

УДК 551.581.1

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИВМ РАН

© 2025 г. Е. М. Володин^{a, b, *}, А. С. Грицун^b, В. В. Брагина^b, М. А. Тарасевич^{b, c}, А. Ю. Черненко^a

^aИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

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

^cМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*e-mail: volodinev@gmail.com

Поступила в редакцию 04.07.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

Рассматривается история развития модели Земной климатической системы ИВМ РАН, начиная с работ Г.И. Марчука и заканчивая современным состоянием. Показано все многообразие учитываемых в модели процессов. Кратко рассмотрено качество воспроизведения современного климата и его изменений актуальной версией модели.

Ключевые слова: модель, климат, параметризация, атмосфера, океан

DOI: 10.31857/S0002351525030024

ВВЕДЕНИЕ

Модели климатической системы являются в настоящее время одним из наиболее мощных инструментов для исследования механизмов, формирующих климат, а также предсказания его вероятных будущих изменений. Такие модели постоянно совершенствуются и включают описание все большего количества физических процессов, влияющих на климат. В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН также развивается модель климатической системы Земли, в основном следуя общемировым тенденциям. В настоящей работе будут рассмотрены основные этапы развития модели климата ИВМ РАН, вопросы, которые возникали при ее совершенствовании перед разработчиками, результаты участия модели в международных проектах сравнения климатических моделей и место модели в мировой науке, а также ближайшие перспективы развития модели.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ КЛИМАТА ИВМ РАН

В России (СССР) впервые модель климата, включающая в себя модель общей циркуляции атмосферы и океана, была создана в 1984 г.

под руководством Г.И. Марчука [Марчук и др., 1984]. Модель была основана на методе расщепления, согласно которому последовательно учитывались не только различные физические процессы, но и отдельно вычислялось каждое из слагаемых уравнений динамики атмосферы или океана, например, перенос по каждой из трех пространственных координат. Каждое из слагаемых уравнений динамики атмосферы или океана трактовалось неявно. Такой подход позволил вести счет с шагами по времени, превышающими шаг, получаемый из условия Куранта для явных схем. Именно этот подход позволил реализовать модель общей циркуляции атмосферы и океана на компьютерах того времени и сосчитать численный эксперимент продолжительностью около 10 лет. Разрешение составляло в атмосфере $10^\circ \times 6^\circ$ по долготе и широте и 3 уровня, в океане — $5^\circ \times 5^\circ$ и 4 уровня. Рассматривалось воспроизведение давления на уровне моря, скорости зонального и меридионального ветра и температуры на различных уровнях в атмосфере, а также температуры, скорости течения, меридиональной циркуляции и меридиональных потоков тепла в океане. Получились результаты достаточно реалистичные для такого

пространственного разрешения, хотя, конечно же, они сильно уступали результатам современных моделей климата. Запись уравнений динамики в полудивергентном виде обеспечивала выполнение закона сохранения энергии. Тем не менее впоследствии от такого подхода пришлось отказаться, потому что покоординатное расщепление и дивергентный или полудивергентный вид уравнений переноса приводили к тому, что для скоростей, используемых при переносах, не было точного выполнения уравнения неразрывности, и это приводило к ложным источникам, в том числе для температуры и влажности. Кроме того, задача, где используется покоординатное расщепление и неявные схемы, плохо адаптируется к современной массивно-параллельной архитектуре компьютеров с распределенной памятью. Поэтому современная модель климата не основана на полностью неявных схемах и покоординатном расщеплении.

После [Марчук и др., 1984] модели общей циркуляции атмосферы и океана некоторое время развивались независимо. Основные принципы построения модели динамики атмосферы изложены в [Дымников и Фоменко, 1986]. Описанная там модель основана на полностью явных по времени схемах. Впоследствии решение уравнений в форме Громеки-Лэмба, предложенное там, было заменено на решение уравнений для горизонтальных скоростей в адвективной форме [Галин и др., 2003], что привело к формальной потере закона сохранения энергии, но значительно уменьшило систематические ложные источники момента импульса. Эти изменения, а также замена горизонтальной диссипации в виде оператора Лапласа на оператор Лапласа в более высоких степенях, привели к существенному улучшению воспроизведения общей циркуляции атмосферы. Полностью явная схема была заменена схемой с неявной трактовкой распространения гравитационных волн в линейном приближении [Kwizak and Robert, 1971]. Совершенствовались и параметризации физических процессов. Например, вместо простой боксовой модели поверхности, где рассматривалось лишь суммарное содержание воды в верхнем двухметровом слое почвы, а также температура на глубине 2 м, в [Володин и Лыкосов, 1998] была введена модель почвы, где решаются уравнения тепло- и влагопроводности в слое от поверхности до 10 м на нескольких десятках верти-

кальных уровней с учетом замерзания и таяния воды. Там же описана и более сложная модель растительности с учетом испарения через устьица листьев и соответствующее всасывание воды корнями с разных глубин, а также распускания и завядания листьев и других процессов. Позднее модель почвы, поверхности суши и растительности была выделена в отдельную программу, с которой можно проводить численные эксперименты без собственно модели климата, что значительно уменьшает время счета. Параметризация влажноконвективного приспособления была заменена на параметризацию глубокой и мелкой конвекции [Betts, 1986]. Теперь в случае выполнения условий глубокой или мелкой конвекции происходит приближение профилей не к влажноадиабатическим, а к другим, законы построения которых следуют из обработки большого массива данных наблюдений. Было существенно усовершенствовано и описание атмосферной радиации. Вместо интегральной параметризации был внедрен учет радиационных потоков в различных спектральных интервалах [Галин, 1998]. Также значительно увеличилось количество малых газовых составляющих, учитываемых при расчете атмосферной радиации. Все эти изменения параметризаций и методов решения уравнений заметно улучшили результаты воспроизведения современного климата моделью общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН при участии в международной программе по сравнению атмосферных моделей AMIP II (Atmospheric Model Intercomparison Project, phase II) [Gleckler et al., 2004] по сравнению с AMIP I [Gates et al., 1999]. Версия модели атмосферы, принимавшая участие в AMIP II, описана в [Алексеев и др., 1998].

Вслед за этим область моделирования динамики атмосферы была расширена вверх, с 30 км до 90 км. Для этого нужно было учесть эффекты, связанные с гравитационно-волновым сопротивлением волн с непрерывным спектром, что было сделано согласно [Hines, 1997]. Результаты моделирования общей циркуляции атмосферы, включая стратосферу и мезосферу, представлены в [Volodin and Schmitz, 2001].

Существенное увеличение скорости счета модели могло быть получено только за счет адаптации кода атмосферной модели к массивно-параллельным компьютерам, что и было сделано в [Gloukhov, 2002]. При этом использовалась дву-

мерная декомпозиция области расчета по долготе и широте. Это позволило увеличить скорость счета в несколько раз и сделало возможным расчеты на несколько сотен лет, что необходимо для моделирования изменений климата.

