

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.511.32

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-85-98

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
ПЛАНЕТАРНОЙ АТМОСФЕРЫАлексей Васильевич Быков¹, Андрей Леонидович Ветров², Петр Готлобович Фрик³, Андрей Николаевич Сухановский⁴, Николай Александрович Калинин⁵, Родион Александрович Степанов⁶^{1, 3, 4, 5, 6} Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия^{1, 2, 3, 4, 5} Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия¹ blexx256@yandex.ru² alvetrov@yandex.ru³ frick@icmm.ru⁴ san@icmm.ru⁵ kalinin@psu.ru⁶ rodion@icmm.ru

Аннотация. Общая циркуляция атмосферы играет важную роль в формировании погодных и климатических процессов, обеспечивая перенос и перераспределение тепла, влаги и углового момента. Изменения климата могут оказывать существенное влияние на элементы общей циркуляции атмосферы. Для понимания общих закономерностей циркуляции и возможных будущих изменений ее компонентов важно изучить ее состояние при предельных свойствах географической оболочки, в частности, типе деятельного слоя. Представлены результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы при упрощенных условиях подстилающей поверхности, в качестве которой рассмотрены океаническая и пустынная поверхности. Численный эксперимент выполнялся на глобальной модели, преобразованной из модели WRF-ARW, и воспроизводил динамику атмосферы продолжительностью 1 год. Предельные ситуации — глобальный океан или глобальная пустыня отразили роль фазовых переходов в атмосфере Земли. В первом случае вследствие парникового эффекта циркуляция не выражена из-за отсутствия значимого межширотного градиента. Во втором случае песчаная поверхность, в отличие от океана, не может аккумулировать большое количество тепла, поэтому воздух у поверхности земли быстро охлаждается в зимнем полушарии и быстро нагревается в летнем, исходя из чего пассатные течения не возникают. Комбинация океанических и пустынных зон (все однородны по меридиану) приводит к тому, что крупномасштабная циркуляция атмосферы приобретает черты, близкие к земной, что позволяет рассматривать такую конфигурацию базовой для дальнейших численных экспериментов. Проведенные эксперименты показали ведущую роль поглощенной части солнечной радиации (инсоляции) и вклада водяного пара (парниковый эффект, выделение скрытого тепла) при формировании крупномасштабных атмосферных течений. Реализованная модель WRF-ARW может успешно использоваться для моделирования общей циркуляции атмосферы при различных начальных и граничных условиях.

Ключевые слова: глобальная циркуляция атмосферы, математическое моделирование, WRF

Сведения о финансировании. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Для цитирования: Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А. Численное моделирование предельных состояний планетарной атмосферы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 4 (67). С.85–98. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-85-98

METEOROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-85-98

NUMERICAL MODELING OF EXTREME CONDITIONS OF PLANETARY
ATMOSPHEREAlexey V. Bykov¹, Andrey L. Vetrov², Petr G. Frick³, Andrei N. Sukhanovskii⁴, Nikolay A. Kalinin⁵, Rodion A. Stepanov⁶^{1, 3, 4, 5, 6} Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russia^{1, 2, 3, 4, 5} Perm State University, Perm, Russia¹ blexx256@yandex.ru² alvetrov@yandex.ru³ frick@icmm.ru⁴ san@icmm.ru⁵ kalinin@psu.ru⁶ rodion@icmm.ru

*Метеорология**Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.*

Abstract. The atmospheric general circulation plays an important role in the formation of weather and climate processes, providing transport and redistribution of heat, moisture, and angular momentum. Climate changes can have a significant effect on the elements of the atmospheric general circulation. To understand the general circulation patterns and possible future changes in its components, it is important to study its state under the limiting properties of the geographic envelope, in particular, the type of the active layer. The paper presents the results of numerical modeling of the atmospheric general circulation under simplified conditions of the underlying surface, namely oceanic and desert surfaces. The numerical experiment was performed on a global model transformed from the WRF-ARW model and it reproduced the atmosphere dynamics during one year. The limiting scenarios – either global ocean or global desert – reflected the role of phase transitions in the Earth's atmosphere. In the first case, due to the greenhouse effect, the circulation is not pronounced owing to the absence of a significant interlatitudinal gradient. In the second case, the sandy surface, unlike the ocean, cannot accumulate a large amount of heat, so the air near the Earth's surface cools rapidly in the winter hemisphere and heats up rapidly in the summer hemisphere, as a result of which there are no trade winds. The combination of oceanic and desert zones (all homogeneous along the meridian) leads to the situation that the large-scale atmospheric circulation acquires features close to those of the Earth, which allows us to consider this configuration as a basic one for further numerical experiments. The experiments have shown the leading role of the absorbed part of solar radiation (insolation) and the contribution of water vapor (greenhouse effect, release of latent heat) in the formation of large-scale atmospheric currents. The implemented WRF-ARW model can be successfully used for modeling the general circulation of the atmosphere under different initial and boundary conditions.

Keywords: global atmospheric circulation; numerical modeling, WRF

Funding: the study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 22-61-00098.

For citation: Bykov, A.V., Vetrov, A.L., Frick, P.G., Sukhanovsky, A.N., Kalinin, N.A., Stepanov, R.A. (2023). Numerical modeling of extreme conditions of planetary atmosphere. *Geographical Bulletin*. No. 4 (67). Pp.85–98. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-85-98

Введение

Общая циркуляция атмосферы играет важную роль в формировании погодных и климатических процессов, обеспечивая перенос и перераспределение тепла, влаги и углового момента. Структура и динамика глобальной циркуляции атмосферы сложны и зависят от множества факторов, таких как вращение, солнечный нагрев, топография поверхности и т.д. [8–9]. Для решения задач, которые направлены на улучшение прогноза погоды, необходимо использовать математические модели, включающие в себя все значимые процессы, протекающие в атмосфере. Существенное влияние на динамику атмосферы оказывает взаимодействие ее с океаном и сушей, поэтому необходимо развивать сопряженные модели, учитывающие эти сложные обменные процессы. Фактически речь идет о цифровых двойниках системы атмосфера – океан – суша. При этом часто отмечается, что прогнозирование при помощи сложных математических моделей общей циркуляции атмосферы порой не равнозначно пониманию механизмов, определяющих структуру и динамику крупномасштабных течений [14, 15, 21]. Выявление базовых механизмов, определяющих циркуляцию атмосферы, требует упрощения рассматриваемой системы, т.е. необходимы модели различной степени сложности или, как говорят, иерархия моделей [22]. В этом контексте эффективным подходом к изучению базовых особенностей сложных геофизических систем является лабораторное и математическое моделирование в упрощенной постановке. Ряд важных результатов, касающихся общей циркуляции атмосферы, получен при лабораторном моделировании [2, 13, 16, 17, 19], хотя некоторые ключевые особенности циркуляции атмосферы наталкиваются на технические ограничения. В эксперименте сложно учесть сферичность атмосферного слоя, очень малое отношение высоты слоя к горизонтальному размеру и эффекты, связанные с турбулентностью. Поэтому важность математического моделирования общей циркуляции атмосферы в идеализированной, но полномасштабной постановке трудно переоценить. В отличие от моделей общей циркуляции атмосферы в полной постановке математических моделей, с той или иной степенью упрощения, позволяющих исследовать базовые факторы, определяющие структуру и динамику крупномасштабных течений, немного. Можно выделить модель ISCA [22], однако в ней конвекция, играющая очень важную роль для формирования крупномасштабных атмосферных течений, параметризуется. Большой интерес представляет модель на основе отечественного пакета SL-AV [12], включающего модель глубокой конвекции. Данное исследование выполнено с помощью модели WRF-ARW версии 4.2.2 [18] для трех вариантов подстилающей поверхности: океана с заданной температурой поверхности

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

воды, континентальной пустынной поверхности и комбинации океана и пустынной поверхности. На протяжении многих лет модель WRF успешно используется при изучении различных процессов и явлений, происходящих в атмосфере, в том числе авторами данной работы [1, 3–7, 10, 20].

