



doi 10.26089/NumMet.v26r434

УДК 004.94;
551.511

Исследование вычислительной эффективности и адаптация блока радиационного переноса в вихреразрешающей модели атмосферного пограничного слоя

А. В. Дебольский

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0002-0182-5675, e-mail: and.debol@srcc.msu.ru

Е. В. Мортиков

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0002-9683-5701, e-mail: evgeny.mortikov@srcc.msu.ru

А. А. Полюхов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Российская Федерация
ORCID: 0000-0001-6336-3376, e-mail: aeromsu@gmail.com

Аннотация: В работе рассматриваются результаты подключения блока радиационного переноса RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCMs) в вихреразрешающую модель Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ имени М. В. Ломоносова (НИВЦ МГУ). Для апробации радиационного блока проведен анализ влияния турбулентного переноса аэрозольных частиц на суточную динамику атмосферного пограничного слоя в безоблачных условиях и в экспериментах по моделированию холодных вторжений в Арктике. При исследовании чувствительности результатов моделирования к частоте “синхронизации” радиационного блока с блоком динамики было установлено, что результаты моделирования находятся в пределах разброса ансамбля для времени синхронизации много меньшего, чем характерное турбулентное время. Проведенное исследование вместе с анализом масштабируемости общего алгоритма расчета показывает, что объединенная радиационная газодинамическая модель атмосферы может эффективно применяться в задачах численного анализа прямых и непрямых эффектов, связанных с наличием в воздухе аэрозолей, а также при моделировании облачного отклика.

Ключевые слова: вихреразрешающее моделирование, атмосферный пограничный слой, модели переноса излучения.

Благодарности: Работа поддержана Российским научным фондом по проекту № 25–77–20011 (разработка совместной модели и валидация аэрозольного блока) и Московским центром фундаментальной и прикладной математики, соглашение Министерства образования и науки РФ № 075–15–2025–345 (анализ результатов ансамблевых расчетов). При получении результатов использовалось оборудование Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова.

Для цитирования: Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Полюхов А.А. Исследование вычислительной эффективности и адаптация блока радиационного переноса в вихреразрешающей модели атмосферного пограничного слоя // Вычислительные методы и программирование. 2025. **26**, № 4. 515–533. doi 10.26089/NumMet.v26r434.

Computational efficiency and adaptation of radiation transfer module within Large-eddy simulation model

Andrey V. Debolskiy

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-0182-5675, e-mail: and.debol@srcc.msu.ru

Evgeny V. Mortikov

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-9683-5701, e-mail: evgeny.mortikov@srcc.msu.ru

Aleksei A. Poliukhov

Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0001-6336-3376, e-mail: aeromsu@gmail.com

Abstract: This paper examines the results of integrating the Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG) into the Large-Eddy simulation model developed by the Lomonosov Moscow State University Research Computing Center (RCC MSU). To test the integrated radiative transfer module, we conducted conduct analysis of the influence of turbulent aerosol particle transport on the diurnal dynamics of the atmospheric boundary layer under clear-sky conditions and in experiments modeling cold air bursts in the Arctic. A study of the sensitivity of the modeling results to the synchronization frequency of the radiative module with the dynamics core of the model revealed that the modeling results are within the ensemble spread for synchronization times much shorter than the characteristic turbulent time of the flow. This finding coupled with an analysis of the scalability of the overall computational algorithm, demonstrates that the combined models can be effectively applied to numerical analysis of direct and indirect aerosols effects, as well as to modeling cloud feedbacks.

Keywords: Large-eddy simulation, atmospheric boundary layer, radiative transfer.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation under the agreement No. 25–77–20011 and by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the program of the Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics under agreement No. 075–15–2025–345. The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University.

For citation: A. V. Debolskiy, E. V. Mortikov, and A. A. Poliukhov, “Computational efficiency and adaptation of radiation transfer module within Large-eddy simulation model,” Numerical Methods and Programming. **26** (4), 515–533 (2025). doi 10.26089/NumMet.v26r420.

