

УДК 551.51:551.55

## ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ В МАЕ 2017 ГОДА НА ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

© 2024 г. Ю. А. Курдяева<sup>1</sup>\*, О. П. Борчевкина<sup>1</sup>, Е. В. Голикова<sup>2</sup>, И. В. Карпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: yakurdyeva@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Выполнено численное моделирование распространения атмосферных волн перед сильным скачком давления во время шквала в Москве 29 мая 2017 г. с использованием трехмерной версии нелинейной численной модели высокого разрешения AtmoSym. Метеорологический источник возмущений задавался на основе экспериментальных наблюдений сети из четырех микробарографов, расположенных в Московской области. Проведены оценки волновых возмущений в верхней атмосфере, вызванных генерацией акустических и внутренних гравитационных волн метеорологическим источником.

DOI: 10.31857/S0367676524030191, EDN: QLCDYF

### ВВЕДЕНИЕ

Качественный учет вклада акустических и внутренних гравитационных волн, генерируемых метеорологическими тропосферными источниками, в крупномасштабных атмосферных моделях является актуальной и важной задачей [1–4]. В глобальных численных моделях атмосферы влияние атмосферных волн на верхние слои атмосферы часто учитывается путем параметризации волновых эффектов [5–7] или до ограниченных высот [8].

Параметризации атмосферных волн [9–12], генерируемых конвективными источниками, приближенно описывают их распространение и учитывают их вклад. Также описание непосредственно самих конвективных источников может содержать неточности, что влияет на надежность получаемых результатов. Для дальнейшего совершенствования учета эффектов акустических и внутренних гравитационных волн в моделях общей циркуляции атмосферы необходимо детальное исследование особенностей распространения этих волн и разработка новых подходов к их моделированию.

Численное моделирование акустических и внутренних гравитационных волн является сложной задачей, которую качественно решают региональные атмосферные модели [13, 14]. Модель должна

обладать большим разрешением по времени и пространству, чтобы качественно рассчитывать мелко-масштабные волны с периодами менее, чем период акустической отсечки, и пространственными масштабами менее нескольких десятков километров. Пространственные масштабы расчета на этих моделях ограничены вычислительными мощностями. Результаты, полученные с применением таких моделей, позволяют определить волновые характеристики возмущений, которые можно использовать далее в крупномасштабных моделях для комплексного исследования атмосферных процессов.

В работе проведено моделирование волновых процессов в верхней атмосфере перед скачком давления во время шквала в Москве 29 мая 2017 г. Для моделирования была использована трехмерная версия нелинейной численной модели высокого разрешения AtmoSym [15]. Метеорологический источник задавался на основе данных экспериментальных наблюдений вариаций атмосферного давления на поверхности Земли, зарегистрированных на сети из четырех микробарографов, расположенных в Московском регионе, при прохождении атмосферного фронта. Определены характеристики возмущений в верхней атмосфере, вызванных генерацией акустических и внутренних гравитационных волн метеорологическим источником. На