Параллельно с адаптацией модели атмосферы к массивно-параллельным компьютерам началась работа по созданию совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана для проведения расчетов по воспроизведению изменений климата. Для этого была взята модель океана и морского льда [Дианский и др., 2002], которая была основана на методах расщепления, в том числе покоординатного, и использовала в качестве вертикальной координаты сигма-координату. Это не является типичным для климатических моделей, поскольку схемная вязкость вдоль сигма-поверхностей может приводить к перемешиванию между различными глубинами, которое не имеет место в природе, а также к переменному шагу по вертикали в метрах, что может сказываться на работе физических параметризаций. Тем не менее численные схемы без схемной вязкости, как показала практика, могут работать удовлетворительно и с использованием сигма-координаты [Дианский и др., 2002].

Сначала был сделан вариант совместной модели атмосферы и океана, где моделировались глобальная атмосфера и тропики Тихого океана, а в остальном океане температура поверхности была предписана [Володин, 2002]. Расчет на 20 лет показал, что такая совместная модель может достаточно реалистично воспроизводить как средний климат Тихого океана, так и явление Эль-Ниньо-Южное колебание.

После этого была создана совместная модель атмосферы и глобального океана [Дианский и Володин, 2002]. В атмосферном блоке ее пространственное разрешение составляло $5^\circ \times 4^\circ$ по долготе и широте и 21 сигма-уровень, а в океане $2.5^\circ \times 2^\circ$ и 33 сигма-уровня. Совместная модель считалась, как правило, на 8–10 процессорах с распределенной памятью, причем адаптирован к массивно-параллельным компьютерам был только атмосферный блок, а блок океана считался на одном вычислительном ядре. При этом блоки атмосферы и океана считались последовательно. Вследствие применения неявных схем шаг по времени модели океана составлял 6 ч, а в блоке атмосферы — 20–30 мин.,

поэтому счет модели океана даже на одном ядре не очень сильно замедлял совместную систему. Этот вариант совместной модели атмосферы и океана участвовал в международной программе по сравнению климатических моделей CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 3). Результаты этих расчетов изложены в [Володин и Дианский, 2006], а также отражены в 4-м оценочном докладе (ОД) межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), главы 8 и 10 тома I. Вследствие грубого пространственного разрешения, в первую очередь, в блоке океана, эта версия модели климата нуждалась в коррекции потока пресной воды на поверхности атмосфера — океан. Корректировался лишь поток в Северной Атлантике. Более детальное пространственное разрешение в следующих версиях модели, а также внедрение изопикнической диффузии, позволило полностью отказаться от коррекции потоков на поверхности.

Ожидаемые изменения климата связаны, в первую очередь, с ростом концентрации в атмосфере парниковых газов: углекислого газа и метана. Однако сами концентрации этих газов могут зависеть от состояния климатической системы. Поэтому модель климата была дополнена блоком углеродного цикла, рассчитывающим потоки углерода, которыми обмениваются атмосфера, океан и наземные экосистемы. В качестве модели наземных экосистем был использован блок LSM1.0 (Land Surface Model, version 1.0) [Bonan, 1996]. В океане рассчитывалась лишь концентрация неорганического углерода. Полностью блок углеродного цикла описан в [Володин, 2007]. Такая модель позволяет рассчитывать одновременно изменения климата и содержания углерода в наземных экосистемах, океане и атмосфере, задавая лишь антропогенные эмиссии углекислого газа, связанные со сжиганием топлива и землепользованием. Проведенные расчеты для исторического периода и сценария A1B CMIP3 показали, что полученная модель показывает результаты, находящиеся примерно в середине интервала неопределенности, полученного по другим моделям, проводившим аналогичный численный эксперимент [Friedlingstein et al., 2006]. Было показано, в частности, что обратная связь между климатом и углеродным циклом является в модели климата ИВМ РАН положительной, как и в других мо-

делях. Это значит, что изменения климата, например, глобальное потепление, обуславливают такой сдвиг равновесия в углеродном цикле, при котором в атмосфере увеличивается количество углекислого газа, что приводит к дальнейшему потеплению.

Углеродный цикл был дополнен циклом метана, где вычислялся поток этого газа из болотных экосистем, при этом предписывался антропогенный поток и вычислялось разложение в атмосфере, что позволяло моделировать совместно эволюцию климата и цикла метана, используя предписанные антропогенные эмиссии [Володин, 2008]. Было показано, что обратная связь между изменением климата и циклом метана также положительная, то есть потепление приводит к увеличению эмиссии метана из болотных экосистем, что способствует дальнейшему потеплению. Однако величина этого добавочного потепления невелика и составляет для сценария RCP 8.5 лишь 0.2–0.3 °C к 2100 г.

Впоследствии в модель климата была включена [Юрова и Володин, 2011] модель динамической растительности LPJ-DGVM. Было показано, что ожидаемые в ближайшее столетие изменения климата сопровождаются сдвигом северной границы леса на север, в то время как изменения преобладающих типов растительности в более южных районах в основном не столь существенны. Обратные связи в системе растительность-климат, полученные в результате численного эксперимента, были не очень существенны, а большой объем кода блока динамической растительности, сложность в интерпретации многих выходных данных и плохой контакт с его разработчиками привели к тому, что это направление развития модели климата в дальнейшем не поддерживалось, и последующие версии климатической модели не включают в себя блок динамической растительности. Блок углеродного цикла был усовершенствован более сложными моделями углерода почвы, учитывающими три пула углерода с разными характерными временами (модель LPJ и модель ROMUL) или непрерывное распределение свойств углерода почвы (Q-модель). Расчеты с климатической моделью, включающей эти блоки, в том числе численные эксперименты до 2100 г., рассмотрены в [Yurova et al., 2010]. Сравнение с результатами стандартной версии показало, что глобально осредненное содержа-

ние углерода почвы изменяется во всех четырех случаях довольно похожим образом, но региональные отличия могут быть существенными. Несмотря на успешно проведенные численные эксперименты, отсутствие в постоянном штате специалистов по углероду почвы привело к тому, что работы по усложнению этой параметризации были приостановлены, и в настоящее время климатическая модель все еще содержит упрощенную версию учета углерода почвы с одним пулом.

В последние годы проводятся работы по внедрению модели биохимии BFM-V5 [Vichi et al., 2013] в блок океана климатической модели ИВМ РАН для совместного моделирования климата и биохимии океана. Однако большое количество прогностических переменных в BFM-V5 не позволяет проводить эксперименты с моделью климата, включающей биохимию океана, с хорошим пространственным разрешением на срок хотя бы в несколько сотен лет.