1. Введение. Точное представление пространственно-временных процессов радиационного обмена имеет важное значение для реалистичного моделирования пограничного слоя атмосферы. Эти процессы определяют энергетический баланс поверхностей и, таким образом, сильно влияют на динамику пограничного слоя, а также на пространственно-временное распределение температуры, влажности и других скалярных переменных. Прямой расчет радиационных потоков в вихреразрешающих моделях (LES, Large Eddy Simulation) используется для изучения взаимосвязей аэрозоль–облачность–радиация [1] и исследования того, как эти взаимосвязи могут влиять на пограничный слой атмосферы [2]. Например, как различная высота слоя максимальной концентрации аэрозоля влияет на конвективный пограничный слой [3]. Результаты LES моделирования также находят применение при оценке непрямых [4–6] и полупрямых эффектов аэрозолей в слоистообразной облачности [7–9] и при оценке влияния поглощения солнечной радиации аэрозолями в трансформации морской слоистокучевой облачности в кучевые облака [10, 11].

Вихреразрешающее моделирование, как правило, относится к классу вычислений, в котором явным образом воспроизводятся крупные турбулентные вихри, переносящие энергию внутри атмосферы и наименее подверженные влиянию ошибок от различных процессов, которые могут быть параметризованы.

Перенос излучения в атмосфере является в этом плане наиболее изученным процессом подсеточного масштаба в том смысле, что теоретически при наличии хорошо охарактеризованной среды можно вычислить потоки с произвольной точностью [12]. Однако вычислительные затраты подобных расчетов слишком высоки, чтобы использовать в LES моделировании, и в настоящее время используются приближенные методы решения уравнения переноса радиации. Поэтому исследование масштабируемости и влияния особенностей реализации радиационных блоков на вычислительную сложность вихреразрешающих моделей является необходимой задачей для поиска компромисса между точностью воспроизведения процессов и быстродействием. Наиболее вычислительно эффективной схемой считается двухпотоковое приближение в геометрии сферического слоя, когда вычисляется плотность потока радиации вниз и вверх для однородного по горизонтали слоя, при этом латеральные потоки не учитываются. Такое приближение применяется в различных радиационных алгоритмах. Например, в модели PALM v6 [13] используется двухпотоковый алгоритм RRTM [14], развитие этого алгоритма ecRad [15] используется в моделях Meso-NH [16] и в модели ICON-LEM [17], в модели RAMS [18] — алгоритм Харрингтона [19], в модели MONC [20] — алгоритм SOCRATES [21]. Также есть LES модели с более сложными алгоритмами, например модель UCLALES-SALSA [22] с четырехпотоковой схемой [23]. А, например, в модели DALES [24] используется интегрированная схема Монте-Карло [12], где в каждой точке сетки и на каждом временному шаге поток излучения аппроксимируется потоком излучения одного случайно выбранного диапазона волн или случайно выбранной части диапазона волн, в которых все коэффициенты поглощения одинаковы.

В данной работе, в рамках развития технологий многомасштабного моделирования атмосферы, разрабатываемых в НИВЦ МГУ, исследуется эффективность совместной модели турбулентной динамики и радиационного переноса на примере модели RRTMG и разработанной в НИВЦ МГУ вихреразрешающей модели MSU LES (MSU LES model — Moscow State University Large-Eddy Simulation model) [25–28]. Совместная модель тестируется для случаев ясного неба и облачной атмосферы в экспериментах по моделированию холодных вторжений, а также в постановках с сопряжением модели деятельного слоя. Рассматривается возможность улучшения вычислительной эффективности за счет увеличения временного интервала обновления радиационного блока.