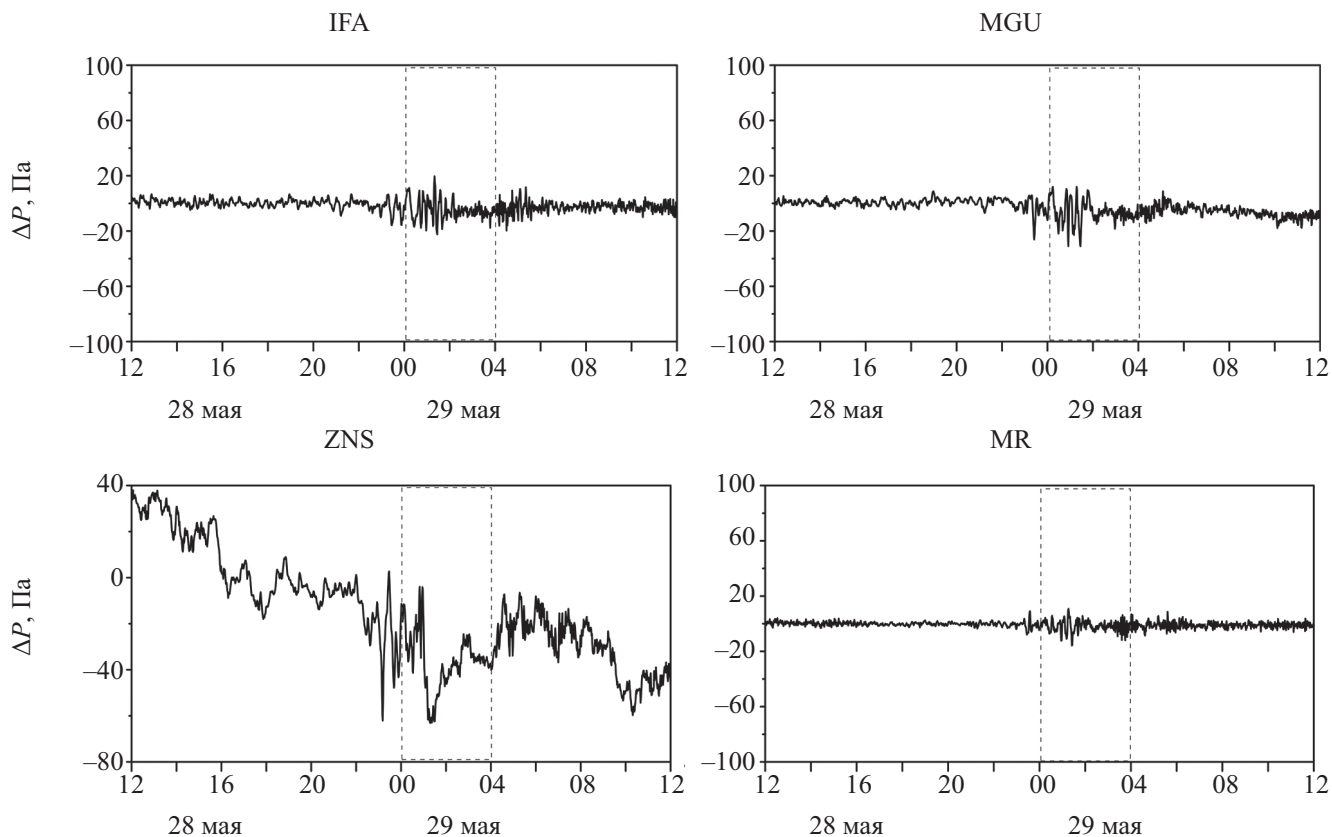
основе полученных результатов моделирования был оценен тепловой эффект, создаваемый волнами в верхней атмосфере, который далее может быть учтен в различных глобальных моделях атмосферы.

### ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для моделирования распространения волн были использованы экспериментальные данные наблюдений вариаций атмосферного давления (рис. 1) на поверхности Земли, зарегистрированные на сети из четырех микробарографов, расположенных в Московском регионе, 29 мая 2017 г. при прохождении атмосферного фронта. Микробарографы устанавливались рядом с инфразвуковыми микрофонами, и оба датчика синхронно регистрировали сигнал. На основе показаний обоих приборов рассчитывались временные коэффициенты, необходимые для пересчета показаний в единицы давления. Для некоторых станций не удалось точно рассчитать временной коэффициент. Например, для станции “Мосрентген” удалось снизить нижнюю границу рабочего диапазона прибора примерно до  $3 \cdot 10^{-3}$  Гц, и на меньших частотах он может существенно занижать.

Полученные на сети микробарографов данные о вариациях давления были использованы для решения нелинейной задачи о генерации волн. Вариации давления были использованы в качестве источника возмущений на нижней границе. Такой подход к моделированию атмосферных волн от метеорологических источников, которые обладают сложной пространственной, эволюционирующей во времени структурой, подробно описан в [16, 17] и позволяет качественно воспроизводить волновую картину на больших вертикальных масштабах.

Применяемая трехмерная версия модели AtmoSum использует параллельные вычисления. Модель позволяет решать задачи распространения волн от различных начальных возмущений и источников волн в диапазоне высот 0–500 км над территорией с горизонтальным масштабом от нескольких сотен метров до нескольких тысяч километров. Модель основана на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений и адаптирована для решения задач о распространении волн от вариации давления на поверхности Земли [18]. Для модели AtmoSum строго доказана сходимость используемых численных методов и проведено сравнение расчетов с известными



**Рис. 1.** Вариации атмосферного давления, полученные на сети микробарографов Института физики атмосферы имени А. М. Обухова Российской академии наук во время прохождения метеорологического фронта над Московской областью 29 мая 2017 г.

частными решениями [15, 16, 19–21]. Такие математические исследования обеспечивают реалистичность расчета волновой картины моделью.

Горизонтальные граничные условия в области от нуля до  $L_x, L_y$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u(x = L_x, y, z, t) &= u(x = 0, y, z, t), \\ u(x, y = L_y, z, t) &= u(x, y = 0, z, t); \\ v(x = L_x, y, z, t) &= v(x = 0, y, z, t), \\ v(x, y = L_y, z, t) &= v(x, y = 0, z, t); \\ w(x = L_x, y, z, t) &= w(x = 0, y, z, t), \\ w(x, y = L_y, z, t) &= w(x, y = 0, z, t); \\ \rho(x = L_x, y, z, t) &= \rho(x = 0, y, z, t), \\ \rho(x, y = L_y, z, t) &= \rho(x, y = 0, z, t); \\ T(x = L_x, y, z, t) &= T(x = 0, y, z, t), \\ T(x, y = L_y, z, t) &= T(x, y = 0, z, t); \\ P(x = L_x, y, z, t) &= P(x = 0, y, z, t), \\ P(x, y = L_y, z, t) &= P(x, y = 0, z, t). \end{aligned} \quad (1)$$

