

Применение моделей прогноза погоды для моделирования климата

М.А. Толстых^{1),2)}

¹⁾ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
Россия, 119991, Москва, ул. Губкина, 8

²⁾ Гидрометцентр России,
Россия, 123376, Москва, Б. Предтеченский пер., 13, стр. 1

Адрес для переписки: *m.tolstykh@inm.ras.ru*

Реферат. Рассматривается концепция бесшовных моделей атмосферы, предназначенных как для численного прогноза погоды, так и моделирования изменений климата. Она состоит в том, что в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. В силу нелинейности атмосферы процессы всех пространственных и временных масштабов взаимодействуют между собой. Таким образом, модель атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо явлений, должна адекватно воспроизводить явления всех временных масштабов. Говорить о бесшовных моделях атмосферы как об универсальных моделях, работающих при любых возможных шагах сетки, неверно. Одна и та же модель не может применяться при шаге сетки около 1-2 км и 50-80 км, так как в первом случае процессы образования конвективных осадков в основном описываются явным образом, а во втором случае глубокая конвекция является процессом подсеточного масштаба, который надо представить параметрически.

В статье приводится обзор реализаций многомасштабных моделей на примере некоторых зарубежных (объединенная модель Метеофиса Великобритании и европейская модель ЕС Earth 3) и отечественной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ. Приводится пример модификации параметризации глубокой конвекции, разработанной для климатической версии модели ПЛАВ, использование которой позволило существенно уменьшить ошибки среднесрочного прогноза в тропиках. Применение одной и той же модели атмосферы для численного прогноза погоды и для вероятностного прогноза крупномасштабных аномалий погоды на месяц и сезон, для воспроизведения современного климата (в составе модели Земной системы) вполне возможно и дает хорошие результаты. Дальнейшее применение концепции бесшовного прогноза все больше основано на моделях Земной системы, включающих в себя также модели Мирового океана, морского льда, малых газовых составляющих и др. Важной задачей является и развитие систем усвоения данных наблюдений для таких совместных моделей.

Ключевые слова. Бесшовный прогноз, модели общей циркуляции атмосферы.

Application of numerical weather prediction models for climate modelling

M.A. Tolstykh^{1),2)}

¹⁾Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences,
8, Gubkina str., 119991, Moscow, Russian Federation

²⁾Hydrometcentre of Russia,
13/1, B. Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *m.tolstykh@inm.ras.ru*

Abstract. The concept of seamless prediction atmospheric models designed both for numerical weather forecasting and climate change modeling is considered. It consists in the fact that there are no artificial time boundaries in the atmosphere that separate synoptic, seasonal and interannual scales. Due to the nonlinearity of the atmosphere, the processes of all spatial and time scales interact with each other. Thus, an atmospheric model focused on reproducing any phenomena must adequately reproduce phenomena of all time scales. It is wrong to talk about seamless atmosphere models as universal models that function at any possible mesh sizes. The same model cannot be used at the horizontal resolution of about 1-2 km and 50-80 km, since the processes of convective precipitation formation are mainly described explicitly in the first case while the deep convection is a sub-grid scale process that has to be parametrized in the second case.

The article provides an overview of the implementations of multiscale models with the example of some foreign (the unified model (UM) of the UK MetOffice and the European model EC Earth 3) and Russian SL-AV atmosphere general circulation model. An example of a modification to the deep convection parameterization developed for the climatic version of the SL-AV model is given that significantly reduced the errors of the medium-range forecast in the tropics. The use of the same atmosphere model for numerical weather prediction, for probabilistic forecast of large-scale weather anomalies at monthly and seasonal scale, and for the reproduction of the modern climate (as a part of the Earth system model) is quite possible and gives good results. The further application of the seamless prediction concept is increasingly based on the Earth system models, including also the global ocean model, sea ice model, small gas components model, etc. An important task is the development of systems for assimilating observational data for such coupled models.

Keywords. Seamless prediction, atmosphere general circulation models.