Параллельно с совершенствованием углеродного цикла развивалась химико-климатическая модель, которая включала в себя модель общей циркуляции атмосферы с верхней границей на высоте 90 км и блок химии атмосферы. Модель описана в [Галин и др., 2007], химический блок включает в себя воспроизведение концентраций более 70 малых газовых составляющих и около 150 химических реакций. Расчет уравнений переноса для такого большого количества веществ потребовал бы очень больших вычислительных ресурсов, поэтому вещества объединены в семейства, и переносится концентрация не индивидуальных веществ, а семейств. Тогда удастся уменьшить количество решаемых уравнений переноса до 25. Но даже в этом случае блок химии является более тяжелым в вычислительном смысле, чем блок расчета общей циркуляции атмосферы, а расчет химических превращений веществ приходится выполнять для состояния атмосферы, осредненного вдоль долготы. Основной акцент при разработке и подключении химического блока был сделан на правильном воспроизведении стратосферного озона, и эта задача была успешно решена [Галин и др., 2007]. Однако сложность счета химико-климатической модели на сотни лет и не очень корректное воспроизведение эволюции некоторых газовых составляющих атмосферы, существенных для изменения климата, например, таких как тро-

посферный озон и закись азота, привели к тому, что блок химии атмосферы почти не использовался при расчете изменений климата моделью динамики атмосферы и океана. Поэтому задача подключения химического блока к климатической модели в настоящее время снова актуальна.

Появление новой версии модели динамики океана [Zalesny and Gusev, 2009] в обобщенных сферических координатах позволило избежать проблемы полюса, поскольку южный модельный полюс остался расположен там же, где географический, а северный был помещен в Сибирь, вне расчетной области. Была включена также модель динамики льда [Yakovlev, 2009], использующая вязко-пластичную реологию. Новая версия модели океана при включении в совместную модель была дополнена параметризацией верхнего перемешанного слоя, порождаемого ветровым перемешиванием и параметризацией изопикнической диффузии, реализованной полулагранжевым методом. Горизонтальная вязкость в виде оператора Лапласа, как и в модели атмосферы, была заменена на оператор Лапласа более высоких порядков. Неявная схема и покоординатное расщепление при переносе были заменены явной схемой.

На этом этапе климатическая модель состояла из двух отдельных программ: модели общей циркуляции атмосферы и модели общей циркуляции океана, которые запускались как две отдельные независимые задачи, обменивающиеся друг с другом данными через файлы на жестком диске каждые два часа модельного времени. Модель атмосферы использовала распараллеливание средствами MPI, а модель океана — средствами OpenMP. В конфигурации совместной модели, которая использовалась для счета численных экспериментов в рамках CMIP5, разрешение в атмосферном блоке составляло $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте и 21 сигма-уровень, в блоке океана — $1^\circ \times 0.5^\circ$ и 40 сигма-уровней. Модель климата в основном считалась на кластере ИВМ РАН, для блока атмосферы использовалось обычно 40 вычислительных ядер, а для блока океана — 8 (один вычислительный узел). При таком разрешении и таком соотношении вычислительных ядер блоки атмосферы и океана считали примерно с одинаковой скоростью, которая составляла 6–8 лет за сутки. Воспроизведение современного климата этой версией

климатической модели в рамках CMIP5 рассмотрено в [Володин и др., 2010], воспроизведение экстремальных погодно-климатических событий — в [Sillmann et al., 2013], а воспроизведение наблюдаемых в последнее столетие изменений климата и вероятных будущих изменений до 2100 г. — в [Володин и др., 2013]. Модель климата ИВМ РАН участвовала также в экспериментах подпроекта C4MIP проекта CMIP5, подразумевающих полностью интерактивное моделирование климата и углеродного цикла в 1850–2100 гг. Результаты сравнения всех моделей, в том числе и модели ИВМ РАН, можно найти в [Hoffmann et al., 2014; Todd-Brown et al., 2014], где показано, что модель климата ИВМ РАН показывает результаты, в основном находящиеся в середине диапазона неопределенности, полученного по всем моделям CMIP5. Сравнение моделей показало, что неопределенность того, какую часть антропогенной эмиссии углерода в атмосферу поглотит океан и наземные экосистемы, остается большой, особенно для наземных экосистем. Результаты моделирования климата в рамках программы CMIP5 вошли в различные главы I тома 5-го ОД МГЭИК.

С версией климатической модели [Володин и др., 2010] были выполнены и численные эксперименты, не входящие в CMIP5. Например, проводилась оценка гипотетической стабилизации климата, когда увеличивающийся антропогенный парниковый эффект компенсируется геоинженерным введением серосодержащих веществ в стратосферу. Для этого в модель климата был включен простейший блок эволюции атмосферных аэрозолей. В [Володин и др., 2011] показано, какой эффект на климат оказывает введение серосодержащих веществ на разных широтах и высотах, какие широты и высоты являются оптимальными в этом смысле, сколько веществ надо вводить, чтобы получить понижение глобальной температуры, скажем, на 1 градус. В [Израэль и др., 2013] показано, что можно таким способом держать глобальную температуру на заданном уровне, например, +2 градуса по отношению к преиндустриальному уровню, при увеличивающемся антропогенном парниковом эффекте, рассчитывая эмиссию серосодержащих веществ на следующий год, исходя только из информации о глобальных эмиссиях и глобальной температуре в прошлые годы. К сожалению, удержание глобально осреднен-

ной температуры на заданном уровне не означает неизменности всего климата в каждой точке. В частности, при развитии парникового эффекта и его все более интенсивной компенсации можно ожидать уменьшения количества осадков, особенно в тех местах, где и сейчас ощущается их дефицит. Подобные численные эксперименты проводились и для совместной системы атмосфера-океан-химия атмосферы, что с программистской точки зрения было выполнено в виде запуска трех независимых задач, которые обмениваются данными через файлы на диске. Такие расчеты показали, в частности, существенное уменьшение концентрации озона при увеличении геоинженерного воздействия из-за реакций химического разрушения озона на поверхности капелек стратосферного сульфатного аэрозоля.

Адаптация океанического блока к массивно-параллельным компьютерам с распределенной памятью [Terekhov et al., 2011] открыла возможность увеличения разрешения в блоке океана совместной модели, а также возможность реализации климатической модели в виде одной задачи, в которой одна группа процессоров решает уравнения динамики атмосферы, а другая — уравнения динамики океана.

Модель климатической системы была дополнена электрическим блоком, в котором рассчитывалось количество молниевых вспышек и ионосферный потенциал [Mareev and Volodin, 2014]. Была рассмотрена суточная и годовая вариация ионосферного потенциала, а также долгосрочные изменения количества молниевых вспышек и ионосферного потенциала, связанные с наблюдавшимися в последнее столетие изменениями климата, а также ожидаемыми изменениями климата до 2100 г.

