является холодная полярная тропопауза и теплая тропическая тропопауза, что приводит к завышению скорости западного ветра в стратосфере умеренных широт. Основными вероятными причинами таких систематических ошибок являются ошибки воспроизведения количества облаков, а также оптических свойств облачности. Поэтому при развитии следующей версии были сделаны в первую очередь изменения в параметризации облачности. Кроме того, в версии модели INMCM48 проявлялись систематические ошибки, присущие только ей. Это, например, завышение давления на уровне моря, а также геопотенциала на любом уровне в тропосфере, над северной частью Тихого океана. Вероятная причина такой ошибки связана, скорее всего, с ошибками в источниках тепла, расположенными южнее, над тропическим Тихим океаном.

В данной работе показано, как изменения физических параметризаций, в том числе облачности, влияют на величину систематических оши-

бок воспроизведения современного климата, и на воспроизведение его наблюдавшихся в последние десятилетия изменений.

МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модель климата INMCM60, как и предыдущая версия INMCM48 [1], состоит из трех основных блоков: динамики атмосферы, эволюции аэрозолей и динамики океана. Блок динамики атмосферы включает в себя также модель суши, включая поверхность, растительность и почву. Блок океана включает в себя также модель эволюции морского льда. Пространственное разрешение обеих версий составляет для атмосферного блока 2×1.5 градуса по долготе и широте и 21 уровень по вертикали до высоты 10 гПа. В блоке океана разрешение составляет 1×0.5 градуса и 40 уровней.

В модели по сравнению с версией INMCM48 внесены следующие изменения. Схема расчета облачности и крупномасштабной конденсации соответствует [4], но настройки этой параметризации отличаются от любой из версий, описанных в [3], однако, ближе всего — к версии 4. Основное отличие от нее состоит в том, что поток облачной влаги, генерирующий облачность атмосферного погранслоя, оценивается не только исходя из развития турбулентности в погранслое, но и из условия влажной неустойчивости, что приводит в случае реализации глубокой конвекции к уменьшению генерации облачности в погранслое и увеличению ее генерации в верхней тропосфере. Равновесная чувствительность такой версии к удвоению CO_2 в атмосфере составляет около 3.3 градуса. Были внесены также изменения в аэрозольный блок, связанные с изменением расчета естественных эмиссий сульфатного аэрозоля [5], изменением расчета влажного вымывания, а также расчета влияния концентрации аэрозолей на радиус облачных капель, т.е. первым непрямым эффектом [6]. Но численные значения констант были взяты немного отличающимися от тех, что использовались в [5]. Кроме того, в модель включен усовершенствованный блок расчета эволюции снега с учетом перезамерзания, и расчет альбедо заснеженной поверхности [7]. Изменения сделаны также и в расчете универсальных функций в атмосферном пограничном слое при устойчивой стратификации: в последней версии модели такие функции допускают турбулентность даже при больших градиентных числах Ричардсона [8].

С моделью проведен численный эксперимент по воспроизведению преиндустриального климата продолжительностью 180 лет не считая 200 лет, когда происходил выход на равновесный режим. Все воздействия на климатическую систему в этом численном эксперименте соответствовали 1850 г. Наряду с преиндустриальным был проведен численный эксперимент, в котором мо-