На верхней границе ( $h = 500$  км) используются стандартные граничные условия для задачи распространения волн в термосфере:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z = h, t) &= 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z}(x, y, z = h, t) = 0; \\ \frac{\partial v}{\partial z}(x, y, z = h, t) &= 0, \quad w(x, y, z = h, t) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Условия на нижней границе имеют особый вид:

$$\begin{aligned} u(x, y, z = 0, t) &= 0, \quad v(x, y, z = 0, t) = 0, \\ \frac{\partial w(x, y, z = 0, t)}{\partial z} &= 0, \\ T(x, y, z = 0, t) &= T_0(0), \\ P(x, y, z = 0, t) &= P_0(0) + f_p(x, y, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f_p(x, y, t)$  — функция, определяемая эмпирически на основе экспериментальных наблюдений и описывающая волновые вариации поля давления;  $P_0(0)$  — давление на поверхности Земли.

Источник возмущений на нижней границе аппроксимирован суммой гауссовых функций:

$$f_{p,i}(x, y, t) = \exp\left[-\left(\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{\lambda^2}\right)\right] q_i(t), \quad (4)$$

где значения  $x_i$  и  $y_i$  являются координатами микробарографа с номером  $i$ , а каждая функция  $q_i$  описывает поведение волновой добавки к фоновому давлению на  $i$ -м микробарографе. Параметр  $\lambda$  характеризует эффективную ширину источника на нижней границе  $f_p(x, y, t)$  и определяется опытным путем на основе изучения корреляции показаний микробарографов в зависимости от расстояния между ними. Результирующее поле вариаций атмосферного давления получается путем сложения отдельных полей, соответствующих вариациям давления вблизи каждого микробарографа.

Шаг по горизонтали — 4 км, шаг по вертикали адаптивный: увеличивается с высотой с 400 м до 3 км. Горизонтальные масштабы расчетной области — 2000 км, вертикальный масштаб — 500 км. Источники располагаются в центре, расстояние между ними задано в соответствии с реальным расположением.

## ВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Трехмерный численный расчет распространения волн (рис. 2), генерируемых сильным метеорологическим явлением, показал, что температурные возмущения в термосфере над областью метеорологического возмущения в нижних слоях атмосферы проявляют себя достаточно быстро уже через ~0.5 ч после начала работы источника. Эффекты, создаваемые волнами на термосферных высотах, сильно изменяются уже через 1 ч после начала работы тропосферного источника. Вертикальный и горизонтальный масштабы волновых возмущений температуры в верхней атмосфере составляют около 400 км по вертикали и 200 км соответственно. Через 2 ч работы источника площадь возмущений в термосфере значительно превышает размеры области возмущений в нижних слоях атмосферы.

Для исследования спектральных характеристик возмущений, полученных при моделировании, использовался Фурье-анализ. Результаты спектрального анализа (рис. 3) показали, что уже через 30 мин после начала работы источника на высоте 100 км наблюдаются волны с периодами 10–15 мин, волны с периодами 15–30 мин наблюдаются через 120 мин после начала работы источника на расстоянии 500 км от источника. Эти спектральные картины согласуются с теоретическими представлениями о распространения АВ и ВГВ. Сравнение спектральных характеристик с реальными данными измерений осложнено вследствие отсутствия необходимой экспериментальной информации в исследуемый период.

Амплитуды короткопериодических волн (с периодами менее 10 мин) больше, чем у волн с периодами 15–30 мин на высотах 100 км. На высотах 150–200 км преобладают амплитуды волн