2. Вихреразрешающая модель НИВЦ МГУ. Для описания стратифицированного однородного по горизонтали пограничного слоя атмосферы рассматривается система уравнений Навье–Стокса, включающая уравнения движения, неразрывности и переноса тепла и влажности, в приближении Буссинеска. LES подход рассматривает уравнения относительно фильтрованных (по пространству, $\bar{\cdot}$ — оператор сечечной фильтрации) переменных: вектора скорости $\bar{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = (\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3) \equiv (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$, давления $\bar{p}(\mathbf{x}, t)$, потенциальной температуры $\bar{\Theta}(\mathbf{x}, t)$ и полной облачной влаги \bar{q}_{total} [25, 29]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}_*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \varepsilon_{ijk} f (\bar{u}_j - G_j) + \delta_{ij} \beta \bar{\Theta}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{\Theta}}{\partial x_i} = -\frac{\partial h_{\Theta i}}{\partial x_i} + \chi \frac{\partial^2 \bar{\Theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial F_{\text{rad}}}{\partial x_i} + \Phi_{\Theta}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{q}_{\text{total}}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{q}_{\text{total}}}{\partial x_i} = -\frac{\partial h_{q_{\text{total}} i}}{\partial x_i} + \chi_q \frac{\partial^2 \bar{q}_{\text{total}}}{\partial x_j \partial x_j} + \Phi_{q_{\text{total}}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \equiv (x, y, z)$, $\bar{p}_* = \bar{p}/\rho$, ν , χ и χ_q — коэффициенты молекулярной кинематической вязкости, теплопроводности и молекулярной диффузии, ρ — плотность воздуха, β — параметр плавучести, G_j — компоненты вектора геострофической скорости ветра $\mathbf{G} = (U_g(z, t), V_g(z, t), 0)$, f — параметр Кориолиса, ε_{ijk} — тензор Леви-Чивиты, δ_{ij} — символ Кронекера, t — время, $\partial F_{\text{rad}}/\partial x_i$ определяет дивергенцию радиационных потоков и связывает блок радиационного переноса с блоком динамики вихреразрешающей модели, $\Phi_{[\Theta, q_{\text{total}}]}$ — тенденции за счет фазовых переходов атмосферной влаги. В модели реализованы схемы микрофизики облаков различной сложности, для одномоментной микрофизики решаются прогностические уравнения переноса–реакции для отношений смеси гидрометеоров $\bar{q}_{\alpha} = \{q_{\text{cloud}}, q_{\text{ice}}, q_{\text{rain}}, q_{\text{snow}}\}$, а для двухмоментной микрофизической схемы дополнительно решаются уравнения для счетных концентраций \bar{N}_{α} (подробнее см. [28]). Подсеточные/подфильтровые потоки импульса τ_{ij} , явного тепла $h_{\Theta i}$ и

влажности $h_{q_{\text{total}i}}$ заданы соотношениями

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}, \quad (5)$$

$$h_{\Theta i} = \overline{u_i \Theta} - \overline{u_i} \overline{\Theta}, \quad (6)$$

$$h_{q_{\text{total}i}} = \overline{u_i q_{\text{total}}} - \overline{u_i} \overline{q_{\text{total}}} \quad (7)$$

и содержат зависимость от неразрешаемых явно членов $\overline{u_i u_j}$ и $\overline{u_i \Theta}$. Для замыкания системы уравнений (1)–(7) используется модель, основанная на определении эффективной турбулентной вязкости и диффузии, дополненная динамической процедурой. В вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ [25, 26, 30] расчет динамических коэффициентов реализован на основе использования тождества Германо и усреднения вдоль лагранжевых траекторий для решения задачи минимизации [31, 32].

В численной реализации модели [30, 33] используются консервативные конечно-разностные схемы [34] второго порядка точности для аппроксимации по пространству на прямоугольных сетках. Метод дробных шагов [35] применяется для интегрирования уравнений движения и неразрывности по времени при явной аппроксимации схемой Адамса–Башфорта третьего порядка операторов переноса импульса в (1), тепла в (3) и влаги в (4). Поправка к давлению, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности для поля скорости на каждом шаге по времени, находится из решения уравнения Пуассона с помощью итерационного метода бисопряженных градиентов с геометрическим многосеточным методом в качестве предобуславливателя. В динамической процедуре LES модели тестовый фильтр определяется согласно [29, 36], а отношение ширины базового и тестового фильтров вычисляется, следуя работе [37]. Проведенный ранее анализ вихреразрешающей модели [38] показал ее высокую эффективность, с незначительной возможностью дальнейшей оптимизации без изменения алгоритмической части.