Введение

Современный подход к решению задачи воспроизведения и прогнозирования состояния атмосферы, опирается на широкое использование математических моделей. Модели используют разбиение атмосферы на трехмерные

элементы (чаще всего, параллелепипеды). Эти модели состоят из блоков, один из которых, т.н. динамическое ядро, предназначен для решения системы дискретных уравнений гидротермодинамики атмосферы в каждом элементе. Второй блок включает в себя набор параметрических описаний процессов подсеточного масштаба, например, приземного пограничного слоя, глубокой конвекции, и др. Исторически проблема моделирования атмосферы разделилась на две слабосвязанных между собой задачи: прогноз погоды на срок от нескольких часов до десятка дней и воспроизведение климата (и его изменений) на временных масштабах от нескольких лет и больше.

С начала 70-х годов прошлого века, когда появились первые модели общей циркуляции атмосферы, модели атмосферы, предназначенные для прогноза погоды и для моделирования климата, развивались в основном независимо. Во главу угла развития моделей прогноза погоды было поставлено повышение пространственной детализации моделей, усложнение параметрического описания «быстрых» процессов (например, планетарный пограничный слой, глубокая конвекция). При развитии моделей климата больше внимания уделялось описанию «медленных» атмосферных процессов, например, солнечной и тепловой радиации, а также развитию моделей сред, участвующих в формировании климата (океан, морской лед, биосфера, малые газовые составляющие и т.д.).

Несмотря на то, что моделируется одна и та же среда – атмосфера, большинство математических моделей климата даже сейчас не могут дать удовлетворительный прогноз погоды на несколько дней. Это выявилось еще в середине 2000-х годов при анализе результатов проекта СМIP3. Справедливо и обратное: модели прогноза погоды очень часто воспроизводят современный климат со значительными ошибками.

В 2005 году была выдвинута концепция многомасштабной модели атмосферы (или бесшовного прогноза) (Shukla, 2009). Она состоит в том, что в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. В силу нелинейности атмосферы процессы всех пространственных и временных масштабов взаимодействуют между собой. Таким образом, модель атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо явлений, должна адекватно воспроизводить явления всех временных масштабов. Например, известно, что внутренние колебания системы атмосфера-океан климатического масштаба – Эль-Ниньо-Южное колебание, Северо-Атлантическое колебание – оказывают заметное влияние на частоту, интенсивность и траектории тропических и внетропических циклонов. Мезомасштабные процессы в атмосфере, в свою очередь, влияют на процессы климатического масштаба.

Постепенный рост вычислительных ресурсов привел к тому, что модели прогноза погоды стали все чаще включать в себя элементы, ранее характерные лишь для моделей климата (например, описания аэрозолей и связанных с ними процессов). Модели климата, по мере роста доступных вычислительных ресурсов и, следовательно, разрешения, в свою очередь, потребовали описания ряда процессов на уровне, который ранее требовался лишь в моде-

лях прогноза погоды. Подробный обзор концепции бесшовного прогноза, перспектив ее развития и ее обоснование был приведен в (Hoskins, 2013). Отметим, что сегодня видно, что автор этой работы правильно разглядел большой потенциал этой концепции. Затем словосочетание «бесшовный прогноз» стало лозунгом Всемирной программы исследования погоды Всемирной метеорологической организации (WMO, 2015).

В силу популярности, словосочетание «бесшовный прогноз» стали понимать слишком буквально. Некоторые ученые стали говорить о бесшовных моделях атмосферы, как об универсальных моделях, работающих при любых возможных на сегодня шагах сетки. Отметим, что авторы идеи бесшовного прогноза такого не говорили, скорее, имелось в виду, что модель среднесрочного прогноза погоды может использоваться для моделирования изменений климата и наоборот. Но одна и та же модель не может применяться при шаге сетки около 1-2 км и 50-80 км, так как в первом случае процессы образования конвективных осадков в основном описываются явным образом, а во втором случае глубокая конвекция (характерный размер конвективных ячеек от нескольких сотен метров до первых километров) является процессом подсеточного масштаба, который надо представить параметрически. Моделирование циркуляции атмосферы с шагом сетки в 1 км, безусловно, означает формулировку модели на основе негидростатических уравнений, в то время как при шаге сетки 7 км и грубее, характерном в настоящее время для моделей среднесрочного прогноза, можно использовать традиционное приближение гидростатики. Также процессы торможения гравитационных волн орографического происхождения при шаге сетки порядка 1 км описываются явно. В ряде случаев одна и та же модель, например (Walter et al., 2019), применяет различные описания одного и того же процесса в зависимости от задачи – прогноза либо моделирования климата.