Увеличение скорости счета модели атмосферы за счет повышения быстродействия компьютеров позволило увеличить число вертикальных уровней и поднять ее верхнюю границу, что позволило воспроизвести квазидвухлетнее колебание скорости ветра на экваторе [Кулямин и др., 2009]. Затем верхняя граница атмосферного блока была поднята еще выше, и в модель общей циркуляции атмосферы была экспериментально включена динамика ионосферы.

В модель климатической системы был включен блок ледниковых щитов [Рыбак и Володин, 2015], с помощью которого в основном воспро-

изводилась эволюция Гренландского ледового щита. Этот блок интерполировал ежесуточное состояние модельной атмосферы в течение последнего года, используя специальную энерго-лагодобалансовую модель, на свою мелкую сетку и делал шаг по времени, равный одному году. С помощью модели климата, включающей блок ледниковых щитов, было смоделировано современное состояние Гренландского щита и его эволюция в течение Эемского (Микулинского) межледниковья 130–120 тыс. лет назад (л.н.) [Рыбак и др., 2018]. В то время большее количество приходящего солнечного излучения летом способствовало более интенсивному таянию Гренландского щита, полному разрушению его южной части и связанному с этим повышению уровня океана на 2–3 м. Поскольку использование блока ледниковых щитов, как правило, предполагает счет на тысячи или десятки тысяч лет, или даже еще более долгие сроки, то при проведении таких численных экспериментов использовалась технология, при которой один год, сосчитанный по модели атмосферы и океана, для модели ледниковых щитов повторяется сто раз, так что для ледникового щита проходит сто лет. Но даже при такой схеме проведения численных экспериментов на десятки тысяч лет происходило с климатической моделью, где разрешение в атмосферном и океаническом блоках было грубым: $5^\circ \times 4^\circ$ в атмосферном блоке и $2.5^\circ \times 2^\circ$ в океаническом. Модели атмосферы и океана с такими разрешениями имеют свои специфические недостатки, проявляющиеся в длительных численных экспериментах, поэтому в настоящее время модель климата ИВМ РАН с включением блока ледниковых щитов не используется, а возможное будущее использование должно предполагать разрешение в атмосферном блоке не хуже $2^\circ \times 1.5^\circ$, а в океаническом — $1^\circ \times 0.5^\circ$.

Модель климатической системы была дополнена аэрозольным блоком, в котором рассматривается эволюция 10 аэрозолей или их предшественников [Володин и Кострыкин, 2016]. Аэрозольный блок реализован на отдельной группе процессоров и использует такое же число процессоров, что и блок атмосферы. Модель климата, состоящая из блоков атмосферы, океана и аэрозольного блока, участвовала в программе CMIP6 в трех разрешениях. Версия INMCM48 имеет разрешение $2^\circ \times 1.5^\circ$ и 21 сигма-уровень в атмосферном блоке, а также $1^\circ \times 0.5^\circ$ и

40 сигма-уровней в блоке океана. Воспроизведение современного климата этой версией описано в [Volodin et al., 2018]. С этой версией были сосчитаны численные эксперименты по воспроизведению преиндустриального климата, современного климата и изменений климата по четырем сценариям до 2100 г. [Tebaldi et al., 2021], а также эксперименты по воспроизведению климатов прошлого: оптимума голоцена 6 тыс.л.н. [Brierley et al., 2020], максимума последнего оледенения 21 тыс.л.н. [Kadeyama et al., 2021], максимума Эемского межледниковья 127 тыс.л.н. [Otto-Bliesner et al., 2021], оптимума эоцена 55–60 млн.л.н. [Lunt et al., 2021], а также изменения климата последнего тысячелетия (850–1849 гг.).

Версия INMCM5 имеет разрешение $2^\circ \times 1.5^\circ$ и 73 сигма-уровня до 60 км в атмосферном блоке и, в отличие от версии INMCM48, корректно воспроизводит динамику стратосферы и нижней мезосферы, включая квазидвухлетнее колебание и статистику стратосферных потеплений [Варгин и др., 2018]. Воспроизведение современного климата этой версией описано в [Volodin et al., 2017], воспроизведение изменений климата в 1850–2014 гг. — в [Volodin and Gritsun, 2018], а воспроизведение изменений климата в 2015–2100 гг. по четырем сценариям — в [Володин и Грицун, 2020].

Версия INMCM5H имеет разрешение в атмосферном блоке $0.67^\circ \times 0.5^\circ$ и 73 сигма-уровня, в океане $0.167^\circ \times 0.125^\circ$ и 40 сигма-уровней. Она участвовала в подпроекте HighResMIP [Haarsma et al., 2016]. Эта версия считалась на 1000 ядрах суперкомпьютера, расположенного в Институте Полярных и Морских исследований (Бремерхафен), со скоростью примерно 1 год за сутки, и не все предполагаемые численные эксперименты были посчитаны в связи с окончанием проекта.

Одной из наиболее существенных особенностей всех версий модели климата 2002–2018 гг. является низкая равновесная чувствительность (ECS) к удвоению концентрации CO_2 в атмосфере. Например, согласно [Meehl et al., 2020], значения ECS для моделей CMIP6 находятся в интервале 1.8–5.6К. Значение ECS для модели INMCM48 составляет 1.8 К, а для модели INMCM5 — 1.9 К, то есть это самые низкие значения среди всех моделей CMIP6. Причины столь низкой равновесной чувствительности в моделях климата ИВМ РАН, а также способы ее увеличения, были исследованы в [Volodin, 2021].

В частности, было показано, что величину ECS в версии модели INMCM48 можно менять в пределах, по крайней мере, от 1.8 К до 4.1 К, внося изменения только в параметризацию облачности.

В последние годы версия модели климата INMCM5 используется для сезонных прогнозов состояния климатической системы в оперативном режиме совместно с Гидрометцентром РФ. Оценка качества ретроспективных сезонных прогнозов рассмотрена в [Воробьева и Володин, 2020], а оценка предсказуемости индексов и состояния стратосферы — в [Vorobyeva and Volodin, 2021]. Показано [Хан и др., 2024], что качество воспроизведения сезонных аномалий моделью климата ИВМ РАН соответствует качеству воспроизведения другими современными прогностическими системами. Эта же версия модели климата используется и для счета прогнозов на срок 1–5 лет. Качество воспроизведения аномалий прошлых лет рассмотрено в [Воробьева и др., 2023], и оно соответствует аналогичным показателям для других современных прогностических систем. Прогноз на ближайшее пятилетие, полученный с помощью этой прогностической системы, обсуждается в [Хан и др., 2023]. Пятилетний прогноз для всех мировых прогностических систем, в том числе и для модели INMCM5 (под названием RHMC), представлен на <https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/>.