3. Описание блока переноса радиации.

3.1. Общее описание модели RRTMG. Выбор RRTMG для внедрения в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ обусловлен в основном двумя причинами: 1) возможностью реализовать достаточно точный метод расчета радиационного переноса для использования в интерактивном тепловом балансе поверхности и для оценки аэрозольного эффекта; 2) приемлемыми вычислительными затратами, свойственными модели RRTMG.

RRTMG [14] представляет собой подходящую для этого модель, поскольку использует приближение PPH (Plane Parallel Homogenous) атмосферы, которое дает возможность независимого расчета отдельных “колонок” модели, однако при этом не учитывается горизонтальный перенос. Дополнительно RRTMG позволяет использовать встроенные в нее процедуры расчета оптических характеристик газовых и аэрозольных составляющих, устранив необходимость их отдельной реализации в модели.

Модель RRTMG рассматривает перенос излучения в двухпотоковом приближении. Основные решаемые уравнения для PPH в двухпотоковом представлении описывают изменения нисходящего F^- и восходящего F^+ радиационного излучения:

$$F^{\pm}(\tau(z)) = 2\pi \int_0^{\pm 1} I(\tau(z), \mu) \mu d\mu,$$

где μ — косинус зенитного угла, τ — оптическая толщина. Монохроматическая интенсивность излучения I определяется уравнением переноса:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - S(\tau, \mu). \quad (8)$$

Здесь $S(\tau, \mu)$ — функция источника, включающая в себя однократное рассеяние, прямое и термическое излучение:

$$S(\tau, \mu) = \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') P(\mu, \mu') d\mu' + Q^{\text{beam}}(\tau, \mu) + Q^{\text{thermal}}(\tau, \mu),$$

$$Q^{\text{beam}}(\tau, \mu) = \frac{\omega}{4\pi} P(\mu, -\mu_0) I_0 e^{-\tau/\mu_0},$$

$$Q^{\text{thermal}}(\tau, \mu) = (1 - \omega) B[\Theta(\tau)],$$

где $P(\mu, \mu')$ — индикатриса рассеяния, $B(\Theta)$ — функция Планка, ω — альбедо однократного рассеяния, μ_0, I_0 — зенитный угол и интенсивность солнечного излучения соответственно. Для аппроксимации фазовой функции используется метод δ -Эддингтона:

$$P_{\delta\text{-Edd}}(\cos \theta) = 2f\delta(1 - \cos \theta) + (1 - f)(1 + 3g'\cos \theta),$$

где δ — дельта-функция, f — вытянутость индикатрисы рассеяния вперед, g' — фактор асимметрии индикатрисы рассеяния в этом приближении.

Представленные выше уравнения подразумевают псевдомонохроматическое излучение. Для получения полных потоков спектр электромагнитного излучения разбивается на интервалы, и полные потоки нисходящей и восходящей радиации получаются интегрированием по спектру:

$$F^+(\tau(z)) = \int_0^\infty \left[B(\Theta_s)T[\tau(p, p_s)] - \pi \int_p^{p_s} B(\Theta') \frac{\partial[\tau(p, p')]}{\partial p'} dp' \right] d\lambda + \int_0^\infty \left[2\pi \int_0^1 I(\tau, \mu) \mu d\mu \right] d\lambda, \quad (9)$$

$$F^-(\tau(z)) = \int_0^\infty \left[\pi \int_0^{p_s} B(\Theta') \frac{\partial[\tau(p, p')]}{\partial p'} dp' \right] d\lambda + \int_0^\infty \left[2\pi \int_0^{-1} I(\tau, \mu) \mu d\mu + \mu_0 I_0 e^{-\tau/\mu_0} \right] d\lambda, \quad (10)$$