Важным преимуществом единой модели для воспроизведения климата и численного прогноза погоды является возможность объединения усилий обычно немногочисленных специалистов разного профиля для ее поддержки и дальнейшего развития.

Зарубежный опыт

Разработка и применение одной и той же модели атмосферы для прогноза погоды и моделирования изменений климата восходит к началу 1990-х годов. В метеослужбе Великобритании и центре Гадлея была разработана унифицированная модель атмосферы, Unified Model (UM) (Walters et al., 2019). В частности, никакие усовершенствования в модели прогноза погоды не принимались до тех пор, пока модельный «климат» в эксперименте по протоколу AMIP становился как минимум не хуже, чем в исходной версии модели. Согласно протоколу AMIP, моделируется состояние атмосферы в период с 1979 по 1996 при заданной эволюции температуры поверхности океана, концентрации морского льда и др. Фактически модель МетОфиса стала первой моделью бесшовного прогноза.

В последнее десятилетие модель численного прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) в версии для долгосрочного прогноза активно продвигается как инструмент для исследований климата. Для этого была создана ее условно свободно распространяемая версия OpenIFS, доступная европейским университетам. На основе OpenIFS создана полная модель Земной системы EC-Earth. В настоящее время существует уже версия EC-Earth3 (Döscher et al., 2022), которая участвовала во многих экспериментах по программе международного эксперимента по сравнению моделей климата CMIP6. Эта модель развивается и широко применяется во многих университетах Западной Европы.

Отметим, что ранее в рамках проекта CMIP существовал подпроект TransposeAMIP (Williams et al., 2019), в рамках которого модели климата пытались рассчитывать прогноз погоды с заблаговременностью пять дней, а результаты прогнозов использовались для уточнения воспроизведения процессов в тропической атмосфере в моделях климата.

Отечественный опыт

В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН с 1997 года развивается глобальная модель атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) (Толстых и др., 2017). Глобальная модель атмосферы ПЛАВ применяется в Гидрометцентре России для оперативного среднесрочного и долгосрочного прогнозов. Как и все модели общей циркуляции атмосферы, модель включает блок решения уравнений гидротермодинамики атмосферы (в данном случае в гидростатическом приближении) и блок параметризаций процессов подсеточного масштаба. Динамический блок модели основан на оригинальной формулировке в терминах вертикального компонента абсолютной завихренности и горизонтальной дивергенции, применяет ряд оригинальных вычислительных алгоритмов, подробное описание приводится в (Tolstykh et al., 2017). Блок параметризаций включает в себя алгоритмы описания процессов, разработанные в консорциуме по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE (Termonia et al., 2018), свободно распространяемые коды для расчета коротко- и длинноволновой радиации, модель многослойной почвы ИВМ РАН-НИВЦ МГУ (Володин, Лыкосов, 1998), а также некоторые параметризации, разработанные в ИВМ РАН.

Подробное описание модели ПЛАВ приводится в (Толстых и др., 2017). Изначально модель разрабатывалась как модель среднесрочного (с заблаговременностью до 5-10 дней) прогноза погоды. Однако уже в 2005 году началось опытное применение модели в расчетах долгосрочных прогнозов погоды с заблаговременностью до 4 месяцев. Этот опыт оказался по тем временам вполне успешным в части прогнозов во внетропической части Северного полушария (Тросников и др., 2005). По мере развития модели, в результате усилий по усовершенствованию динамического блока и описания процессов подсеточного масштаба (Толстых и др., 2015), все время возрастал времен-

ной масштаб атмосферных явлений, успешно воспроизводимых моделью ПЛАВ (Фадеев и др., 2019). Так, в результате работ как по повышению вертикального разрешения модели ПЛАВ, так и включению в модель параметрического учета торможения гравитационных волн неорографического характера, с 2018 года модель ПЛАВ успешно воспроизводит квазидвухлетнее колебание зонального компонента скорости ветра в стратосфере (Шашкин и др., 2019). Это внутреннее колебание атмосферы является одним из предикторов долгосрочного прогноза, см., например, (Kidston et al., 2015). Отметим, что отнюдь не все глобальные модели прогноза погоды воспроизводят это явление, в том числе, как выяснилось, его пока не воспроизводят некоторые модели, изначально настроенные лишь на среднесрочный прогноз погоды. Различные применения модели ПЛАВ проиллюстрированы на рис. 1.