Материалы и методы исследования

Расчеты по модели WRF-ARW велись на кластере «Тритон» Института механики сплошных сред УрО РАН. Настройки модели представлены в таблице.

Настройки модели WRF-ARW
WRF-ARW model settings

Наименование	Значение
Режим вычислений	Негидростатический
Тип расчетной сетки	Глобальная широтно-долготная, редуцированная
Горизонтальное разрешение	0.8° (~89 км)
Количество вертикальных уровней	51
Шаг по времени	150 с
Начальные и граничные условия	Модифицированные файлы реанализа NCEP-CFS (0.5°)
Шаг выдачи данных расчета	24 ч
Микрофизика	Схема WSM (3 класса)
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Схема RRTMG
Приземный слой	Модифицированная схема MM5
Почвенный слой	Схема NOAH
Планетарный пограничный слой	Схема Университета Йенсей
Глубокая конвекция	Модифицированная схема Tiedke

Расчет одного модельного месяца на 4 узлах вычислительного кластера (112 вычислительных ядер) занимал 8 ч; на высокопроизводительной рабочей станции аналогичный расчет на 14 вычислительных ядрах – 27 ч.

Для проведения вычислительных экспериментов потребовалась модификация файлов формата NetCDF с начальными и граничными условиями, которые были сформированы препроцессингом модели из файлов реанализа NCEP-CFS. Для модификации данных файлов были разработаны сценарии на языке Python.

Во всех расчетах начальный температурный профиль атмосферы был задан согласно ГОСТу 4401-81 «Атмосфера стандартная». Относительная влажность для всех слоев атмосферы установлена на уровне 20%.

В первом эксперименте вся поверхность Земли была покрыта океаном с температурой воды 13°C, термические условия водной поверхности не менялись в течение всего периода эксперимента. Во втором эксперименте вся поверхность планеты была покрыта сушей, близкой по свойствам к Аравийской пустыне. Начальные значения температуры на поверхности и на глубине грунта (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м) были заданы как значения температуры стандартной атмосферы на изобарической поверхности 1013,0 гПа – 15°C. В последнем, третьем, эксперименте рассмотрена комбинация суши и океана – полоса океана с температурой воды 27°C в экваториальной зоне от 10° с.ш. до 10° ю.ш. Температурные условия на поверхности океана были неизменны на протяжении всего эксперимента. Океан разделял два континента с пустынями по типу Аравийской, простирающиеся от экваториальной зоны до полюса. Начальные значения температуры на поверхности и на глубине грунта (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м) были заданы как значения температуры стандартной атмосферы на изобарической поверхности 1013,0 гПа – 15°C.

Результаты и их обсуждение

В каждом численном эксперименте продолжительностью 365 суток получены разные типы общей циркуляции атмосферы.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

В первом эксперименте с океанической термически однородной поверхностью циркуляция выражена слабо из-за сильнейшего парникового эффекта. В пограничном слое тропической зоны пассатные течения неустойчивы и проявляются лишь при усреднении поля скорости ветра за месяц (рис. 1).

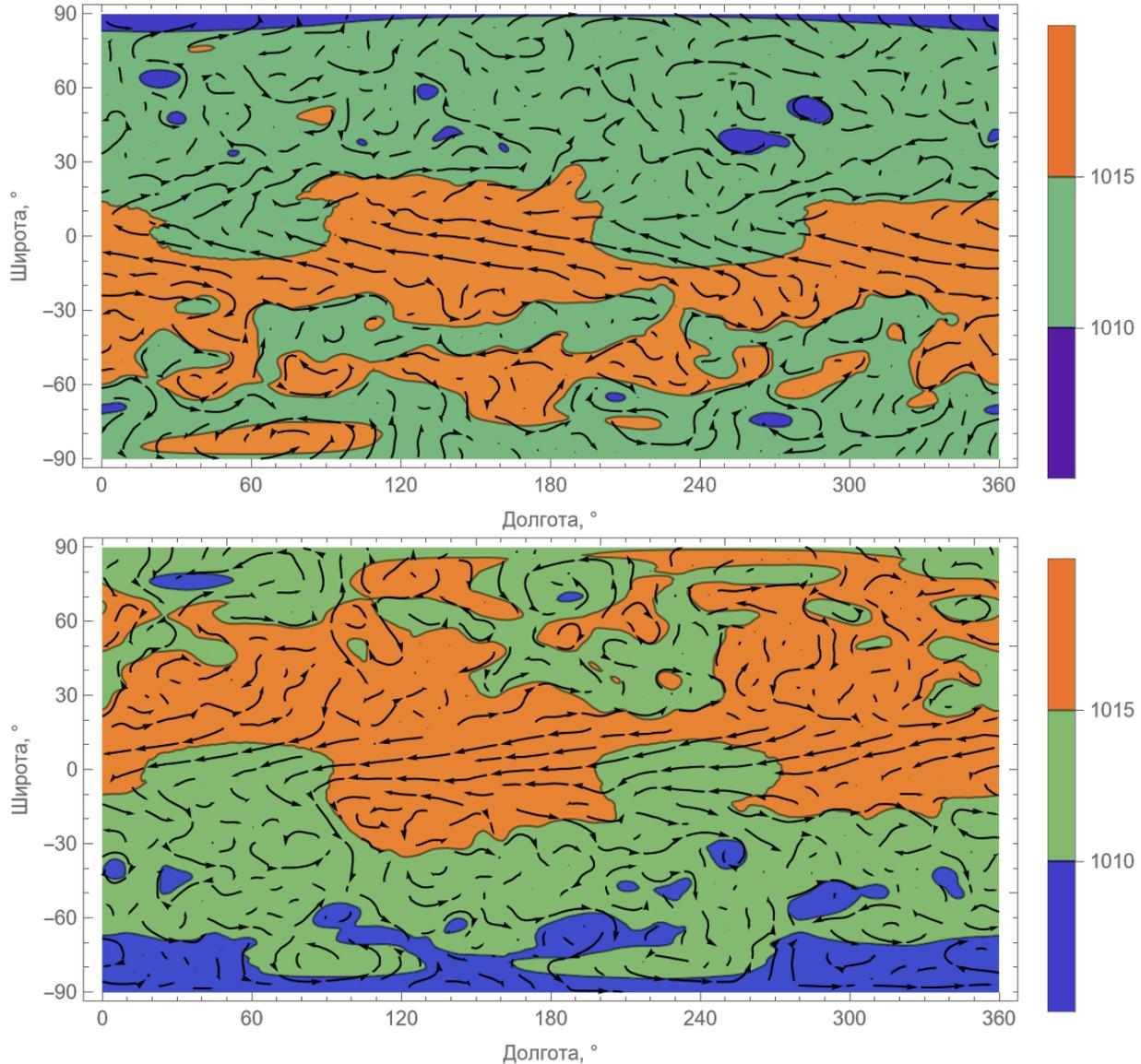


Рис. 1. Линии тока среднего поля скорости ветра и давление на поверхности планеты (гПа).