делировалось изменение климата в 1850—2029 гг., для чего в 1850—2014 гг. изменения воздействий были заданы в соответствии с оценками по данным наблюдений [9], а в 2015—2029 гг. — в соответствии со сценарием *ssp3-7.0* [10]. Для оценки воспроизведения современного климата используются данные эксперимента в реальном изменением воздействий за 1985—2014 гг. и сравниваются с данными реанализа ERA-5, [11] данными осадков GPCP 2.3 [12], и данными уходящего на верхней границе атмосферы (ВГА) излучения CERES-EBAF 4.1 [13]. В качестве меры отклонения модельных данных от наблюдений использовалось среднеквадратичное отклонение среднегодовых или среднемесячных модельных и наблюдаемых полей, для чего наблюдаемые поля были интерполированы на сетку модели. При вычислении ошибки давления на уровне моря и температуры на уровне 850 гПа были исключены точки сетки с высотой поверхности более 1500 м. При рассмотрении изменений приземной температуры модельные данные сравниваются с данными наблюдений HADCRUT5 [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем некоторые результаты воспроизведения современного климата. Поскольку изменения в модели были внесены в основном в блок динамики атмосферы и поверхности суши, а в океанском блоке существенных изменений не было, в этой работе ограничимся рассмотрением воспроизведения динамики атмосферы. На рис. 1 представлена среднегодовая ошибка модели в воспроизведении температуры приземного воздуха, осадков и давления на уровне моря в 1985—2014 г по сравнению с данными соответственно ERA5 и GPCP 2.3. В новой версии модели по сравнению с предыдущей уменьшилось завышение температуры над Южным океаном вокруг Антарктиды, уменьшилось занижение температуры над Арктикой, Антарктидой, а также над Сахарой и Аравийской пустыней. Основная причина этих улучшений состоит в изменении схемы расчета облачности. В случае занижения температуры над пустынями существенную роль сыграло также изменение расчета теплопроводности сухой почвы. С другой стороны, в некоторых местах величина ошибки в приземной температуре несколько увеличилась, например увеличилось занижение температуры над Северной Атлантикой и Китаем. В целом, норма ошибки как среднегодовой, так и среднемесячной приземной температуры уменьшилась (см. табл. 1).

Ошибка воспроизведения осадков характеризуется главным образом завышением количества осадков над Индонезией и занижением над Центральной и Южной Америкой, и приэкваториальным восток Тихого океана. Немного умень-