где λ — длина волны, $T[\tau(p, p')]$ — функция пропускания для длинноволновой радиации. Для двухпотоковой схемы интегралы по косинусу зенитного угла μ заменяются первыми двумя членами разложения Лежандра. Интеграл по спектру заменяется суммированием по спектральным интервалам. Для интегрирования внутри спектральных интервалов используется метод коррелированных k -распределений, который подразумевает переупорядочивание по коэффициентам ослабления составляющих атмосферы в g -точках спектральных полос и вычисление псевдомонохроматического переноса для каждой g -точки в ячейке модели.

Модель RRTMG использует 14 спектральных диапазонов и 112 g -точек в коротковолновом диапазоне (0.2–12.04 мкм) и 16 диапазонов и 140 g -точек в длинноволновом диапазоне (3.08–1000 мкм). Коэффициенты ослабления вычисляются путем интерполяции значений из предварительно рассчитанных методомLBLRT (Line-by-Line Radiative Transfer) табличных значений [39]. В длинноволновом диапазоне молекулярное поглощение рассчитывается для водяного пара, углекислого газа, озона, закиси азота, метана, кислорода, азота и хлорфтоглеродов. В коротковолновой части спектра учитывается молекулярное поглощение водяным паром, углекислым газом, озоном, закисью азота, метаном, кислородом, аэрозолями, а также рэлеевское рассеяние. Для учета рэлеевского рассеяния применяется метод дискретных ординат. В коротковолновой части спектра рассматриваются только последние члены в правых частях (9), (10), для длинноволновой части, наоборот, только первые члены в правых частях (9), (10). Взаимодействие радиационного блока с динамикой атмосферы в вихреразрешающей модели обусловлено радиационным нагревом воздуха:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial F_{\text{rad}}(z)}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial [F^-(z) - F^+(z)]}{\partial z}, \quad (11)$$

где C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Помимо непосредственно радиационного нагрева воздуха, влияние радиационных потоков учитывается в изменении температуры поверхности при сопряжении с моделью деятельного слоя суши.

Тепловой баланс поверхности описывается следующим уравнением:

$$C_s \frac{\partial T_{\text{surf}}}{\partial t} = H_s - LE_s + (1 - \alpha_{\text{dirS}})Q_{\text{dirS}} + (1 - \alpha_{\text{difS}})Q_{\text{difS}} + F_{\text{LWS}}^- - F_{\text{LWS}}^+, \quad (12)$$

где T_{surf} — температура поверхности, C_s — теплоемкость приповерхностного слоя, H_s и LE_s — турбулентные потоки явного и скрытого тепла, Q_{dirS} и Q_{difS} — нисходящая прямая и рассеянная коротковолновая радиация соответственно, α_{dirS} , α_{difS} — альбедо поверхности для прямого и рассеянного излучения, $(F_{\text{LWS}}^- - F_{\text{LWS}}^+)$ — дивергенция потоков длинноволновой радиации на поверхности.

Вычислительная сложность алгоритма RRTMG при независимом расчете отдельных колонок в предположении РРН атмосферы все равно довольно высока. Хотя двухпотковое приближение для решения (8) требует двух проходов и линейно зависит от количества вертикальных уровней, необходимость вычисления оптических свойств (которые определяются локально и большей частью представляют собой

получение значений из таблиц поиска для оптических свойств газовых составляющих и аэрозолей) для всех g -точек и решения уравнения переноса для всех спектральных интервалов значительно увеличивает количество операций на одну ячейку модели.