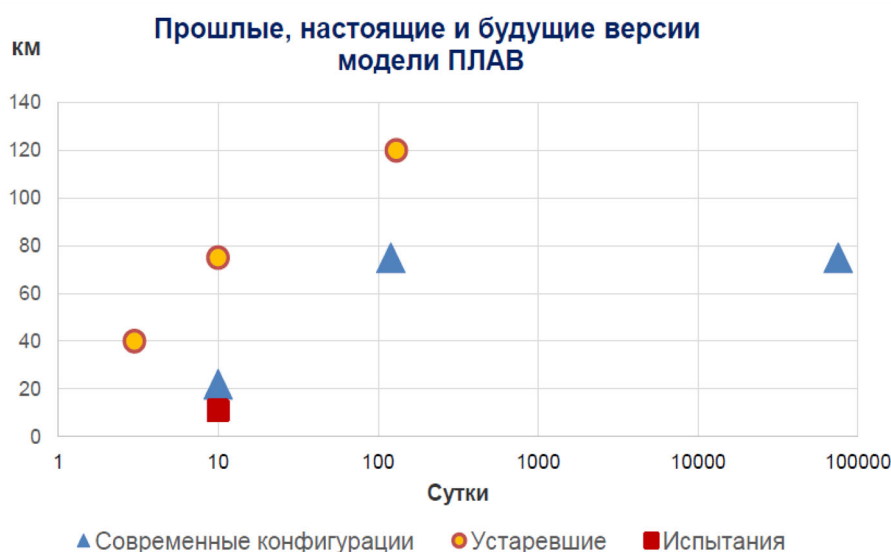


Рисунок 1. Различные конфигурации модели ПЛАВ

По оси абсцисс – продолжительность моделирования (максимальная заблаговременность прогноза), сутки. По оси ординат – характерный шаг сетки по горизонтали, км

Figure 1. Various configuration of SL-AV models

On the x-axis – duration of modeling (maximum advance forecast), day. On the ordinate axis – characteristic horizontal resolution of space grid, km

В последние годы удалось добиться существенного прогресса в качестве воспроизведения современного климата моделью ПЛАВ (Шашкин и др., 2023). В частности, для климатической версии была разработана и внедрена важная модификация расчета вертикального переноса импульса в процессе глубокой конвекции. Это усовершенствование позволило устранить т.н. «раздвоение» внутритропической зоны конвергенции и добиться хорошего совпадения среднегодового поля осадков с наблюдениями в версии модели горизонтальным разрешением около 75 км. Эта же модификация была затем применена в новой версии модели ПЛАВ для среднесрочного прогноза, имеющей горизонтальное разрешение вблизи экватора 11 км, что позволило существенно снизить ошибки прогноза в тропиках, в частности, практически

свести к нулю среднюю ошибку прогноза температуры на уровне 500 гПа (данные по прогнозам с заблаговременностями от 24 до 120 часов за период оперативных испытаний этой версии модели с 01 октября 2022 г по 15 апреля 2023 г.). Данный пример лишь подтверждает мировой опыт развития моделей атмосферы.

Дискуссия

Постепенно происходит стирание границ между моделями численного прогноза, ранее применявшимися только для прогноза на 7-10 дней, и моделями климата, которые предназначены для воспроизведения климата и его изменений. Представляется, что применение одной и той же модели атмосферы для численного прогноза погоды, для вероятностного прогноза крупномасштабных аномалий погоды на месяц и сезон, а также для воспроизведения современного климата вполне возможно и дает хорошие результаты. Можно утверждать, что такое взаимообогащение моделей повышает способность моделей к воспроизведению атмосферных процессов всех масштабов. Тому пример опыт ряда ведущих мировых прогностических центров, например, МетОфиса Великобритании, успешно применяющего одну и ту же модель для всех вышеупомянутых приложений. Имеется и пример в отечественной практике. В то же время, модели прогноза и климата имеют разные метрики ошибок, и для достижения наилучшего результата в ряде случаев необходимо применять разные описания процессов подсеточного масштаба в зависимости от приложения.