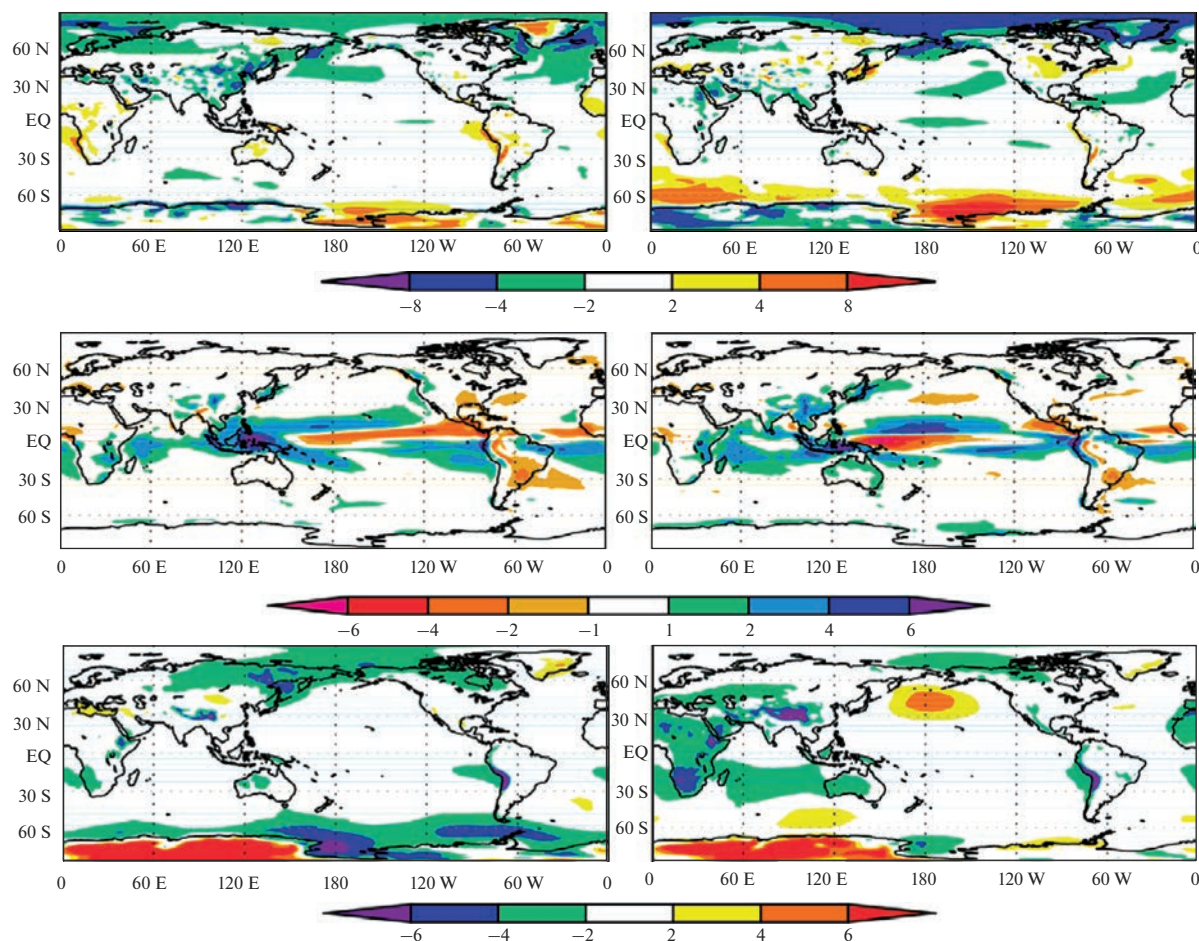


Рис. 1. Ошибка воспроизведения среднегодовой температуры воздуха у поверхности, К (вверху), осадков, мм/сут (в середине) и давления на уровне моря, гПа (внизу) в модели. Слева представлены данные модели INMCM60, справа – модели INMCM48.

шилась ошибка, связанная с двойной зоной конвергенции на востоке Тихого океана, а также с недостаточным количеством осадков на западе приэкваториального Тихого океана. В целом, норма ошибки воспроизведения среднегодовых и среднемесячных осадков также немного уменьшилась.

В давлении на уровне моря в новой версии модели основное улучшение состоит в том, что завышение давления в умеренных широтах Тихого океана, которое происходило как в зимний, так и

в летний сезон, исчезло. В то же время, занижение давления на востоке Сибири, а также вокруг Антарктиды увеличилось. В целом, однако, норма ошибки давления на уровне моря тоже немного уменьшилась.

Таблица 1 показывает, что и нормы ошибок остальных рассматриваемых полей тоже уменьшились. Изменение расчета количества и свойств облачности привело к улучшению воспроизведения радиационно-облачного форсинга, норма ошибок и для длинноволновой, и для коротко-

Таблица 1. Среднеквадратичная ошибка воспроизведения приземной температуры воздуха (T_{2m} , К), давления на уровне моря (SLP, гПа), осадков (Prec, мм/сут), длинноволнового радиационно-облачного форсинга на ВГА (LWCRF, Вт/м²), коротковолнового радиационно-облачного форсинга (SWCRF, Вт/м²), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T_{850} , К) и высоты поверхности 500 гПа (H_{500} , м). Приведены данные для модели INMCM48 и INMCM60 для среднемесячной климатологии (слева от косой черты) и среднегодовой климатологии (справа от косой черты)

	T_{2m}	SLP	Prec	LWCRF	SWCRF	T_{850}	H_{500}
INMCM60	2.19/1.69	2.27/1.51	1.78/1.30	9.9/7.3	16.0/11.1	1.72/1.33	38/31
INMCM48	2.40/2.03	2.34/1.62	1.96/1.40	12.4/10.1	18.1/13.2	2.11/1.82	45/41