3.2. Блок аэрозольной и облачной оптики. В алгоритме расчета радиации необходимо знать оптические характеристики аэрозоля: аэрозольную оптическую толщину, альбедо однократного рассеяния и фактор асимметрии индикатрисы рассеяния. Учитывается 11 типов аэрозолей: три различающихся по размеру типа минерального аэрозоля 0.03–0.55 мкм, 0.55–0.90 мкм, 0.90–20.0 мкм; три различающихся по размеру типа морской соли 0.03–0.50 мкм, 0.50–5.0 мкм, 5.0–20.0 мкм, а также органический гидрофильный и гидрофобный аэрозоль, гидрофильный и гидрофобный черный углерод и сульфатный аэрозоль. Для гидрофильных аэрозолей массовый коэффициент ослабления зависит от относительной влажности воздуха. Такое разделение позволяет использовать в вихреразрешающей модели в качестве начальных и граничных условий данные реанализа CAMS [40], а также оптические характеристики аэрозолей, согласованные с моделью радиационного переноса EcRad [15]. Для расчета оптических характеристик облачности (альбедо однократного рассеивания, параметра асимметрии индикатрисы рассеяния) используются данные о водности облаков и эффективного радиуса облачных частиц, получаемые из блока микрофизики облаков вихреразрешающей модели. Используемые данные сведены в табл. 1. Для двухмоментной микрофизической схемы, где прогностическими переменными являются как отношения смесей гидрометеоров, так и их счетная концентрация, эффективные радиусы частиц рассчитываются напрямую из заданных распределений частиц по размерам. При использовании одномоментных схем в микрофизическом блоке эффективный радиус ледяных частиц оценивается с помощью параметризации [41], а для облачных частиц предполагается заданная счетная концентрация.

3.3. Схема сопряжения радиационного блока. Вертикальная протяженность расчетной области вихреразрешающей модели обычно не превосходит нескольких километров, тогда как для расчета радиационного переноса необходимо интегрирование по всей оптической толщине атмосферы τ . Для этого над LES доменом предполагается однородность атмосферы по горизонтали и используются вертикальные распределения аэрозолей и газовых составляющих по данным реанализов ERA5 и CAMS или же приближение стандартной атмосферы, при этом для удобства вертикальная сетка над расчетной областью

Таблица 1. Используемые базы данных для оптических свойств аэрозоля

Table 1. Source for aerosol optic properties lookup tables

Название аэрозоля Aerosol species	Длинноволновый спектр Long-wave spectrum	Коротковолновый спектр Short-wave spectrum
Минеральная пыль 0.03–0.55 мкм; 0.55–0.9 мкм; 0.9–20 мкм Mineral dust 0.03–0.55 μm ; 0.55–0.9 μm ; 0.9–20 μm	Fouquart 1987 [42]	Dubovik 2002 [43]
Морская соль 0.03–0.50 мкм, 0.50–5.0 мкм, 5.0–20.0 мкм Sea salt 0.03–0.50 μm , 0.50–5.0 μm , 5.0–20.0 μm	OPAC [44]	OPAC [44]
Черный углерод Black carbon	OPAC [44]	OPAC [44]
Сульфатный аэрозоль Ammonium sulphate	GCAP [45]	GCAP [45]
Гидрофильное органическое вещество Hydrophilic OM	OPAC [44]	OPAC [44]
Гидрофобное органическое вещество Hydrophobic OM	OPAC [44]	OPAC [44]
Жидкая фаза облачных капель Liquid phase clouds	Hu and Stamnes 1993 [46]	Hu and Stamnes 1993 [46]
Твердая фаза облачных капель Ice phase clouds	Key and Schweiger 1998 [47]	Key and Schweiger 1998 [47]

соответствует сетке ERA5. Для того чтобы избежать резких градиентов между верхней границей расчетной области, профили температуры, влажности и других метеовеличин сглаживаются в слое первых пяти уровней над верхней границей расчетной области. Результаты тестов показывают, что такого сглаживания достаточно и оно слабо влияет на перераспределение плотности радиационных потоков внутри расчетной области LES модели.