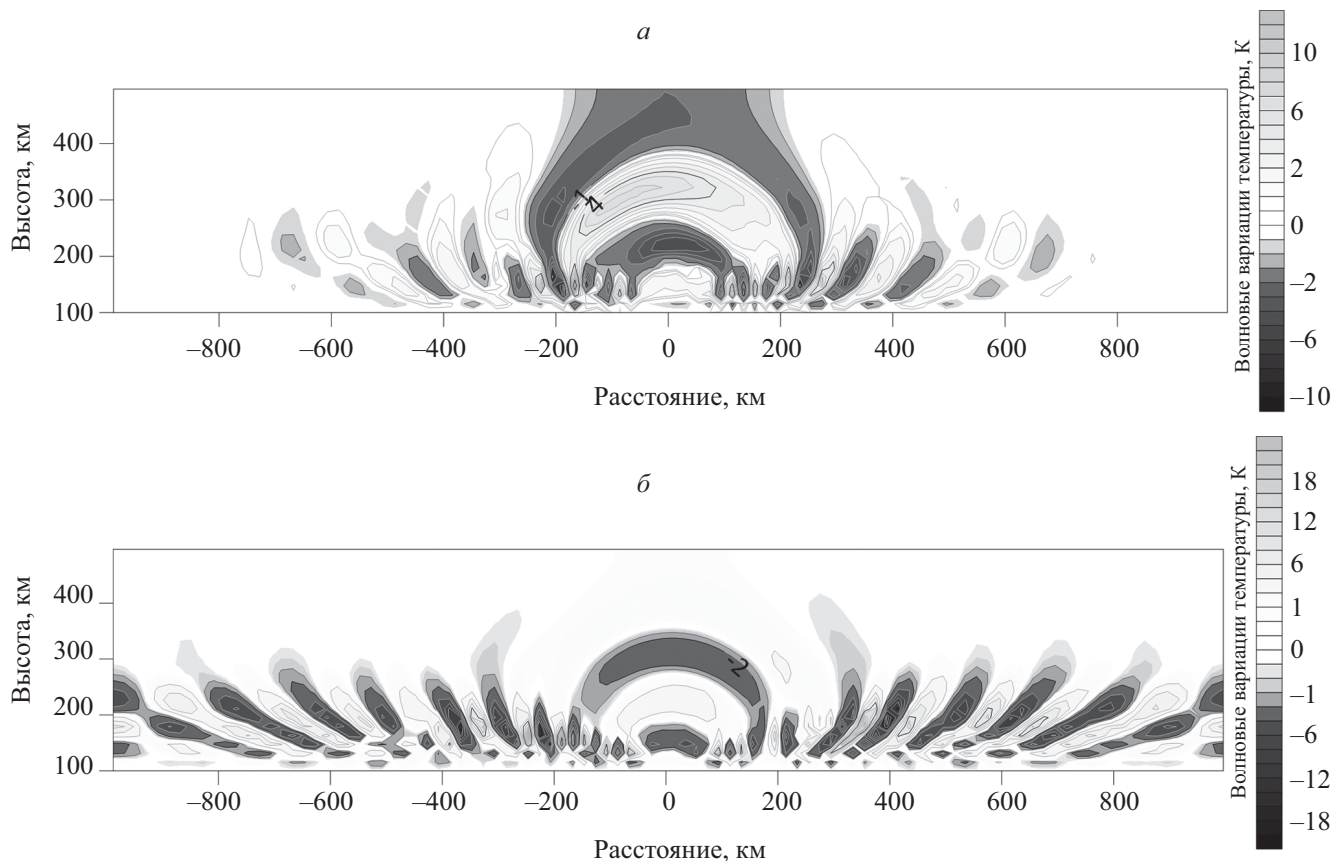


Рис. 2. Распределение волновой добавки (сечение плоскостью  $OY$ ) к температуре, К, для времени  $t = 1$  ч (а) и 2 ч (б).

с периодами 15–20 мин на расстоянии 500 км от источника. Отметим, что на высоте 300 км в районе над источником волны с периодами 10–15 мин также наблюдаются через 60 мин после начала работы источника. На расстоянии 500 км от источника также наблюдаются волны с такими периодами, но амплитуды таких волн значительно меньше.

Обычно параметризации неорографических атмосферных волн очень условно учитывают процессы, описанные выше, что может приводить к ограниченной оценке их вклада. Результаты расчетов показывают, что на высотах выше ~300 км вариации температуры становятся незначительными. Часть волн не распространяется выше 300 км, что говорит о их возможном затухании или заперении в термосферный волновод [22]. Амплитуды волн на высотах ниже 100 км также незначительны, и спектральная картина на удалении от источника не развита. Основной эффект, создаваемый атмосферными волнами из тропосферы, создается волнами на высотах от 100 до 300 км. На динамические процессы в атмосфере, вызванные распространением волн различных периодов от локальных тепловых тропосферных источников, также может влиять фоновый ветер [23], но в данном исследовании его влияние не учитывается.

Для определения характерных длин волн, распространяющихся от метеорологического источника, был проведен вейвлет-анализ. Результаты вейвлет-анализа температуры представлены на рис. 4. В качестве исследуемого параметра был взят температурный профиль с высоким пространственным разрешением по высоте. Рассчитывались спектры возмущений температуры. Считается, что амплитуда вертикально распространяющихся атмосферных волн обнаруживается в нормализованных колебаниях температуры [24]. Такой подход широко используется для оценки различных параметров внутренних гравитационных волн, таких как передача энергии и импульса от волны к атмосфере, спектральная плотность, а также вертикальные и горизонтальные длины акустических и внутренних гравитационных волн [25, 26].