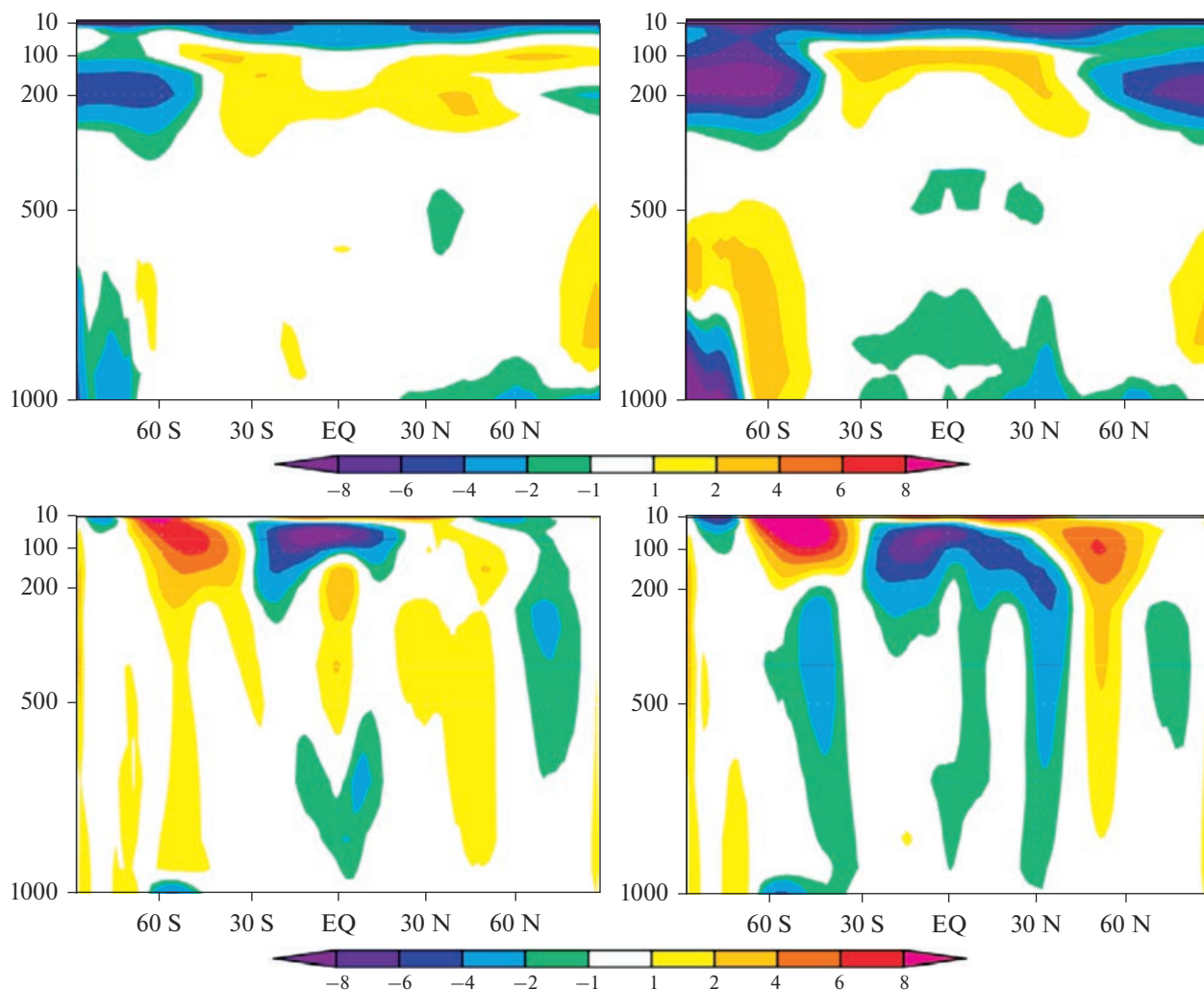


Рис. 2. Среднегодовая ошибка воспроизведения осредненной по долготе температуры, К (вверху) и зональной скорости ветра, м/с (внизу) в модели. Слева представлены данные модели INMCM60, справа – модели INMCM48.

волновой части уменьшилась в новой версии по сравнению с предыдущей на 10–20%. Среднее по планете значение коротковолнового радиационно-облачного форсинга составляет для новой версии модели -47.7 Вт/м^2 , для старой версии модели -40.5 Вт/м^2 , а значение по данным CERES-EBAF составляет около -47 Вт/м^2 . Среднее значение длинноволнового радиационно-облачного форсинга на ВГА в новой версии модели составляет 29.5 Вт/м^2 , в старой версии оно было равно 23.2 Вт/м^2 , а по данным CERES-EBAF это значение составляет около 28 Вт/м^2 . Таким образом, и среднее значение длинноволнового и коротковолнового радиационно-облачного форсинга в новой версии модели значительно ближе к наблюдениям, чем в старой версии.

Согласно табл. 1, существенно уменьшилась также норма систематической ошибки для температуры на 850 гПа и высоты 500 гПа. Уменьшение

произошло в основном за счет приближения средних значений этих полей к наблюдаемым, в то время как в версии INMCM48 средние значения обоих полей были занижены.