Важно заметить, что для долгосрочного прогноза и тем более моделирования современного климата модель атмосферы должна работать в составе модели Земной системы. Такие модели включают в себя также модели Мирового океана, морского льда, малых газовых составляющих и др. В настоящее время уже почти все оперативные системы долгосрочного прогноза в мире (кроме Бразилии и России) основаны на совместных моделях, как минимум, атмосферы, океана и морского льда (WMO LC LRF MME, 2023). Заметной тенденцией последних лет является все более частое применение совместных моделей атмосферы и других сред в среднесрочном и даже краткосрочном прогнозе погоды (WGNE, 2022). В частности, совместная модель атмосферы, океана и морского льда с 2020 года применяется оперативно в ЕЦСПП, а с 2022 года аналогичная модель применяется в МетОфисе Великобритании. При этом прогностическая система ЕЦСПП включает в себя также и описание эволюции малых газовых составляющих, таких, как озон, метан, углекислый газ, а также аэрозолей. Во многом качество прогноза такой системы определяет система усвоения данных, которая теперь должна усваивать данные наблюдений во всех моделируемых средах. Разработка совместной системы усвоения является весьма трудоемкой и вычислительно емкой задачей. Дополнительной сложностью здесь являются разные характерные времена процессов и частота наблюдений в различных средах. Поэтому часто применяют отдельные системы усвоения для каждой из сред. В настоящее

время системы усвоения данных наблюдений в океане работают в оперативном режиме в ряде зарубежных центров, также в рамках европейского консорциума Коперникус работает система усвоения данных наблюдений за рядом малых газовых составляющих.

Благодарности

Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта РНФ 21-17-00254 (<https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

Список литературы

Володин, Е.М., Лыкосов, В.Н. (1998) Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 34, № 4, с. 453-465.

Тросников, И.В., Казначеева, В.Д., Киктев, Д.Б., Толстых, М.А. (2005) Оценка потенциальной предсказуемости метеорологических величин при динамическом сезонном моделировании циркуляции атмосферы на основе полулагранжевой модели SL-AV, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-17.

Толстых, М.А., Желен, Ж.Ф., Володин, Е.М., Богословский, Н.Н., Вильфанд, Р.М., Киктев, Д.Б., Красюк, Т.В., Кострыкин, С.В., Мизяк, В.Г., Фадеев, Р.Ю., Шашкин, В.В., Шляева, А.В., Эзау, И.Н., Юрова, А.Ю. (2015) Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 25-35.

Толстых, М.А., Шашкин, В.В., Фадеев, Р.Ю., Шляева, А.В., Мизяк, В.Г., Рогутов, В.С., Богословский, Н.Н., Гойман, Г.С., Махнорылова, С.В., Юрова, А.Ю. (2017) Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза, рец. д.ф-м.н. А.В. Старченко, М., Триада ЛТД, 166 с., ISBN 978-5-9908623-3-3.

Фадеев, Р.Ю., Толстых, М.А., Володин, Е.М. (2019) Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 22-35.

Шашкин, В.В., Толстых, М.А., Володин, Е.М. (2019) Моделирование циркуляции стратосферы полуланранжевой моделью атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-21.

Шашкин, В.В., Фадеев, Р.Ю., Толстых, М.А., Криволуцкий, А.А, Банин, М.В. (2023) Воспроизведение процессов в стратосфере моделью общей циркуляции атмосферы ПЛАВ072L96, *Метеорология и гидрология*, № 6, в печати.

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth A., Arsouze, T., Bergmann, T., Bernadello, R., Bousetta, S., Caron, L.-P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F., Docquier, D.,

Echevarria, P., Zhang, Qi. (2022) The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Devel.*, vol. 15, pp. 2973-3020.

Hoskins, B.J. (2013) The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 139, pp. 573-584, doi:10.1002/qj.1991.