Над областью источника преобладают волны с вертикальными длинами волн 50–100 км с амплитудами значительно меньшими, чем у волн с длинами волн, наблюдаемыми выше 100 км. Через 2 ч после начала работы источника над областью локализации метеорологического события наблюдаются волны с характерными вертикальными длинами 120–170 км, а при удалении на 500 км от горизонтальной координаты, где располагается центр тропосферного источника, это значение

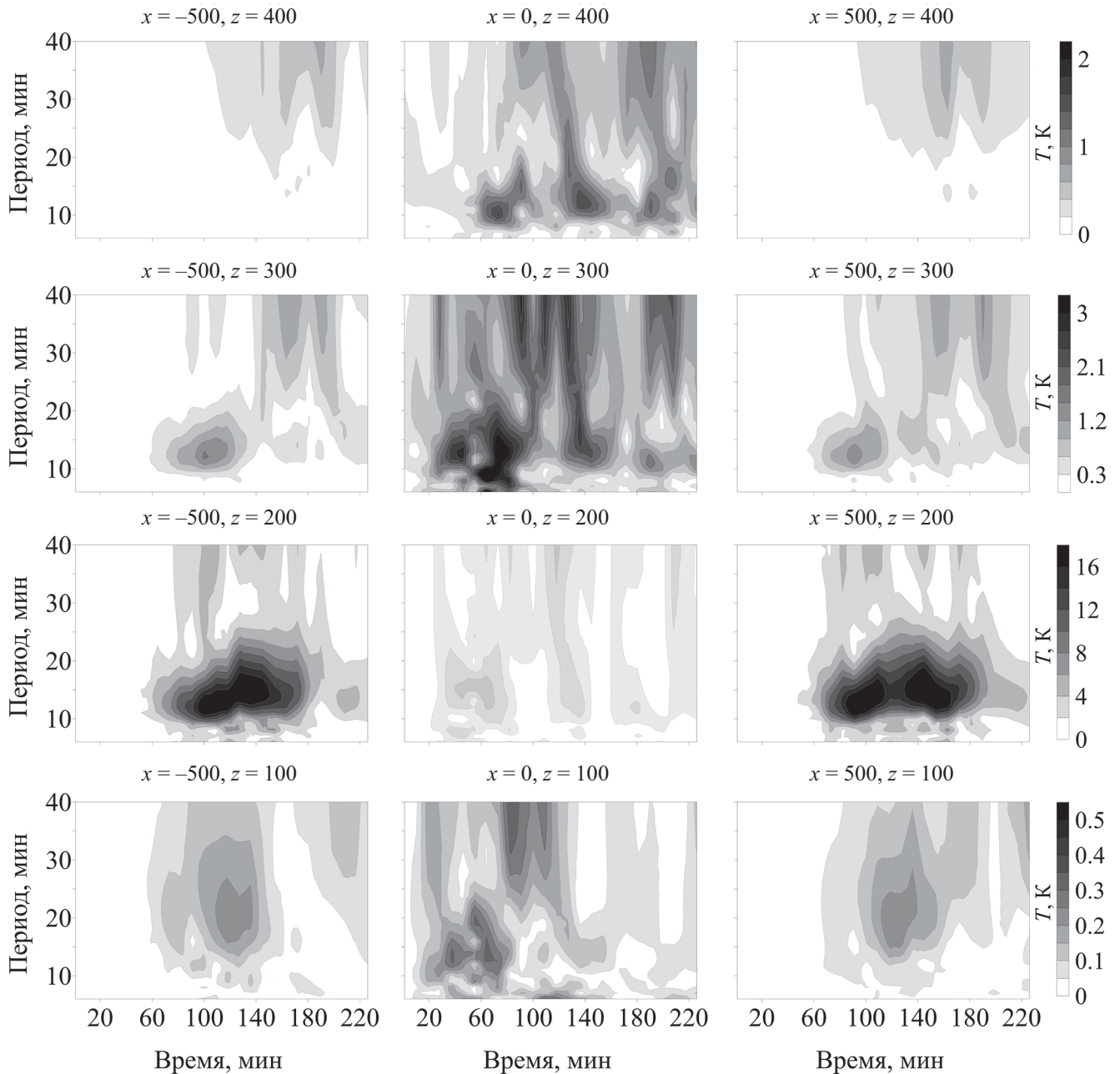


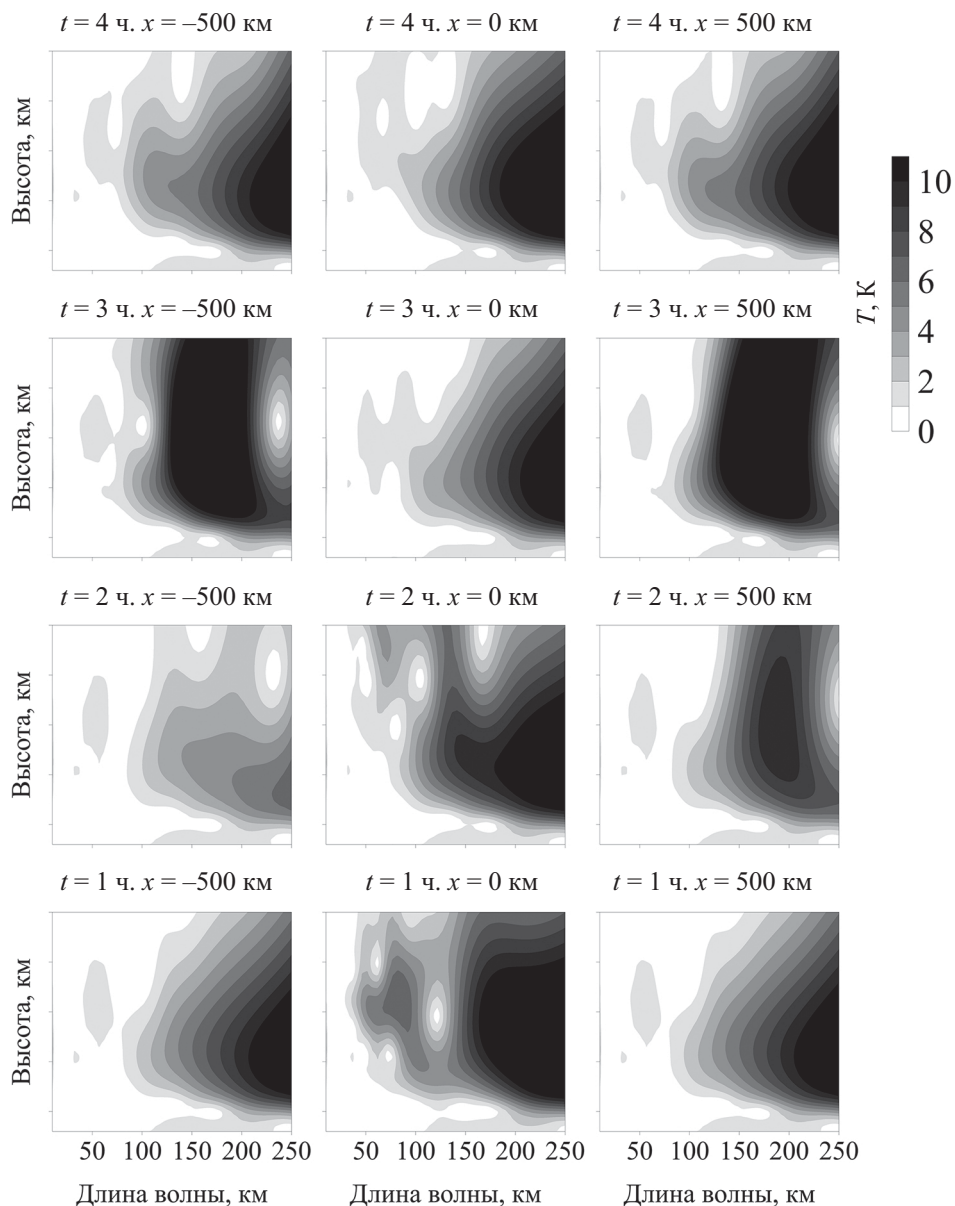
Рис. 3. Частотные характеристики колебаний температуры волн на разных высотах в разных точках (горизонтальная координата —  $x$ ; вертикальная —  $z$ ). Центр источника определен на нижней границе в районе точки  $x = 0$  км.

увеличивается, иногда превышая 200 км. Увеличение длины волны сопровождается увеличением амплитуды. Для более длительных времен моделирования характерные длины волн уменьшаются на расстоянии 500 км от источника.

#### РАСЧЕТ ПРИТОКА ТЕПЛА

Прямое использование данных об изменении температуры нейтральной атмосферы вследствие распространения атмосферных волн

в крупномасштабных моделях атмосферы осложнено. Первое неудобство обусловлено значительным различием масштабов сеток региональных и крупномасштабных моделей. Простое интегрирование в этом случае не представляется возможным. Другой особенностью, которую необходимо учитывать при использовании результатов расчетов такой модели как AtmoSym, является то, что модель рассчитывает волновое поле с учетом нелинейных и диссипативных процессов. Это может приводить, например, к образованию нагретых областей



**Рис. 4.** Вейвлет-анализ вертикальной структуры возмущений температуры, полученный в численных расчетах в целях выделения характеристик волн в термосфере. Центр источника определен на нижней границе в районе точки  $x = 0$  км.

в верхней атмосфере вследствие вертикального распространения инфразвука. Появление таких областей является вторичным эффектом распространения волн, который не нужно включать при исследовании влияния атмосферных волн в крупномасштабную модель.