Сверху вниз: июнь, декабрь. Первый эксперимент

Fig. 1. Streamlines of mean wind speed and pressure at the planet surface (hPa).

From top to bottom: June, December. First experiment.

Пассатные течения существуют круглогодично, в июне они располагаются в южном полушарии в области 10° ю.ш., затем со сменой сезона они смещаются в северное полушарие и наблюдаются в декабре приблизительно на 10° с.ш. Средняя за месяц скорость пассатных течений – не более 3 м/с, что в 3 раза меньше скоростей ветра в этой же зоне на реальной планете [8, 9]. Выше изобарической поверхности 500 гПа (5 км) происходит усиление восточного переноса с максимумами средних месячных скоростей до 22 м/с со смещением центра течений в летнее полушарие (рис. 2). Под воздействием прогретого слоя океана в высоких широтах возникают циклонические и антициклонические вихри, причем в летнем полушарии преобладают циклоны, а в зимнем – антициклоны (рис. 1).

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

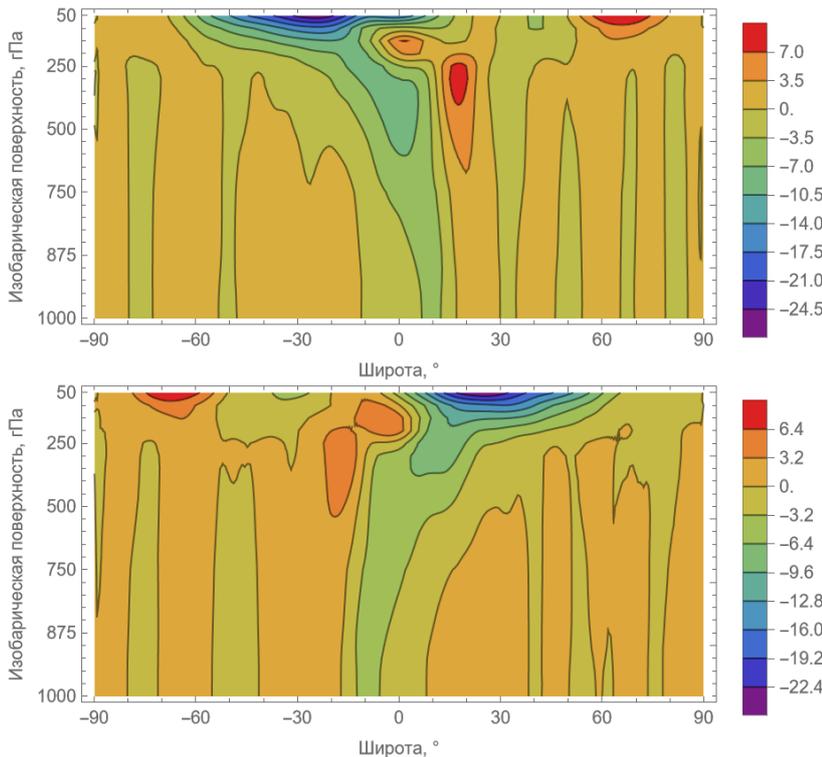


Рис. 2. Среднее поле зональной составляющей скорости ветра (м/с).

Сверху вниз: июнь, декабрь. Первый эксперимент

Fig. 2. Mean field of the zonal component of wind speed (m/s).

From top to bottom: June, December. First experiment.

Специфическое распределение температуры с очень слабыми горизонтальными градиентами в атмосфере водной планеты обусловлено сильным парниковым эффектом. Водяной пар является основным парниковым газом, а в результате интенсивного испарения с поверхности воды в рассматриваемой системе его концентрация очень высока. Атмосферная циркуляция определяется меридиональной неоднородностью температуры при поглощении солнечного излучения (экватор относительно горячий, а полюса холодные). При этом парниковый эффект существенно уменьшает эту неоднородность, что приводит к относительно слабым зональным и меридиональным течениям.

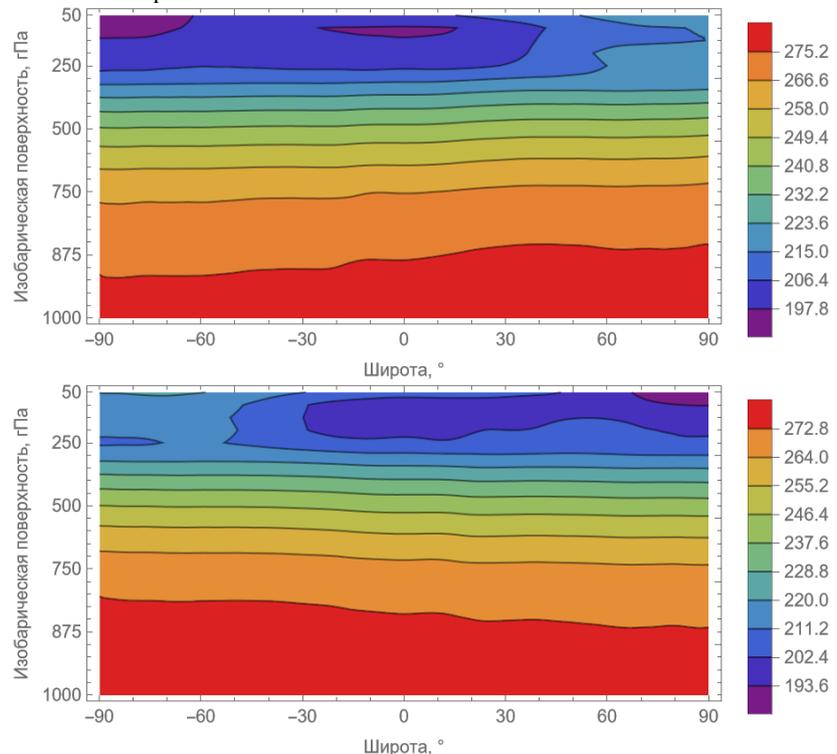


Рис. 3. Среднее поле температуры (K). Сверху вниз: июнь, декабрь. Первый эксперимент

Fig. 3. Mean temperature field (K). From top to bottom: June, December. First experiment.

Средние поля температуры в вертикальном сечении (осреднение по времени в течение месяца и по долготе) представлены на рис. 3, из которого следует, что в случае водной планеты среднее поле температуры достаточно однородно по горизонтали, со значениями около 0°C на изобарической поверхности 850 гПа в зимнем полушарии и немного выше в летнем. Температура стратосферы чрезвычайно низкая в зимнем полушарии (-80°C) и повышается до -60°C в летнем полушарии. Слабый наклон изолиний температуры связан с сезонным смещением инсоляции, в июне максимум температуры в нижнем слое расположен на северном полюсе, а в декабре – на южном полюсе.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

Во втором эксперименте планета имела равнинную поверхность, занятую пустынями по типу Аравийской. При таких условиях крупномасштабная конденсация водяного пара и парниковый эффект играют минимальную роль, а воздействие солнечной радиации является определяющим.