Kidston, J., Scaife, A., Hardiman, S., Mitchell, D., Butchart, N., Baldwin, M., Gray, L. (2015) Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geosci.*, vol. 8, pp. 433-440.

WMO (2015) *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*, WMO, Geneva, No. 1156, 471 p., ISBN: 978-92-63-11156-2.

Shukla, J. (2009) *Seamless Prediction of Weather and Climate: A New Paradigm for Modeling and Prediction Research*, NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series, NCEP, Maryland, 8 p., available at: https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY09CTBSeminars/shukla_021009.htm (accessed 12 May 2023).

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A. (2018) The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geosci. Model Dev.*, vol. 11, pp. 257-281, doi: 10.5194/gmd-11-257-2018.

Walters, D., Baran, A.J., Boutle, I., Brooks, M., Earnshaw, P., Edwards, J., Furtado, K., Hill, P., Lock, A., Manners, J., Morcrette, C., Mulcahy, J., Sanchez, C., Smith, C., Stratton, R., Tennant, W., Tomassini, L., Van Weverberg, K., Vosper, S., Willett, M., Browse, J., Bushell, A., Carslaw, K., Dalvi, M., Essery, R., Gedney, N., Hardiman, S., Johnson, B., Johnson, C., Jones, A., Jones, C., Mann, G., Milton, S., Rumbold, H., Sellar, A., Ujiie, M., Whittall, M., Williams, K., Zerroukat, M. (2019) The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations, *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, pp. 1909-1963, doi 10.5194/gmd-12-1909-2019.

WGNE *Overview of Plans of NWP Centre's with Global Forecasting Systems* (2022) Available at https://wgne.net/wp-content/uploads/2022/11/wgne_table_2022_v2.xls (accessed 12 May 2023).

Williams, K.D., Bodas-Salcedo, A., Déqué, M., Fermepin, S., Medeiros, B., Watanabe, M., Jakob, C., Klein, S.A., Senior, C.A., Williamson, D.L. (2019) The Transpose-AMIP II experiment and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models, *J. Climate*, vol. 26, pp. 3258-3274, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00429.1.

WMO LRF MME (WMO Lead Center for Long Range Forecasts Multi-Model Ensemble) (2023) *Seasonal->System Configuration Information*, available at <https://wmo.org/contents2/index> (accessed 12 May 2023).

References

- Volodin, E.M., Lykosov, V.N. (1998) Parametrizaciya processov teplo- i vlagoobmena v sisteme rastitel'nost' – pochva dlya modelirovaniya obshchej cirkulyacii atmosfery. 1. Opisanie i raschety s ispol'zovaniem lokal'nyh dannyh [Parameterization of Heat and Moisture Processes in Soil-Vegetation System. 1. Description and Calculations Using Local Observational Data], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 34, no. 4, pp. 453-465.
- Trosnikov, I.V., Kaznacheeva, V.D., Kiktev, D.B., Tolstyh, M.A. (2005) Ocenka potencial'noj predskazuemosti meteorologicheskikh velichin pri dinamicheskom sezonnom modelirovanii cirkulyacii atmosfery na osnove polulagranzhevoj modeli SL-AV [Estimation of the potential predictability of meteorological quantities in dynamic seasonal modeling of atmospheric circulation based on the semi-Lagrangian SL-AV model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-17.
- Tolstyh, M.A., Zhelen, Zh.F., Volodin, E.M., Bogoslovskij, N.N., Vil'fand, R.M., Kiktev, D.B., Krasnyuk, T.V., Kostykin, S.V., Mizyak, V.G., Fadeev, R.Yu., Shashkin, V.V., Shlyayeva, A.V., Ezau, I.N., Yurova, A.Yu. (2015) Razrabotka mnogomasshtabnoj versii global'noj modeli atmosfery PLAV [Development of the Multiscale Version of the SL-AV Global Atmosphere Model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, vol. 25-35.
- Tolstyh, M.A., Shashkin, V.V., Fadeev, R.Yu., Shlyayeva, A.V., Mizyak, V.G., Rogutov, V.S., Bogoslovskij, N.N., Gojman, G.S., Mahnorylova, S.V., Yurova, A.Yu. (2017) *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza* [Atmosphere modeling system for seamless prediction], in A.V. Starchenko (ed.), Triada, Moscow, Russia, 166 p., ISBN 978-5-9908623-3-3.
- Fadeev, R.Yu., Tolstyh, M.A., Volodin, E.M. (2019) Klimaticheskaya versiya modeli atmosfery PLAV: razrabotka i pervye rezul'taty [Climate Version of the SL-AV Atmosphere Model: Development and First Results], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 22-35.
- Shashkin, V.V., Tolstyh, M.A., Volodin, E.M. (2019) Modelirovanie cirkulyacii stratosfery polulangranzhevoj model'yu atmosfery PLAV [Modelling of the Stratosphere Circulation Using SL-AV Semi-Lagrangian Model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 5-21.
- Shashkin, V.V., Fadeev, R.Yu., Tolstyh, M.A., Krivoluckij, A.A., Banin, M.V. (2023) Vosproizvedenie processov v stratosfere model'yu obshchej cirkulyacii atmosfery PLAV072L96 [Reproduction of processes in the stratosphere by the general circulation model of the atmosphere PLAV072L96], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, in press.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth A., Arsouze, T., Bergmann, T., Bernadello, R., Bousetta, S., Caron, L.-P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F., Docquier, D., Echevarria, P., Zhang, Qi. (2022) The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Devel.*, vol. 15, pp. 2973-3020.