Дальнейшее совершенствование модели климата было связано с внедрением прогностической схемы расчета облачности [Tiedtke, 1993], усовершенствованиями схемы расчета эволюции снежного покрова [Chernenkov et al., 2024], аэрозольного блока [Чубарова и Полюхов, 2021] и атмосферного пограничного слоя [Zilitinkevich et al., 2013]. Версия модели климата INMCM6 и воспроизведение ею изменений климата в 1850–2030 гг. представлены в [Володин, 2023]. Воспроизведение изменений климата на территории Северной Евразии представлено в [Bragina et al., 2024]. Систематические ошибки воспроизведения среднего современного климата, в основном, немного уменьшились по сравнению с версией INMCM48, но при возросшем до 3.7К значении ECS модель несколько завышает скорость глобального потепления в XXI веке. Поэтому дальнейшее совершенствование модели климата было связано с некоторым уменьшением величины ECS, главным образом,

путем учета зависимости скорости перемешивания облачного воздуха с воздухом окружения от вертикального градиента потенциальной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ

Данная работа не ставит перед собой цели всестороннего анализа воспроизведения климата и его изменений последней версией модели климата, по-видимому, наиболее близкой к версии, которая будет участвовать в СМIP7. Здесь очень кратко отметим лишь некоторые наиболее существенные результаты. Величина равновесной чувствительности к удвоению CO_2 составляет около 3.1 К, а неравновесный отклик (увеличение среднеглобальной температуры при удвоении CO_2 со скоростью 1% в год) составляет около 1.75 К, что несколько меньше, чем средние значения по всем моделям СМIP6 [Meehl et al., 2020], которые составляют, соответственно, 3.7 К и 2.0 К. Ошибка в приземной температуре

воздуха (рис. 1) не превышает по величине двух градусов почти везде над океаном, кроме Южного океана и областей тропического апвеллинга к западу от Африки и Южной Америки. Не превышает двух градусов ошибка температуры и на большей части России, кроме севера Сибири, а также в зарубежной Европе, кроме юга, и в Арктике. Обращает на себя внимание уменьшение систематических ошибок температуры в океане (рис. 2) по сравнению с версиями [Volodin et al., 2017] и [Volodin et al., 2018], участвовавшими в СМIP6. Так, устранено систематическое занижение температуры океана в тропиках и субтропиках на глубинах 100–1000 м и уменьшено занижение температуры глубже 1000 м.

Модель неплохо воспроизводит изменения наблюдаемой температуры в 1850–2023 гг. (рис. 3). К 2100 г. повышение температуры при сценариях SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 составит примерно 2.1 К, 3.3 К, 4.7 К и 5.8 К по отношению к среднему за 1850–1899 гг. соответственно. По данным СМIP6, средние по всем климатическим моделям значения для этих сценариев

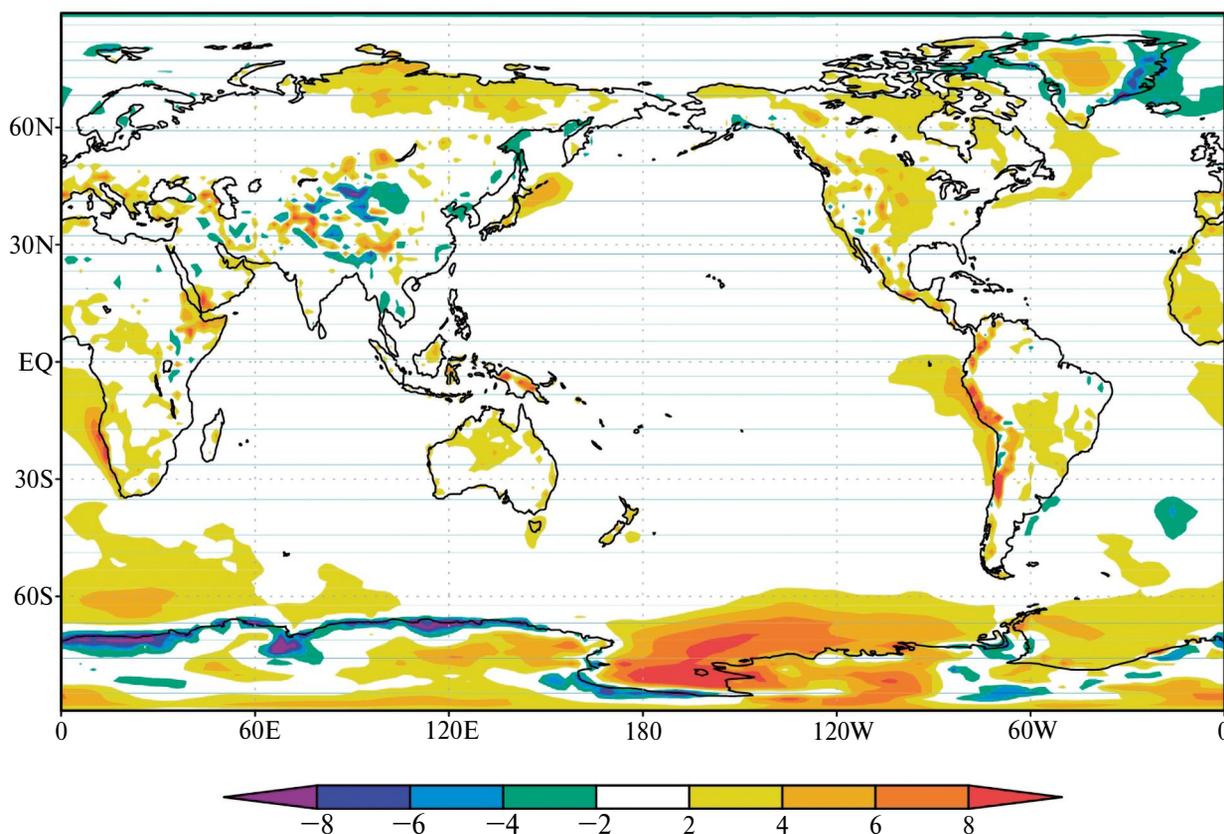


Рис. 1. Разность среднегодовой температуры приземного воздуха (К) в 1980–2014 гг. по данным модели и реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020]