На рис. 2 представлена среднегодовая ошибка температуры воздуха и зональной скорости ветра, осредненная вдоль долготы, на уровнях. В новой версии модели значительно уменьшились систематические ошибки, связанные с занижением температуры вблизи полярной тропопавзы, с занижением температуры в тропической тропосфере, с завышением температуры в нижней тропосфере в южных умеренных широтах. Это привело и к уменьшению систематических ошибок в скорости зонального ветра.

Рассмотрим воспроизведение изменений климата в 1850–2021 гг. На рис.3 представлено 5-летнее среднее температуры поверхности по данным HADCRUT5, модели INMCM48 и модели

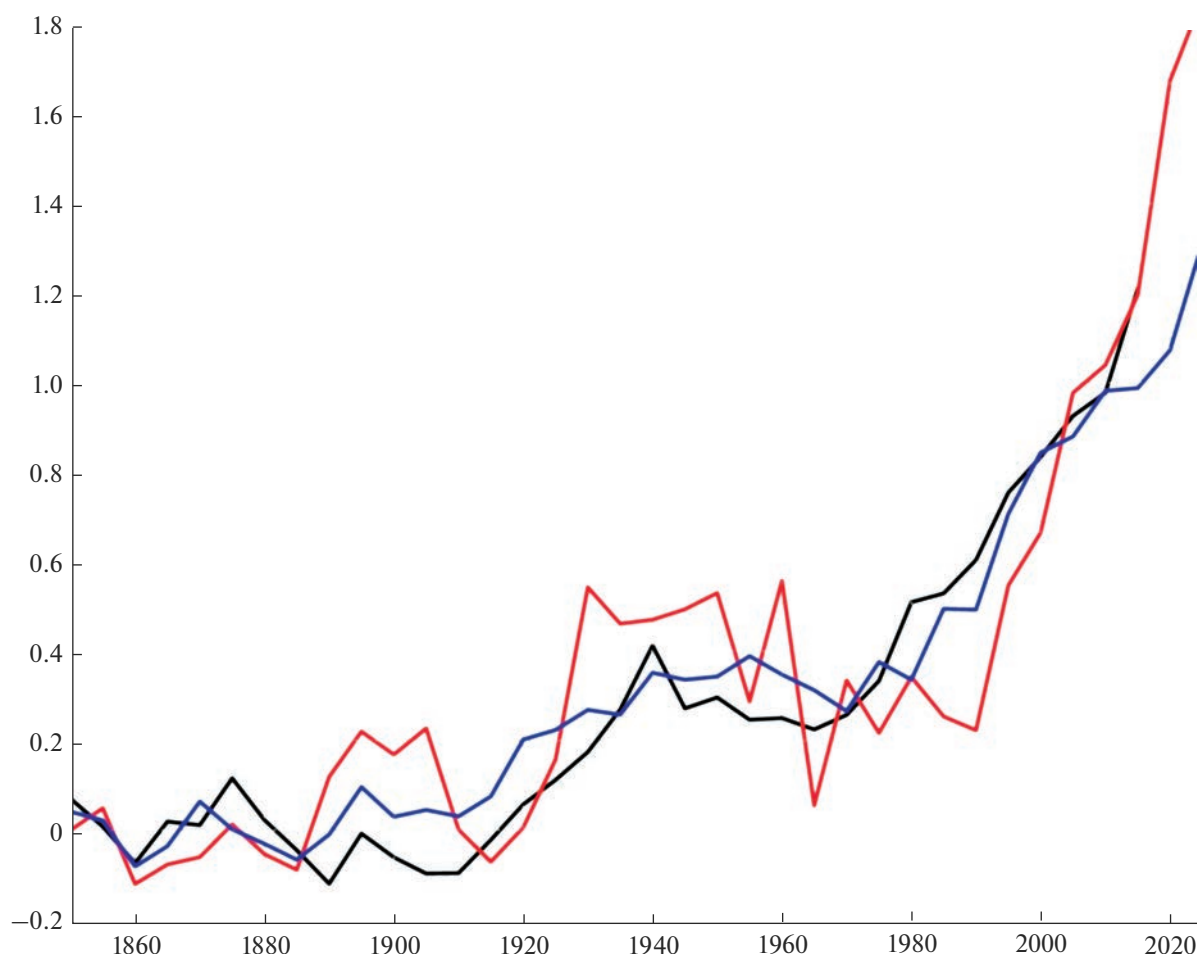


Рис. 3. 5-летнее среднее отклонение глобально осредненной температуры приземного воздуха от среднего за 1851–1900 гг. по данным HADCRUT5 (черный), модели INMCM48 (синий) и INMCM60 (красный).