Для учета волн в глобальной модели необходимо рассчитывать приток тепла, создаваемый волнами в региональной модели. Приток тепла определяется диссипацией энергий фонового, турбулентного и волнового движений. В работе [27] выведена формула для оценки притока тепла, связанного с распространением атмосферных волн:

$$\varepsilon_w = \frac{1}{2} \beta U^2 \omega / k_z, \tag{5}$$

где  $U$  — амплитуда колебаний горизонтальной скорости;  $\beta = -\frac{\partial \ln(\rho_0 U^2)}{\partial z}$ ;  $\omega$  — частота;  $k_z$  — вертикальное волновое число.

Полученные в AtmoSym значения горизонтальной скорости и рассчитанные спектральные характеристики волн позволяют рассчитать приток тепла для каждой найденной волны в необходимой области пространства и в выбранный момент времени.

Для рассматриваемого метеорологического события были рассчитаны поля притока тепла (рис. 5), обусловленные распространением атмосферных волн из тропосферы в исследуемый период.

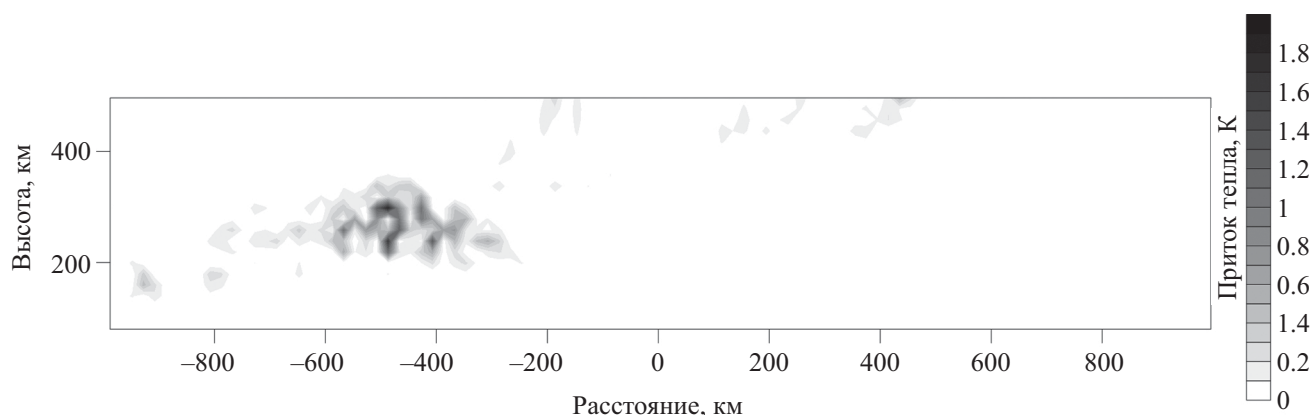


Рис. 5. Приток тепла, создаваемый при распространении атмосферных волн в верхнюю атмосферу.

Полученные результаты показывают, что волны, распространяющиеся от квазиточечного источника в разных направлениях, имеют разные спектральные характеристики, что приводит к ассиметричному распределению притока тепла. Полученные распределения притока тепла пригодны для интегрирования по пространству в соответствии с масштабами предполагаемой сетки крупномасштабной модели. Например, полученные результаты можно использовать в качестве дополнительного источника тепла в правой части уравнений модели GCM ТИП [28] и, соответственно, EAGLE [29, 30].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование распространения атмосферных волн во время урагана в Московской области 29 мая 2017 г. с использованием трехмерной модели AtmoSym. Источник возмущений задавался на основе данных экспериментальных наблюдений вариаций атмосферного давления на поверхности Земли. Полученные результаты позволили детально рассмотреть и оценить волновую картину в термосфере, создаваемую метеорологическим источником в тропосфере.

Результаты численного моделирования показали, что исследуемый метеорологический источник генерирует преимущественно мелкомасштабные ВГВ с частотами, близкими к частоте Вейсяля—Брента. Однако с высотой эти волны могут распространяться как инфразвуковые волны вследствие того, что значения частоты Вейсяля—Брента и акустической отсечки в неизотермической атмосфере меняются. Со временем в верхних слоях атмосферы формируются локальные области нагрева, что влияет на распространение волн и может затруднить интерпретацию возможных экспериментальных результатов по изучению атмосферных волн.

Сложная волновая картина, полученная в этом реалистичном моделировании, демонстрирует необходимость улучшения существующих или

разработки новых подходов учета атмосферных волн в численных моделях.