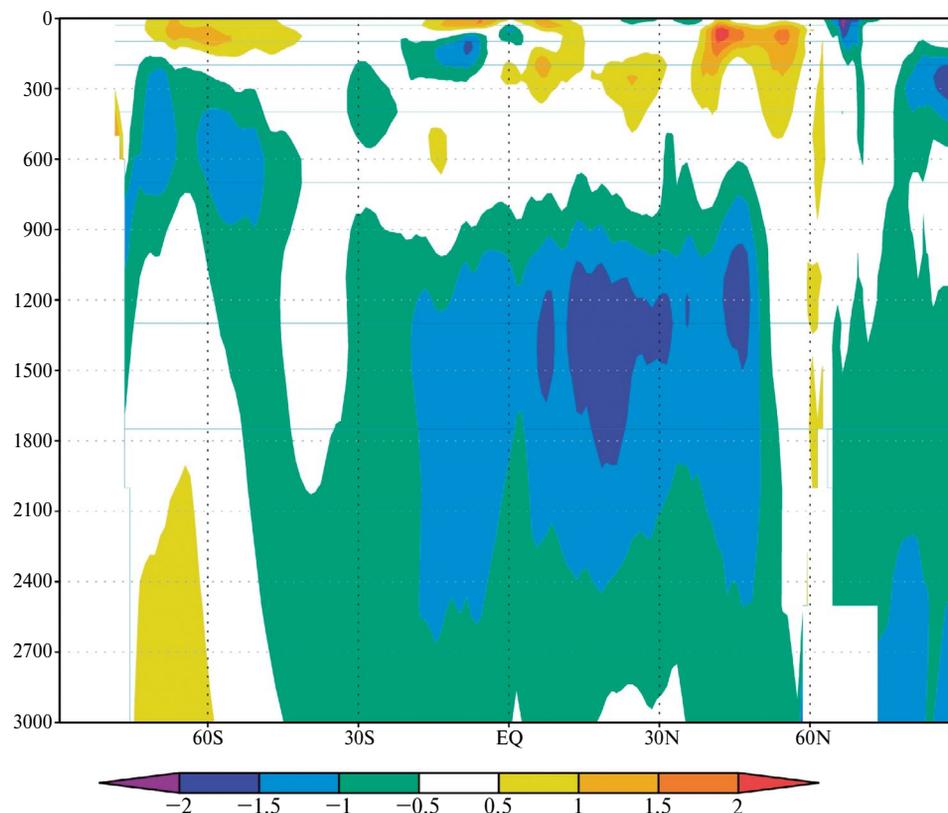


Рис. 2. Среднегодовая и осредненная вдоль долготы разность потенциальной температуры воды в океане (К) по данным модели и WOA09 [Antonov et al., 2010] на разных глубинах

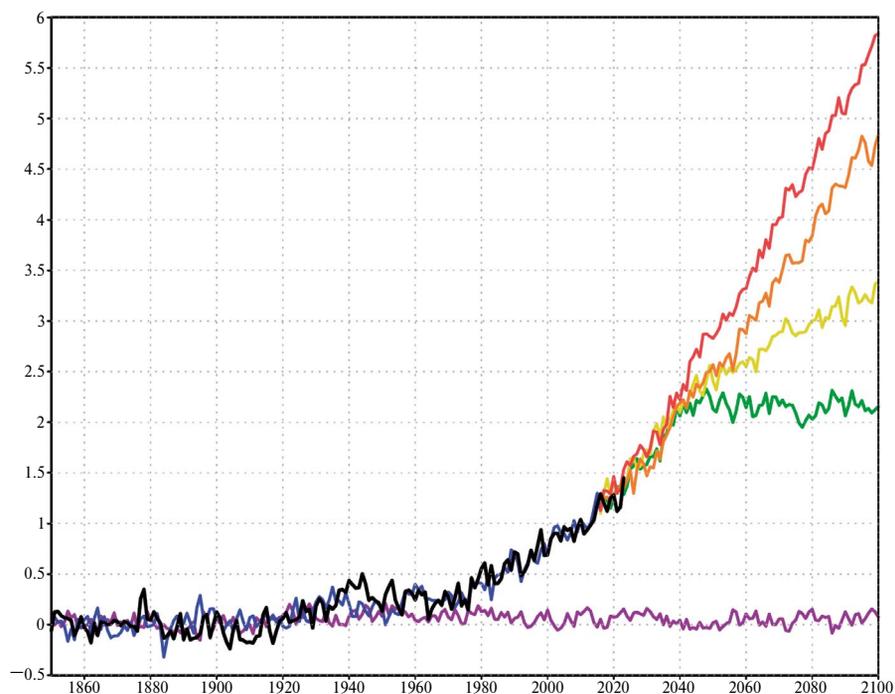


Рис. 3. Отклонение глобально осредненной среднегодовой приземной температуры воздуха в историческом эксперименте (синий) и экспериментах по сценариям SSP1-2.6 (зеленый), SSP2-4.5 (желтый), SSP3-7.0 (оранжевый) и SSP5-8.5 (красный) от данных преиндустриального эксперимента. Изображены также данные преиндустриального эксперимента, где вычтено среднее за 1859–1899 гг. (фиолетовый), и данные наблюдений HADCRUT5 (черный) [Morice et al., 2020]

составляют, соответственно, около 2.0 К, 3.0 К, 4.3 К, 5.4 К [Tebaldi et al., 2021]. Для всех сценариев увеличения температуры к 2100 г. в модели ИВМ РАН немного больше средних по CMIP6, но вполне укладываются в межмодельный диапазон неопределенности.

Усовершенствования модели климатической системы, планируемые на ближайшие годы, могут быть связаны с дальнейшей детализацией углеродного цикла суши: включение учета накопления торфа в болотах, учет изменения землепользования, учет азотного цикла, учет пожаров. Возможно также включение более детального углеродного цикла океана, учитывающего биохимию и блока атмосферной химии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН при финансовой поддержке гранта молодежной лаборатории “Развитие суперкомпьютерных технологий моделирования Земной системы” (Соглашение с Минобрнауки № 075-03-2025-574/1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н.* Описание модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН, версия 1997 года / Препринт ИВМ РАН N 2086-B98. 1998. 180 с.
- Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М.* Анализ воспроизведения динамического взаимодействия тропосферы и стратосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2018. № 11. С. 100–109.
- Володин Е.М.* Совместная модель общей циркуляции атмосферы и тропиков Тихого океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 1–14.
- Володин Е.М.* Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 298–313.
- Володин Е.М.* Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 163–170.
- Володин Е.М.* Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 19–26.
- 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. 255–266.
- Володин Е.М., Дианский Н.А.* Моделирование изменений климата в XX–XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 291–306.
- Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 448–466.
- Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 379.
- Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапка А.Г.* Моделирование изменений климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 467–476.
- Володин Е.М., Кострыкин С.В.* Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 5–17.
- Володин Е.М., Лысков В.Н.* Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 4. С. 453–465.
- Воробьева В.В., Володин Е.М.* Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН // Математическое моделирование. 2020. Т. 32. № 11. С. 47–58.
- Воробьева В.В., Володин Е.М., Грицун А.С., Тарасевич М.А.* Анализ предсказуемости состояния атмосферы и верхнего слоя океана на срок до 5 лет с помощью ретроспективных прогнозов моделью климата INMCM5 // Метеорология и гидрология. 2023. № 7. С. 36–47.
- Галин В.Я.* Формирование радиационных притоков тепла в модели общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 3. С. 380–389.
- Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // Метеорология и гидрология. 2003. № 5. С. 13–23.

- Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 437–452.
- Дианский Н.А., Багно А.В., Залесный В.Б. Сигма-модель глобальной циркуляции океана и ее чувствительность к вариациям напряжения трения ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 533–556.
- Дианский Н.А., Володин Е.М. Воспроизведение современного климата в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 6. С. 732–747.
- Дымников В.П., Фоменко А.А. Моделирование циркуляции атмосферы Земли с орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные процессы и системы. М.: Наука, 1986.
- Израэль Ю.А., Володин Е.М., Кострыкин С.В., Ревокатова А.П., Рябошапка А.Г. Возможность геоинженерной стабилизации глобальной температуры в XXI веке с использованием стратосферных аэрозолей и оценка возможных негативных последствий // Метеорология и гидрология. 2013. № 6. С. 9–23.
- Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть II. Модели общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 43–61.
- Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б., Лыкосов В.Н., Галин В.Я. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 320 с.
- Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энергобалансовой модели для использования криосферного компонента в климатическую модель. Часть I. Описание модели и расчеты климатических полей приземной температуры и осадков // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 33–45.
- Рыбак О.О., Володин Е.М., Морозова П.А. Реконструкция климата Эемского межледниковья с помощью модели земной системы. Часть 2. Реакция Гренландского ледникового щита на климатические изменения // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 33–40.
- Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Емелина С.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. Оценка изменений температурного режима в Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 14–28.
- Хан В.М., Круглова Е.Н., Тищенко В.А., Куликова И.А., Субботин А.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Тарасевич М.А., Воробьева В.В. Верификация сезонных ансамблевых прогнозов на базе модели Земной системы INM-CM5 // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 40–55.
- Чубарова Н.Е., Полохов А.А., Володин Е.М. Совершенствование расчета эволюции сульфатного аэрозоля и его радиационных эффектов в климатической модели ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 421–431.
- Юрова А.Ю., Володин Е.М. Совместное моделирование климата с учетом динамики растительного покрова // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 5. С. 579–588.
- Яковлев Н.Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1. Численная модель и среднее состояние // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 383–398.
- Betts A.K. A new convective adjustment scheme. Part 1. Observational and theoretical basis // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1986. V. 112. P. 677–691.
- Bonan G.B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: technical description and user's guide // NCAR Technical Note 417. NCAR, Boulder, Colorado, 1996. 156 p.
- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R. World Ocean Atlas 2009, V. 2. Salinity. [S. Levitus (eds.)] / NOAA Atlas NESDIS 69. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C., 2010. 184 p.
- Bragina V.V., Volodin E.M., Chernenkov A. Yu., Tarasevich M.A. Simulation of climate changes in Northern Eurasia by two versions of INM RAS Earth system model // Climate Dynamics. 2024. V. 62. № 8. P. 3383–3397.
- Brierley C.M., Zhao A., Harrison S.P., Braconnot P., Williams C.J.R., Thornalley D.J.R., Shi X., Peterschmitt J.-Y., Ohgaito R., Kaufman D.S., Kageyama M., Hargreaves J.C., Erb M.P., Emile-Geay J., D'Agostino R., Chandan D., Carré M., Bartlein P. J., Zheng W., Zhang Z., Zhang Q., Yang H., Volodin E.M., Tomas R.A., Routson C., Peltier W.R., Otto-Bliesner B., Morozova P.A., McKay N.P., Lohmann G., Legrande A.N., Guo C., Cao J., Brady E., Annan J.D., Abe-Ouchi A. Large-scale features and evaluation of the PMIP4-CMIP6 midHolocene simulations // Clim. Past. 2020. V. 16. P. 1847–1872.
- Chernenkov A., Volodin E., Kostrykin S., Tarasevich M., Vorobyeva V. Modification and Validation of the Soil-Snow Module in the INM RAS Climate Model // Atmosphere 2024. V.15 (4). P. 422.

- Friedlingstein P., Cox P., Betts R., Bopp L., Bloh W., Brovkin V., Cadule P., Doney S., Eby M., Fung I., Bala G., John J., Jones C., Joos F., Kato T., Kawamiya M., Knorr W., Lindsay K., Matthews H.D., Haddatz T., Rayner P., Reick C., Roeckner E., Schnitzler K., Schnur R., Strassmann K., Weaver A.J., Yoshikawa C., Zeng N.* Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 3337–3353.
- Gates W.L., Boyle J.S., Covey C., Dease C.G., Doutriaux C.M., Drach R.S., Fiorino M., Gleckler P.J., Hnilo J.J., Marlais S.M., Phillips T.J., Potter G.L., Santer B.D., Sperber K.R., Taylor K.E., Williams D.N.* An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP) // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1999. V. 80. P. 29–56.
- Gleckler P.* The second phase of Atmospheric Model Intercomparison Project. 2004. Available at https://pcmdi.llnl.gov/mips/amip/amip2_workshop_proceedings.pdf
- Gloukhov V.* Parallel Implementation of the INM Atmospheric General Circulation Model on Distributed Memory Multiprocessors. In: Sloot, P. M.A., Hoekstra, A.G., Tan, C.J.K., Dongarra, J.J. (eds) *Computational Science — ICCS 2002. ICCS 2002 // Lecture Notes in Computer Science*. V. 2329. Springer: Berlin, Heidelberg.
- Haarsma R.J., Roberts M.J., Vidale P.L., Senior C.A., Bellucci A., Bao Q., Chang P., Corti S., Fučkar N.S., Guevas V., von Hardenberg J., Hazeleger W., Kodama C., Koenigk T., Leung L.R., Lu J., Luo J.-J., Mao J., Mizie-linski M.S., Mizuta R., Nobre P., Satoh M., Scoccimarro E., Semmler T., Small J., von Storch J.-S.* High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 4185–4208.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Hines C.O.* Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59. № 4. P. 371–386.
- Hoffman F.M., Randerson J.T., Arora V.K., Bao Q., Cadule P., Ji D., Jones C.D., Kawamiya M., Khatiwala M., Lindsay K., Obata A., Shevliakova E., Six K.D., Tjiputra J.F., Volodin E.M., Wu T.* Causes and implications of persistent atmospheric carbon dioxide biases in Earth System Models // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2014. V. 119. P. 141–162.
- Kageyama M., Harrison S.P., Kapsch M.-L., Lofverstrom M., Lora J.M., Mikolajewicz U., Sherriff-Tadano S., Vadsaria T., Abe-Ouchi A., Bouttes N., Chandan D., Gregoire L.J., Ivanovic R.F., Izumi K., LeGrande A.N., Lhardy F., Lohmann G., Morozova P.A., Ohgaito R., Paul A., Peletier W.R., Poulsen C.J., Quiquet A., Roche D.M., Shi X., Tierney J.E., Valdes P.J., Volodin E., Zhu J.* The PMIP4 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3 simulations // *Clim. Past*. 2021. V. 17. P. 1065–1089.
- Kulyamin D.V., Volodin E.M.* INM RAS coupled atmosphere — ionosphere general circulation model INMAIM (0-130 km) // *Russ. J. Num. Analysis and Math. Modelling*. 2018. V. 33. № 6. P. 351–357.
- Kwizak M., Robert A.J.* A semi-implicit scheme for grid point atmospheric models of the primitive equations // *Mon. Wea. Rev.* 1971. V. 99. P. 32–36.
- Lunt D.J., Bragg F., Chan W.-L., Hutchinson D.K., Ladant J.-B., Morozova P., Niezgodzki I., Steinig S., Zhang Z., Zhu J., Abe-Ouchi A., Anagnostou E., de Boer A.M., Coxall H.K., Donnadieu Y., Foster G., Inglis G.N., Knorr G., Langebroek P.M., Lear C.H., Lohmann G., Poulsen C.J., Sepulchre P., Tierney J.E., Valdes P.J., Volodin E.M., Dunkley Jones T., Hollis C.J., Huber M., Otto-Bliesner B.L.* DeepMIP: model intercomparison of early Eocene climatic optimum (EECO) large-scale climate features and comparison with proxy data // *Clim. Past*. 2021. V. 17. P. 203–227.
- Mareev E.A., Volodin E.* Variation of the global electric circuit and Ionospheric potential in a general circulation model // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 9009–9016.
- Meehl G.A., Senior C.A., Eyring V., Flato G., Lamarque J.-F., Stouffer R.J., Taylor K.E., Schlund M.* Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models // *Sci. Adv.* 2020. V. 6. eaba1981.
- 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 data set // *J. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. V. 126. e2019JD032361.
- Otto-Bliesner B.L., Brady E.C., Zhao A., Brierley C.M., Axford Y., Capron E., Govin A., Hoffman J.S., Isaacs E., Kageyama M., Scussolini P., Tzedakis P.C., Williams C.J.R., Wolff E., Abe-Ouchi A., Braconnot P., Ramos Buarque S., Cao J., de Vernal A., Guarino M., Guo C., LeGrande A.N., Lohmann G., Meissner K.J., Menviel L., Morozova P.A., Nisancioglu K.H., Oishi R., Salas y Méliá D., Shi X., Sicard M., Sime L., Stepanek C., Tomas R., Volodin E., Yeung N.K.H., Zhang Q., Zhang Z., Zheng W.* Large-scale features of Last Interglacial climate: results from evaluating the lig127k simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)—Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4) // *Clim. Past*. 2021. V. 17. P. 63–94.
- Sillmann J., Kharin V.V., Zhang X., Zwiers F.W., Bronaugh D.* Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel

- ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 1716–1733.
- Tebaldi C., Debeire K., Eyring V., Fischer E., Fyfe J., Friedlingstein P., Knutti R., Lowe J., O'Neill B., Sanderson B., van Vuuren D., Riahi K., Meinshausen M., Nicholls Z., Tokarska K.B., Hurtt G., Kriegler E., Lamarque J.-F., Meehl G., Moss R., Bauer S.E., Boucher O., Brovkin V., Byun Y.-H., Dix M., Gualdi S., Guo H., John J. G., Kharin S., Kim Y., Koshiro T., Ma L., Olivie D., Panickal S., Qiao F., Rong X., Rosenbloom N., Schupfner M., Séférian R., Sellar A., Semmler T., Shi X., Song Z., Steger C., Stouffer R., Swart N., Tachiiri K., Tang Q., Tatebe H., Voldoire A., Volodin E., Wyser K., Xin X., Yang S., Yu Y., Ziehn T.* Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6 // *Earth Syst. Dynam.* 2021. V. 12. P. 253–293.
- Terekhov K.M., Volodin E.M., Gusev A.V.* method and efficiency estimation of the parallel implementation of the sigma-model of general ocean circulation // *Russ. J. Num. Analysis and Math. Modelling.* 2011. V. 26. № 2. P. 189–208.
- Tiedtke M.* Representation of clouds in large-scale models // *Mon. Weather Rev.* 1993. V. 121. P. 3040–3061.
- Todd-Brown K., Randerson J.T., Hopkins F., Arora V., Hajima T., Jones C., Shevliakova E., Tjiputra J., Volodin E., Wu T., Zhang Q., Allison S.D.* Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century // *Biogeosciences.* 2014. V. 11. P. 2341–2356.
- Vichi M., Cossarini G., Gutierrez Mlot E., Lazzari P., Lovato T., Mattia G., Masina S., McKiver W., Pinaridi N., Solidoro C., Zavatarelli M.* The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5 (BFM-V5). Release 1.0 // BFM Report series № 1. March 2013. Bologna, Italy. <http://bfm-community.eu>. P. 87.
- Volodin E.* The mechanisms of cloudiness evolution responsible for equilibrium climate sensitivity in climate model INM-CM4-8 // *Geophysical Research Letters.* 2021. V. 48. e2021GL096204.
- Volodin E., Gritsun A.* Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // *Earth Syst. Dynam.* 2018. V. 9. P. 1235–1242.
- 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.* Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Clim. Dyn.* 2017. V. 49. P. 3715–3734.
- Volodin E., Schmitz G.* A troposphere–stratosphere–mesosphere general circulation model with parameterization of gravity waves: climatology and sensitivity studies // *Tellus A.* 2001. V. 53. № 3. P. 300–316.
- Vorobyeva V., Volodin E.* Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A.* 2021. V. 73. P. 1892435.
- Yakovlev N.G.* Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean in 1948–2002: Part I. Numerical model // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2009. V. 45. № 3. P. 357–371.
- Yurova A.Y., Volodin E.M., Ågren G.I., Chertov O.G., Komarov A.S.* Effects of variations in simulated changes in soil carbon contents and dynamics on future climate projections // *Global Change Biology.* 2010. V. 16. P. 823–835.
- Zalesny V.B., Gusev A.V.* Mathematical model of the World Ocean dynamics with algorithms of variational assimilation of temperature and salinity fields // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2009. V. 24. № 2. P. 171–191.
- Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin 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.

DEVELOPMENT OF INM RAS EARTH CLIMATE SYSTEM MODEL

© 2025 E. M. Volodin^{1,2,*}, A. S. Gritsun², V. V. Bragina², M. A. Tarasevich^{2,3}, A. Yu. Chernenkov¹

¹*Institute of Geography RAS, Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017 Russia*

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkina str., 8, Moscow, 119333 Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701 Russia*

*e-mail: volodinev@gmail.com

The history of Earth climate system model development is considered from studies of G.I. Marchuk to present state. A number of climate processes considered in the model is shown. Simulation of present climate and climate changes by actual model version is presented shortly.

Keywords: model, climate, parameterization, atmosphere, ocean