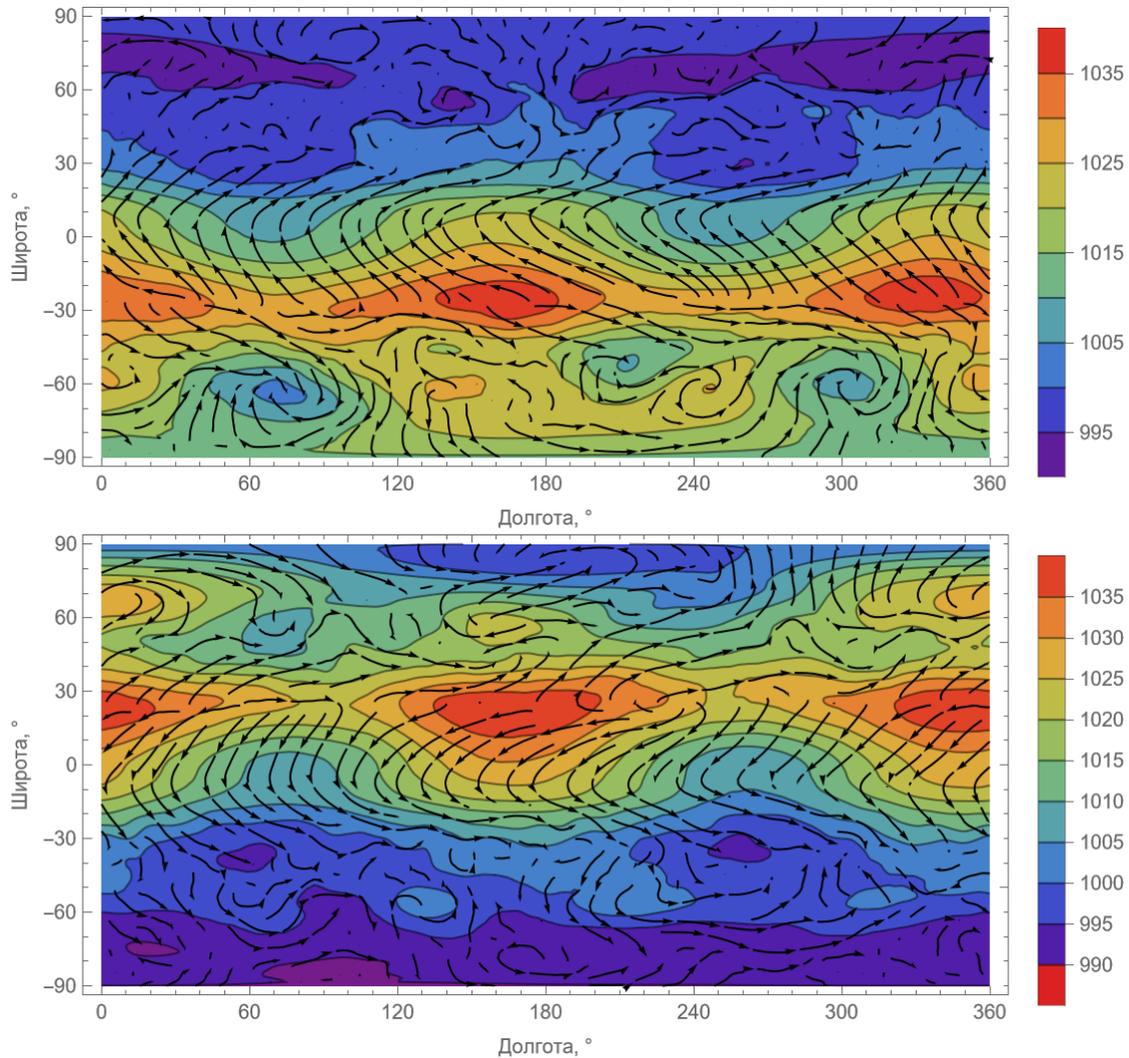


Рис. 4. Линии тока среднего поля скорости ветра и давление на поверхности планеты (гПа).

Сверху вниз: июнь, декабрь. Второй эксперимент

Fig. 4. Streamlines of mean wind speed and pressure at the planet surface (hPa).

From top to bottom: June, December. Second experiment.

На рис. 4 видны области с низким давлением (до 995 гПа) в высоких широтах летнего полушария (70–80° широты). В зимнем полушарии формируются обширные антициклоны с нисходящими движениями. Перепад температуры от экватора к полюсу у поверхности земли в зимнем полушарии – 70°C, в летнем – 10°C (рис. 5). Поле температуры испытывает в течение года сильные изменения: от положительных значений на полюсе в летний период (до 5 км по высоте) к резкому похолоданию до –60°C в зимний период. В средней тропосфере зимнего полушария наблюдается относительно теплая зона, которая сменяется выхожденной, низкотемпературной областью в тропосфере и нижней стратосфере (до –70°C).