INMCM60. Для каждого из трех наборов данных вычтено среднее за 1850–1899 г. Модельные данные продлены немного в будущее, так что последнее по времени значение соответствует среднему за 2025–2029 гг. Можно видеть, что и в старой и в новой версии модели величина потепления к 2010 году составляет около 1 градуса, что приблизительно соответствует наблюдениям. Такие особенности наблюдаемого изменения климата, как более теплые 40-е и 50-е годы XX века и замедление потепления, или даже небольшое похолодание, в 60-х и 70-х годах также получаются в обеих версиях модели. Однако, потепление после 2010–2014 гг. получается в новой версии модели заметно больше, чем в старой, и в 2025–2029 гг. отличия достигают 0.5 градуса. Наиболее существенно отличия двух версий модели проявляются в скорости повышения температуры с 1990–1994 по 2025–2029 гг. Для модели INMCM48 повышение температуры составляет около 0.8 градуса, а для модели INMCM60 – около 1.5 градуса. По-видимому, отличие во многом обусловлено различной

чувствительностью моделей, но заметный вклад может давать и естественная изменчивость, поэтому более обоснованный вывод можно будет сделать лишь проведя ансамблевые численные эксперименты.

Изменения в блоке эволюции сульфатного аэрозоля и его взаимодействия с радиационным блоком привели и к изменению в величине антропогенного радиационного воздействия. Для модели INMCM48 прямое радиационное воздействие сульфатного аэрозоля составляло в 2014 г. по сравнению с 1850 г около -0.5 Вт/м^2 , а в модели INMCM60 – около -0.3 Вт/м^2 . Непрямой эффект сульфатного аэрозоля, связанный с влиянием на количество облачных частиц и радиус капель, практически равен 0 в модели INMCM48 и составляет около -0.7 Вт/м^2 в модели INMCM60. По данным 6-го ОД МГЭИК (Оценочный Доклад Международной Группы Экспертов по Изменению Климата) прямое воздействие антропогенного сульфатного аэрозоля составляет около -0.23 Вт/м^2 , не прямое – около -0.70 Вт/м^2 , их