Hoskins, B.J. (2013) The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 139, pp. 573-584, doi:10.1002/qj.1991.

Kidston, J., Scaife, A., Hardiman, S., Mitchell, D., Butchart, N., Baldwin, M., Gray, L. (2015) Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geosci.*, vol. 8, pp. 433-440.

WMO (2015) *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*, WMO, Geneva, No. 1156, 471 p., ISBN: 978-92-63-11156-2.

Shukla, J. (2009) *Seamless Prediction of Weather and Climate: A New Paradigm for Modeling and Prediction Research*, NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series, NCEP, Maryland, 8 p., Available at: https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY09CTBSeminars/shukla_021009.htm (accessed 12 May 2023).

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., Joly, A. (2018) The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geosci. Model Dev.*, vol. 11, pp. 257-281, doi: 10.5194/gmd-11-257-2018.

Walters, D., Baran, A.J., Boutle, I., Brooks, M., Earnshaw, P., Edwards, J., Furtado, K., Hill, P., Lock, A., Manners, J., Morcrette, C., Mulcahy, J., Sanchez, C., Smith, C., Stratton, R., Tennant, W., Tomassini, L., Van Weverberg, K., Vosper, S., Willett, M., Browse, J., Bushell, A., Carslaw, K., Dalvi, M., Essery, R., Gedney, N., Hardiman, S., Johnson, B., Johnson, C., Jones, A., Jones, C., Mann, G., Milton, S., Rumbold, H., Sellar, A., Ujiie, M., Whittall, M., Williams, K., Zerroukat, M. (2019) The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations, *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, pp. 1909-1963, doi 10.5194/gmd-12-1909-2019.

WGNE Overview of Plans of NWP Centre's with Global Forecasting Systems (2022) Available at https://wgne.net/wp-content/uploads/2022/11/wgne_table_2022_v2.xls (accessed 12 May 2023).

Williams, K.D., Bodas-Salcedo, A., Déqué, M., Fermepin, S., Medeiros, B., Watanabe, M., Jakob, C., Klein, S.A., Senior, C.A., Williamson, D.L. (2019) The Transpose-AMIP II experiment and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models, *J. Climate*, vol. 26, pp. 3258-3274, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00429.1.

WMO LRF MME (WMO Lead Center for Long Range Forecasts Multi-Model Ensemble) (2023) *Seasonal->System Configuration Information*, available at <https://wmo.org/contents2/index> (accessed 12 May 2023).

Статья поступила в редакцию (Received): 28.04.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.05.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Толстых, М.А. (2023) Применение моделей прогноза погоды для моделирования климата, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 318-329, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-318-329.

Tolstykh, M.A. (2023) Application of numerical weather prediction models for climate modelling, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 3, pp. 318-329, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-318-329.