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

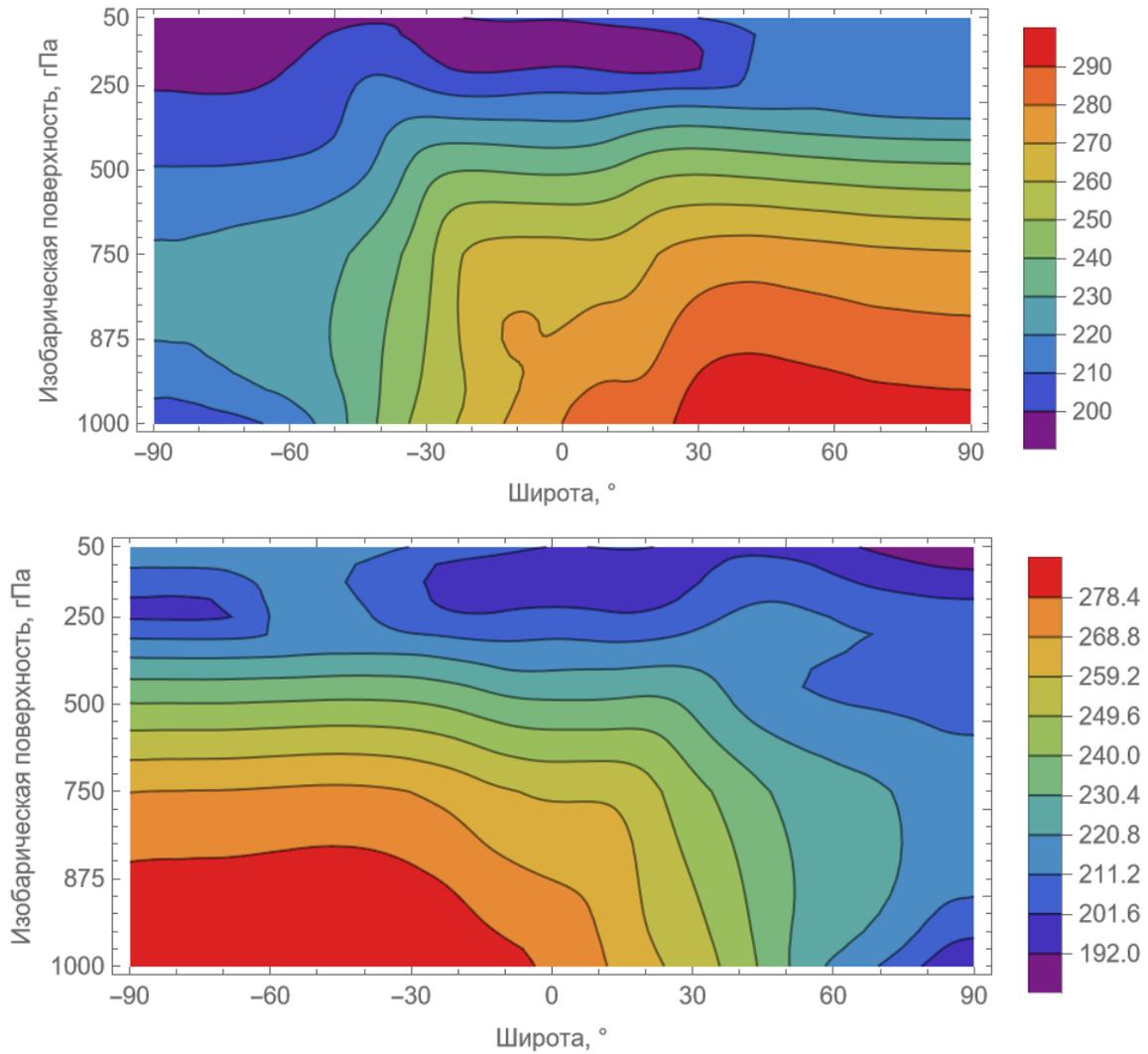


Рис. 5. Среднее поле температуры (K). Сверху вниз: июнь, декабрь. Второй эксперимент
 Fig. 5. Mean temperature field (K). From top to bottom: June, December. Second experiment.

Резкая смена температурных режимов обусловлена низкой теплоемкостью пустынного грунта и низкой атмосферной влажностью. Сильная сезонная зависимость хорошо видна и на интенсивных зональных течениях в верхней части тропосферы, обусловленных переносом углового момента центральной меридиональной ячейкой (аналога ячейки Хэдли). Западные и восточные ветры смещены от экватора в сторону летнего полушария (рис. 6). При смене сезона происходит смещение аналога ячейки Хэдли в другое полушарие, которое приводит к соответствующему изменению в расположении восточных и западных ветров. Отметим также количественные отличия в распределениях температуры и зональных течений (рис. 5–6) для различных сезонов, несмотря на симметричные граничные условия на поверхности различных полушарий.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

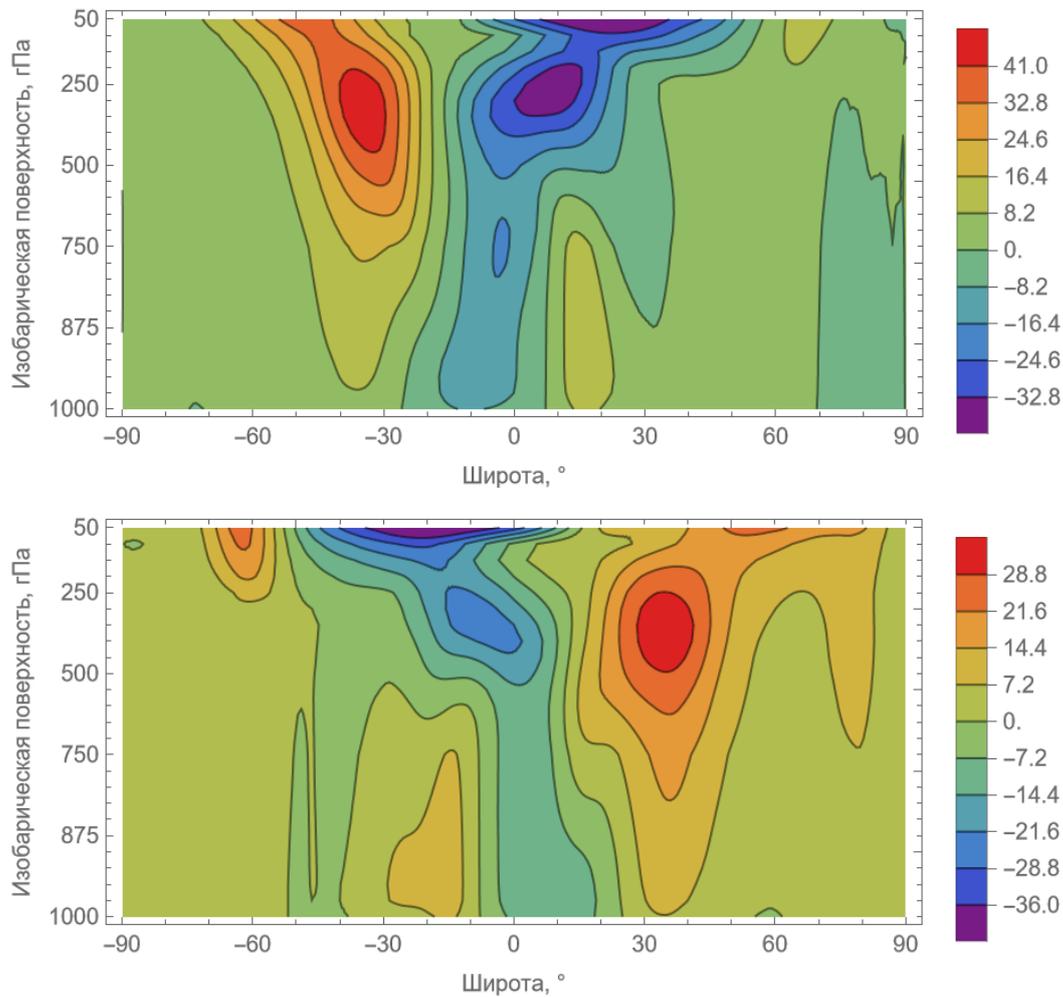


Рис. 6. Среднее поле зональной составляющей скорости ветра (м/с).
Сверху вниз: июнь, декабрь. Второй эксперимент
Fig. 6. Mean field of the zonal component of wind speed (m/s).
From top to bottom: June, December. Second experiment.

В последнем эксперименте были реализованы условия смешанного типа: в экваториальной области расположен океан (от 10° с.ш. до 10° ю.ш.), а все оставшиеся пространства – песчаные пустыни. По сравнению с вариантами 1 и 2 данная конфигурация уже значительно ближе к земным условиям, что дает основания предполагать и схожую структуру крупномасштабных течений. Действительно, из рис. 7 следует, что среднее поле давления и распределение скорости в приповерхностном слое качественно совпадают с наблюдаемыми земными условиями.

Данные реанализа NCEP–NCAR для длительного периода показывают, что летом (июнь) ячейка Хэдли смещена от экватора в южное полушарие, а зимой (декабрь) – в северное [11]. Такой же сценарий для аналога ячейки Хэдли мы наблюдаем и в нашей конфигурации. Сезонные смещения меридиональной ячейки приводят к смещению восточных и западных ветров, а также областей повышенного и пониженного давления. В летний период они расположены в южном полушарии, а в зимний – в северном. Средние распределения для различных сезонов качественно совпадают, однако наблюдаются заметные количественные различия, что свидетельствует о сложной динамике крупномасштабных течений и в упрощенной системе.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