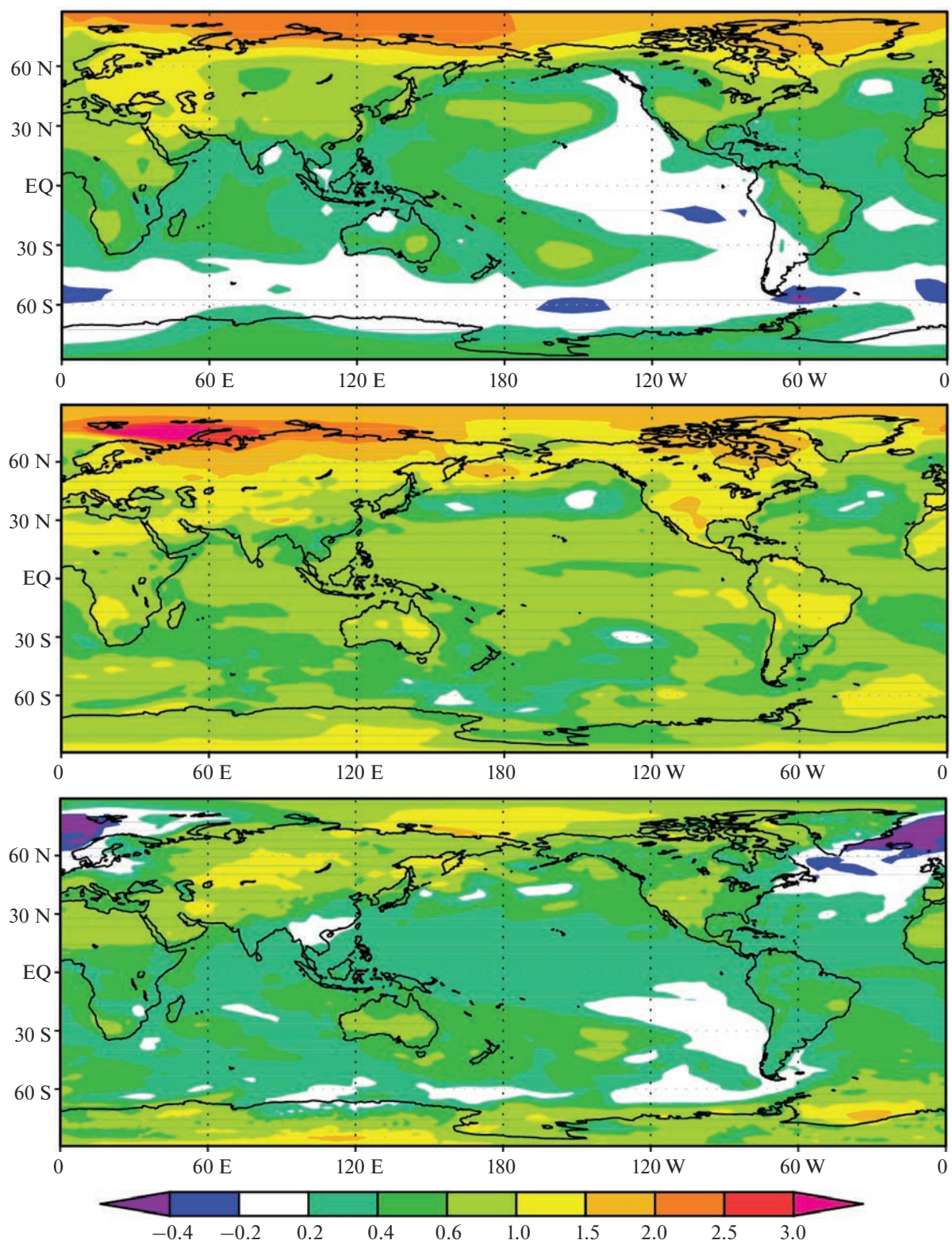


Рис. 4. Разность приземной температуры воздуха (K) в 2000–2021 гг. и 1979–1999 гг. по данным HADCRUT5 (вверху), модели INMCM60 (в середине) и модели INMCM48 (внизу).

сумма -0.94 Вт/м^2 , диапазон неопределенности от -0.25 до -1.63 Вт/м^2 [15]. Радиационное воздействие черного углерода составляет в моделях INMCM48 и INMCM60 около -0.03 Вт/м^2 . Различий по этому показателю для двух моделей практически нет потому что в расчете эволюции черного углерода и его радиационных свойств изменений не было. Оценка 6-го ОД МГЭИК составляет $+0.11 \text{ Вт/м}^2$, а диапазон неопределенности от -0.20 до 0.42 Вт/м^2 .

На рис. 4 представлена разность температуры воздуха у поверхности по данным наблюдений HADCRUT5, новой и старой версии модели, в 2000–2021 г. и в 1979–1999 гг. Именно в течение этого временного интервала потепление согласно рис. 3 происходило наиболее интенсивно. По данным наблюдений, наиболее существенное потепление, превышающее по величине 2 градуса, происходило в Арктике, в умеренных широтах Северного Полушария над сушей – около 1 градуса, а над Южным океаном потепления практически не было. Над Тихим океаном видна структура, соответствующая переходу из положительной фазы Тихоокеанского декадного колебания (ТДК) в отрицательную. Новая версия модели ближе к наблюдениям воспроизводит рост температуры в высоких и умеренных широтах Северного Полушария, в то время как старая версия занижает рост температуры там. В то же время, над тропическими океанами, где наблюдаемое потепление невелико, данные старой версии модели лучше согласуются с наблюдениями, а в новой версии потепление завышено. Ни одна из двух версий модели не смогла воспроизвести изменения температуры в Тихом океане, связанные с переходом из положительной в отрицательную фазу ТДК, а также близкие к нулю изменения температуры в южных умеренных широтах. Значительные отличия изменения температуры в атлантическом секторе Арктики, где в модели INMCM48 происходит некоторое понижение температуры, а в модели INMCM60 – существенное повышение, скорее всего, связаны с проявлением естественных колебаний климата в этом регионе, поэтому и здесь достоверный вывод об отклике этих версий модели на наблюдаемые воздействия можно будет сделать лишь проведя ансамблевые численные эксперименты.