На основании полученных результатов рассчитывался приток тепла, создаваемый атмосферными волнами. Волны, распространяющиеся от тропосферного источника в разных направлениях, имеют разные спектральные характеристики. Это приводит к ассиметричному распределению притока тепла. Рассчитанный приток тепла позволяет локально учитывать вклад атмосферных волн в крупномасштабных моделях без использования параметризации для рассматриваемого события в Москве 29 мая 2017 г. Предложенный подход пригоден для расчета волн, генерируемых и другими конвективными источниками в тропосфере.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00208).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zettergren M.D., Snively J.B. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. No. 9. P. 8002.
2. Alexander M.J., Geller M., McLandress C. et al. // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136. No. 650. P. 1103.
3. Lilienthal F., Yiğit E., Samtleben N., Jacobi C. // Front. Astron. Space Sci. 2020. V. 7. Art. No. 588956.
4. Plougonven R., Zhang F. // Rev. Geophys. 2014. V. 52. No. 1. P. 33.
5. Yiğit E., Medvedev A.S. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. No. 4. P. 983.
6. Fritts D.C., Alexander M.J. // Rev. Geophys. 2003. V. 41. Art. No. 1.
7. Гаврилов Н.М., Коваль А.В. // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 271; Gavrilov N.M., Koval A.V. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2013. V. 49. No. 3. P. 244.
8. Мингалев И.В., Орлов К.Г., Федотова Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 434;

- Mingalev I.V., Orlov K.G., Fedotova E.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 354.
9. *Richter J.H., Sassi F., Garcia R.R.* // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. No. 1. P. 136.
10. *Hines C.O.* The upper atmosphere in motion: a selection of papers with annotation. American Geophysical Union, 1974.
11. *Akmaev R.A., Yudin V.A., Ortland D.A.* // Ann. Geophys. 1997. V. 15. No. 9. P. 1187.
12. *Gavrilov N.M.* // Ann. Geophys. 1997. V. 15. No. 12. P. 1570.
13. *Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Карпов М.И.* // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. № 4. С. 537; *Kurdyayeva Y.A., Kshevetsky S.P., Borchevkina O.P., Karpov M.I.* // Geomagn. Aeronomy. 2022. V. 62. No. 4. P. 453.
14. *Borchevkina O.P., Kurdyayeva Y.A., Karpov I.V. et al.* // Atmosphere. 2021. V. 12. Art. No. 11.
15. *Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P.* // Earth, Planets Space. 2014. V. 66. No. 1. P. 88.
16. *Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П., Гаврилов Н.М., Голикова Е.В.* // Сиб. журн. вычисл. матем. 2017. Т. 20. № 4. С. 393; *Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Golikova E.V.* // Numer. Analys. Appl. 2017. V. 10. No. 4. P. 324.
17. *Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А., Куличков С.Н.* // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 37; *Kshevetskii S.P., Kurdyayeva Y.A., Kulichkov S.N.* // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. No. 1. P. 30.
18. *Kshevetskii S., Borchevkina O., Kurdyayeva Y. et al.* // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. No. 11. P. 5567.
19. *Кшевецкий С.П.* // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. 2001. Т. 41. № 2. С. 295; *Kshevetskii S.P.* // Comput. Math. Math. Phys. 2001. V. 41. No. 2. P. 273.
20. *Kshevetskii S.P.* // Nonlinear. Proc. Geophys. 2001. V. 41. P. 37.
21. *Кшевецкий С.П.* // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. 2001. Т. 41. № 2. С. 1870; *Kshevetskii S.P.* // Comp. Math. Math. Phys. 2001. V. 41. P. 1777.
22. *Karpov I.V., Kshevetskii S.P.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89.
23. *Курдяева Ю.А., Кшевецкий С.П.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 423; *Kurdyayeva Y.A., Kshevetskii S.P.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 343.
24. *Nigusse M., Moldwin M., Yizengaw E.* // Atmosphere. 2022. V. 13. No. 9. P. 1414.
25. *John S.R., Kumar K.K.* // Clim. Dynam. 2012. V. 39. P. 1489.
26. *Hindley N.P., Wright C.J., Smith N.D., Mitchell N.J.* // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 7797.
27. *Гаврилов Н.М.* // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1974. Т. 10. № 1. С. 83.
28. *Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др.* // Геомагн. и аэроном. 1990. Т. 30. № 4. С. 612.
29. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al.* // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. A39.
30. *Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V.* // Adv. Space Res. 2021. V. 67. No. 1. P. 133.



## **Impact of the meteorological storm in the Moscow region in May 2017 on variations in upper atmosphere parameters**

**Y. A. Kurdyaeva<sup>1, \*</sup>, O. B. Borchevkina<sup>1</sup>, E. V. Golikova<sup>2</sup>, I. V. Karpov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236016 Russia*

<sup>2</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: yakurdyeva@gmail.com*

A numerical simulation of atmospheric wave propagation ahead of a strong pressure spike during a squall in Moscow on May 29, 2017, was performed using a three-dimensional version of the high-resolution nonlinear numerical model AtmoSym. The meteorological source was specified based on experimental observations of a network of 4 microbarographs located in the Moscow region. Wave perturbations in the upper atmosphere caused by the generation of internal gravity waves by the meteorological source were estimated.

*Keywords:* numerical modelling, atmosphere, thermosphere, internal gravity waves