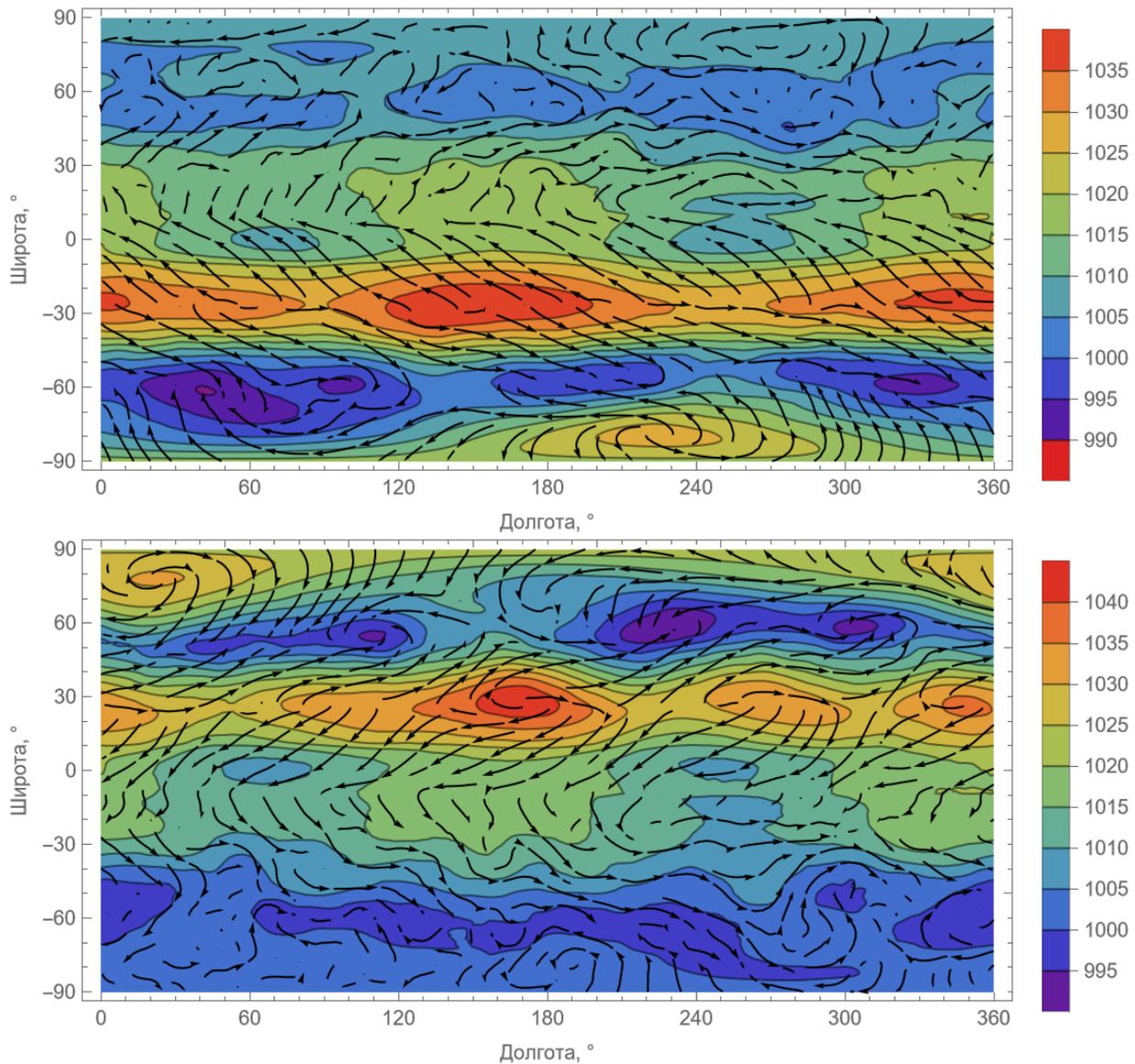


Рис. 7. Линии тока среднего поля скорости ветра и давление на поверхности планеты (гПа).

Сверху вниз: июнь, декабрь. Третий эксперимент

Fig. 7. Streamlines of mean wind speed and pressure at the planet surface (hPa).

From top to bottom: June, December. Third experiment.

Несмотря на наличие полосы теплого океана в экваториальной области структура поля температуры (рис. 8) качественно совпадает с полем температуры для второго эксперимента: область тепла в летнем полушарии и область холода в зимнем. Обширные территории континентов позволяют прогреться воздуху даже в высоких широтах при летней инсоляции. Обратная ситуация отмечается в зимнем полушарии: здесь севернее 60° устанавливается холодная, морозная погода.

На рис. 9 представлено среднее поле скорости зональных течений в июне и декабре. В зимнем полушарии формируются мощные западные струйные течения со средними скоростями 56 м/с. Летнее полушарие хорошо прогрето, с меньшими температурными градиентами, поэтому здесь такие течения выражены слабее (до 17 м/с). По мере смены сезонов происходит перестройка общей циркуляции, в связи с чем струйное течение перемещается в зимнее полушарие и исчезает в летнем. Такая структура характерна для реальных процессов в тропосфере.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

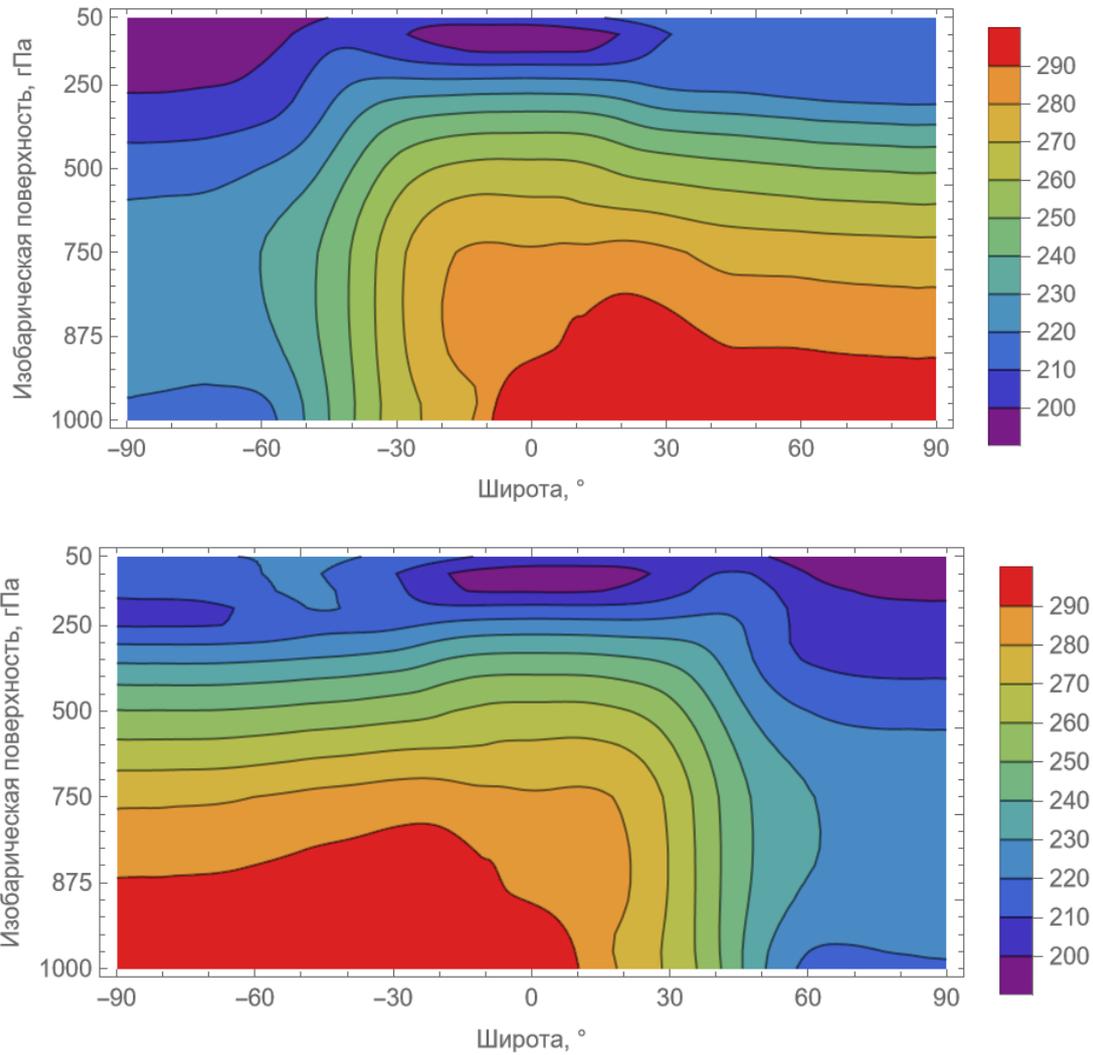


Рис. 8. Среднее поле температуры (K). Сверху вниз: июнь, декабрь. Третий эксперимент
 Fig. 8. Mean temperature field (K). From top to bottom: June, December. Third experiment