ВЫВОДЫ

Версия модели климата INMCM60 лучше, чем предыдущая версия, воспроизводит современный климат. Наиболее существенно уменьшились систематические ошибки, связанные с завышением приповерхностной температуры в южных умеренных широтах, занижением приземной температуры в Арктике, занижением температу-

ры полярной тропопаузы и тропосферы в тропиках. Улучшилось также воспроизведение радиационно-облачного воздействия. Несмотря на различную равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO_2 , обе версии модели показывают примерно одинаковую величину глобального потепления к 2010–2015 гг., близкую к наблюдаемой, однако, прогноз глобальной температуры на 2025–2029 гг. различается для двух версий модели уже примерно на 0.5 градуса. Более точные выводы о различии воспроизведения современных изменений климата двумя версиями модели можно было бы сделать, проведя ансамблевые расчеты, но это, по-видимому, будет сделано позднее, из-за большого количества необходимого для этого времени и компьютерных ресурсов.

Работы по созданию новой версии модели и проведению с ней численных экспериментов выполнены при поддержке РНФ, грант 20-17-00190. Сравнение результатов моделирования с помощью двух версий модели с наблюдениями выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian J. Num. Anal. Math. Modeling. 2018. V. 33. № 6. P. 367–374.
2. Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере при различных методах учета облачности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.
3. Bock L., Lauer A., Schlund M., Barreiro M., Bellouin N., Jones C., Meehl G., Predoi V., Roberts M., Eyring V. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. e2019JD032321.
4. Tiedtke M. Representation of clouds in large-scale models // Mon. Weather Rev. 1993. V. 121. P. 3040–3061.
5. Чубарова Н.Е., Полюхов А.А., Володин Е.М. Совершенствование расчета эволюции сульфатного аэрозоля и его радиационных эффектов в климатической модели ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 421–431.
6. Полюхов А.А., Чубарова Н.Е., Володин Е.М. Влияние учета непрямого эффекта сульфатного аэрозоля на радиацию и облачность в климатической модели ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022, Т. 58 (в печати)
7. Черненко А.Ю., Костыкин С.В. Оценка радиационного форсинга от загрязнения снега черным углеродом по данным климатической модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 146–155.

8. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Esau I. A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably stratified geophysical flows // *Bound.-Layer Meteorol.* 2013. V. 146. P. 341–373.
9. 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.
10. 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.
11. Dee D.P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. P. 553–597.
12. Adler R. et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation // *Atmosphere*, 2017. V. 9. P. 138.
13. Doelling D.R., Sun M., Nguyen L., Nordeen M., Haney C., Keyes D., Mlynarczyk P. Advances in Geostationary-Derived Longwave Fluxes for the CERES Synoptic (SYN-1deg) Product // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, V. 33(3). P. 503–521.
14. Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., Dunn R.J.H., Osborn T.J., Jones P.D., Simpson I.R. // An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset. *Journal of Geophysical Research* 2021, V. 126. № 3. e2019JD032361.
15. Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W.D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., and Zanis P. Short-Lived Climate Forcers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Che Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B.(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817–922.

Simulation of Present Day Climate with Climate Model INMCM60

E. M. Volodin^{1, 2, *}

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

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: volodinev@gmail.com

Simulation of present day climate with a new version of climate model developed in INM RAS is considered. The model differs from a previous version by the change in cloudiness and condensation scheme, that leads to higher sensitivity to CO₂ increase. The changes are included also in calculation of aerosol evolution, land snow, atmospheric boundary layer parameterizations and other blocks. The model is capable to reproduce near surface air temperature, precipitation, sea level pressure, cloud radiation forcing and other parameters better than previous version. The largest improvement can be seen in simulation of temperature in tropical troposphere, polar tropopause, and surface temperature in the Southern ocean. Simulation of climate changes in 1850–2021 by two model versions is considered.

Keywords: model, climate, parameterization, temperature, precipitation, cloudiness, sensitivity, aerosol