В экваториальной зоне можно заметить постоянные потоки восточной составляющей со скоростями у поверхности земли 8 м/с. Это аналог пассатной циркуляции в тропической зоне с сопоставимыми скоростями ветра. Интересна двухуровневая структура воздушных течений восточной составляющей: один максимум восточных течений расположен у поверхности Земли на широте 10° зимнего полушария, другой находится на высоте 3 км и широте 10° летнего полушария. Скорость второго потока чуть выше из-за уменьшения влияния трения земной поверхности.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

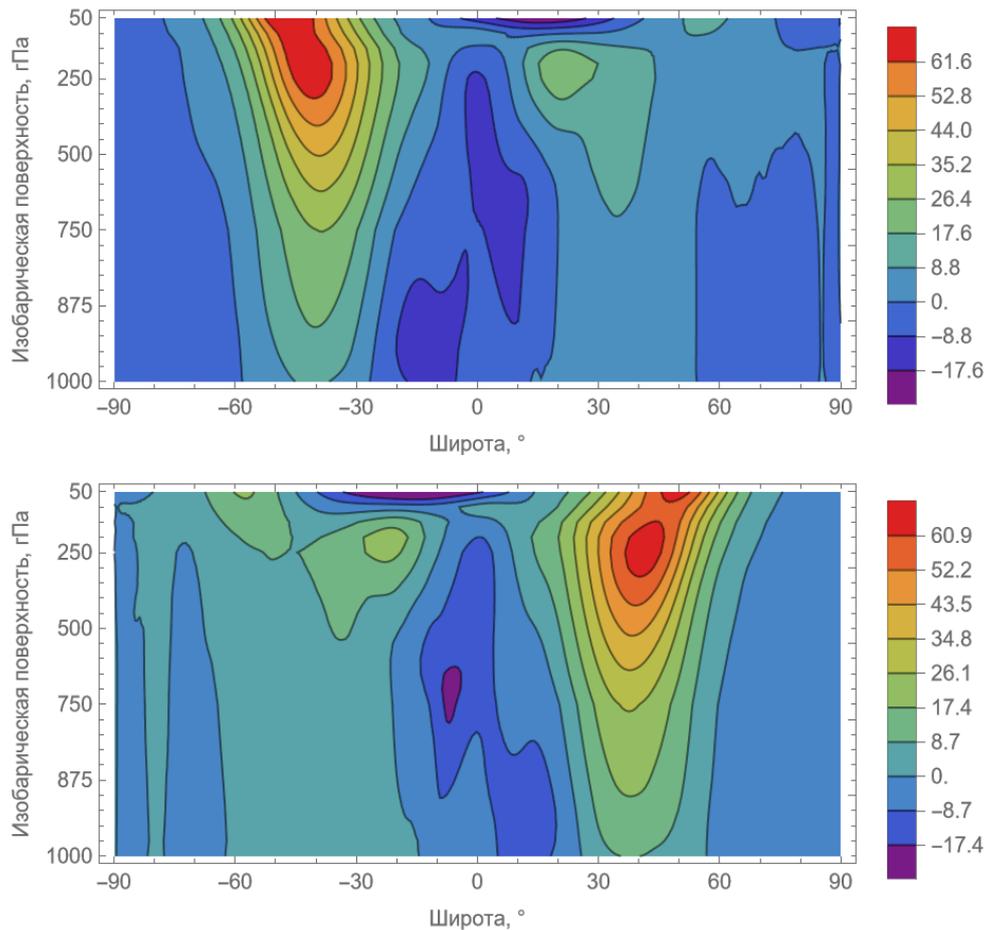


Рис. 9. Среднее поле зональной составляющей скорости ветра (м/с).

Сверху вниз: июнь, декабрь. Третий эксперимент

Fig. 9. Mean field of the zonal component of wind speed (m/s).

From top to bottom: June, December. Third experiment.

Выводы

1. Проведенные численные эксперименты позволяют оценить потенциал модели WRF-ARW для изучения факторов, определяющих элементы общей циркуляции атмосферы.
2. Предельные ситуации – глобальный океан или глобальная пустыня отразили роль фазовых переходов в атмосфере Земли. В первом случае вследствие парникового эффекта циркуляция не выражена из-за отсутствия значимого межширотного градиента. Во втором случае песчаная поверхность, в отличие от океана, не может аккумулировать большое количество тепла, поэтому воздух у поверхности земли быстро охлаждается в зимнем полушарии и быстро нагревается в летнем, ввиду чего пассатные течения не возникают.
3. Комбинация океанических и пустынных зон (все однородны по меридиану) приводит к тому, что крупномасштабная циркуляция атмосферы приобретает черты, близкие к земной, что позволяет рассматривать такую конфигурацию базовой для дальнейших численных экспериментов.
4. Проведенные эксперименты показали ведущую роль поглощенной части солнечной радиации (инсоляции) и вклада водяного пара (парниковый эффект, выделение скрытого тепла) при формировании крупномасштабных атмосферных течений. Реализованная модель WRF-ARW может успешно использоваться для моделирования общей циркуляции атмосферы при различных начальных и граничных условиях.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

Список источников

1. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101–119.
2. Васильев А.Ю., Попова Е.Н., Сухановский А.Н. Структура течений в лабораторной модели общей циркуляции атмосферы // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. 16 (3). С. 321–331. URL: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.3.27> (дата обращения: 20.09.2023)
3. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.
4. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
5. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.
6. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16–28.
7. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 43–59.
8. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 296 с.
9. Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елусеев А.В., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 2013. 224 с.
10. Das M.K., Das S., Chowdhury M.A.M., Karmakar S. Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. Vol. 7 (5). P. 1577–1599.
11. Dima I.M., Wallace J.M. On the seasonality of the Hadley cell // Journal of the atmospheric sciences. 2003. Vol. 60. N. 12. P. 1522–1527.
12. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate version of the global atmospheric model SL-AV: development and preliminary results. Russ. Meteor. and Hydrol. 2019. Vol. 1. P. 22–35.
13. Harlander U., Sukhanovskii A., Abide, S., Borcia I.D., Popova E., Rodda C., Vasiliev A., Vincze M. New Laboratory Experiments to Study the Large-Scale Circulation and Climate Dynamics // Atmosphere. 2023. 14. 836.
14. Held, I. M. The gap between simulation and understanding in climate modeling // B. Am. Meteorol. Soc. 2005. 86. P. 1609–1614.
15. Hoskins, B.J. Dynamical processes in the atmosphere and the use of models // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 1983. 109. P. 1–21.
16. Read P.L., Edgar P.Pérez, Irene M.Moroz and Roland M.B. Young General Circulation of Planetary Atmospheres: Insights from Rotating Annulus and Related Experiments // Modeling Atmospheric and Oceanic Flows: Insights from Laboratory Experiments and Numerical Simulations. AGU. 2014. 368 p.
17. Socolan H., Read P. L. A rotating annulus driven by localized convective forcing: a new atmosphere-like experiment // Experiments in Fluids. 2017. T. 58. №. 6. P. 75.
18. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J. et al. A description of the advanced research WRF model version 4. Boulder, CO: NCAR. 2019.
19. Sukhanovskii A., Popova E. and Vasiliev A. A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. Vol. 117. N. 3. 2023. P. 155–176.
20. Tazarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L. An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation. // Atmospheric Research. 2016 Vol. 178–179. P. 367–379.
21. Vallis, G.K. // Geophysical Fluid Dynamics: Whence, whither and why? P. Roy. Soc. A-Math. Phys. 2016. 472. 23.
22. Vallis G.K. et al. Isca, v1. 0: a framework for the global modelling of the atmospheres of Earth and other planets at varying levels of complexity // Geoscientific Model Development. Vol. 11. N. 3. 2018. P. 843–859.

References

1. Bykov, A.V., Vetrov, A.L., Kalinin, N.A. (2017), Forecast of dangerous convective phenomena in Perm Krai using global forecasting models // *Trudy Gidrometcentra Rossii*, no. 363, pp. 101–119.
2. Vasiliev, A.Yu., Popova, E.N., Sukhanovsky, A.N. (2023), Structure of currents in the laboratory model of atmospheric general circulation // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*, no. 16 (3), pp. 321–331. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.3.27>
3. Veltischev, N.F., Zhupanov, V.D., Pavlyukov, Yu. (2011), Short-term forecast of heavy precipitation and wind with convection-resolving WRF models // *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 5–18.
4. Gubenko, I.M., Rubinstein, K.G. (2015), Analysis of the results of thunderstorm activity calculation with the help of atmospheric instability indices based on the WRF-ARW numerical model data // *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 27–37.
5. Kalinin, N.A., Vetrov, A.L., Sviyazov, E.M., Popova, E.V. (2013), Study of intense convection in the Perm Krai using the WRF model // *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, pp. 21–30.
6. Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Bykov, A.V. (2017), Prediction of mesoscale convective systems in the Urals using WRF model and remote sensing data // *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 16–28.
7. Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Bykov, A.V., Tarasov, A.V. (2019), Analysis of numerical forecasts of heavy precipitation with the WRF model using various convection schemes (a case study for the Perm Krai), *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, no. 3 (373), pp. 43–59.
8. Matveev, L.T. (1991), *Teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery i klimata Zemli*, Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.

Метеорология

Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.

9. Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V., Shantalinsky K.M., Vaznamova N.A. (2013), *Teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery*. Kazan. un-t, Kazan', Russia.
10. Das M.K., Das S., Chowdhury M.A.M., Karmakar S. (2016), Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7 (5), pp. 1577–1599.
11. Dima I.M., Wallace J.M. (2003), On the seasonality of the Hadley cell. *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 60, no. 12, pp. 1522–1527.
12. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. (2019), Climate version of the global atmospheric model SL-AV: development and preliminary results. *Russ. Meteor. and Hydrol.*, vol. 1, pp. 22–35.
13. Harlander U., Sukhanovskii A., Abide, S., Borcia I.D., Popova E., Rodda C., Vasiliev A., Vincze M. (2023), New Laboratory Experiments to Study the Large-Scale Circulation and Climate Dynamics. *Atmosphere*, 14. 836.
14. Held, I. M. (2005), The gap between simulation and understanding in climate modeling. *B. Am. Meteorol. Soc.* 86, pp. 1609–1614.
15. Hoskins, B.J. (1983), Dynamical processes in the atmosphere and the use of models. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109, pp. 1–21.
16. Read P.L., Edgar P.Pérez, Irene M.Moroz and Roland M.B. (2014), Young General Circulation of Planetary Atmospheres: Insights from Rotating Annulus and Related Experiments. *Modeling Atmospheric and Oceanic Flows: Insights from Laboratory Experiments and Numerical Simulations*, AGU, 368 p.
17. Socolan H., Read P. L. (2017), A rotating annulus driven by localized convective forcing: a new atmosphere-like experiment. *Experiments in Fluids*, t. 58, no. 6, pp. 75.
18. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J. et al. (2019), A description of the advanced research WRF model version 4. Boulder, CO: NCAR.
19. Sukhanovskii A., Popova E. and Vasiliev A. (2023), A shallow layer laboratory model of large-scale atmospheric circulation. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, vol.117, no. 3, pp. 155–176.
20. Taszarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L. (2016), An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation. *Atmospheric Research*, vol. 178–179, pp. 367–379.
21. Vallis, G.K. (2016), Geophysical Fluid Dynamics: Whence, whither and why? *P. Roy. Soc. A-Math. Phy.* 2016. 472. 23.
22. Vallis G.K. et al. (2018), Isca, v1. 0: a framework for the global modelling of the atmospheres of Earth and other planets at varying levels of complexity. *Geoscientific Model Development*, vol. 11, no. 3, pp. 843–859.

Статья поступила в редакцию: 28.09.2023, одобрена после рецензирования: 10.10.2023, принята к опубликованию: 12.12.2023.

The article was submitted: 28 September 2023; approved after review: 10 October 2023; accepted for publication: 12 December 2023.

Информация об авторах

Алексей Васильевич Быков

кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Андрей Леонидович Ветров

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Петр Готлобович Фрик

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН; 614018, Россия, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1

Information about the authors

Alexey V. Bykov

Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer, Department of Meteorology and Atmospheric Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: blexx256@yandex.ru

Andrey L. Vetrov

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Atmospheric Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: alvetrov@yandex.ru

Petr G. Frick

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Physical Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013 Russia

e-mail: frick@icmm.ru

*Метеорология**Быков А.В., Ветров А.Л., Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Степанов Р.А.***Андрей Николаевич Сухановский**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН;

614018, Россия, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1

Николай Александрович Калинин

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Родион Александрович Степанов

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН;

614018, Россия, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1

Andrei N. Sukhanovskii

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Physical Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013 Russia

e-mail: san@icmm.ru

Nikolay A. Kalinin

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmospheric Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: kalinin@psu.ru

Rodion A. Stepanov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Physical Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013 Russia

e-mail: rodion@icmm.ru

Вклад авторов

Быков А.В. – проведение расчетов, сбор и обработка данных.

Ветров А.Л. – анализ данных, написание статьи.

Фрик П.Г. – идея статьи, организация работ, редактирование статьи.

Сухановский А.Н. – анализ данных, редактирование статьи.

Калинин Н.А. – организация работ, редактирование статьи.

Степанов Р.А. – обработка и анализ данных, подготовка графического материала.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Alexey V. Bykov – numerical simulations; data collection and processing.

Andrey L. Vetrov – data analysis; writing the article.

Petr G. Frick – idea of the article; organization of work, editing of the article.

Andrei N. Sukhanovskii – data analysis; editing of the article.

Nikolay A. Kalinin – organization of work; editing of the article.

Rodion A. Stepanov – data processing and analysis, preparation of graphic material.

The authors declare no conflict of interest.