Еще одной особенностью сопряжения является то, что, с одной стороны, для интегрирования по всей оптической толщине атмосферы необходимо знание распределения давления во всей толщине атмосферы, а с другой — в уравнениях вихреразрешающей модели давление определяется с точностью до константы. Согласование вертикального распределения давления в таком случае можно произвести двумя способами: фиксируя приземное давление или перерасчетом высоты уровней над расчетной областью вихреразрешающей модели по гидростатике. В текущей версии модели используется первый подход как наиболее простой, не требующий перерасчета массы столба атмосферы.

Вертикальный нагрев за счет радиационного переноса (11) рассчитывается для мгновенного распределения радиационных потоков. При этом временная изменчивость радиационных потоков значительно меньше изменчивости метеовеличин на одном шаге по времени вихреразрешающей модели. Поэтому обновление радиационного переноса можно производить с большим временным интервалом. Кроме того, для идеализированных условий однородной поверхности и ясного неба пространственная изменчивость радиационных потоков невелика и радиационный перенос можно ускорить дополнительно, рассчитывая его по осредненным по горизонтали полям. В целом же схема сопряжения радиационного блока LES dynamics с вихреразрешающей моделью представлена на рис. 1, на которой обозначены:

- Data copy — получение из блока динамики профилей метеовеличин;
- Extended profiles update — дополнение профилей до верхней границы атмосферы (ВГА);
- Auxiliary parameters evalution — расчет необходимых для блока дополнительных переменных (эффективные радиусы облачных метеоров, текущий зенитный и полярный углы Солнца и т.п.);
- LW/SW RRTMG — расчет блока радиационного переноса;
- Heat rate surface radiation auxiliary output — расчет радиационного нагрева и передача данных в блок динамики и в блок выдачи.

4. Верификация совместной модели.

4.1. Моделирование суточного хода при ясном небе. Для валидации проведены численные эксперименты с вихреразрешающей моделью по воспроизведению изменения аэрозольного радиационного эффекта в районе Метеорологической обсерватории МГУ. Рассматривалось воспроизведение оптических характеристик аэрозоля в ясную погоду 18.06.2021–20.06.2021. Крупномасштабный метеорологический форсинг задавался по данным реанализа ERA5. Рассматривалось два варианта аэрозольных концентраций: концентрации, соответствующие климатической норме периода 2000–2007 гг. и периода 2017–2024 гг. по данным реанализа CAMS. Первый период характеризуется повышенными концентрациями сульфатного аэрозоля (в три раза по сравнению со вторым периодом), аэрозольные оптические толщины для первого и второго периода составили 0.1882 и 0.1297.

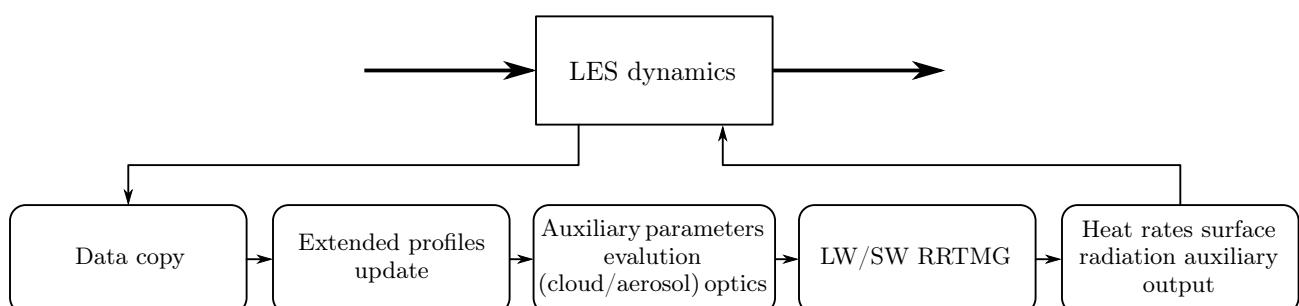


Рис. 1. Схема сопряжения блока динамики и радиационного блока RRTMG

Fig. 1. Flow chart of coupled LES and RRTMG radiation block

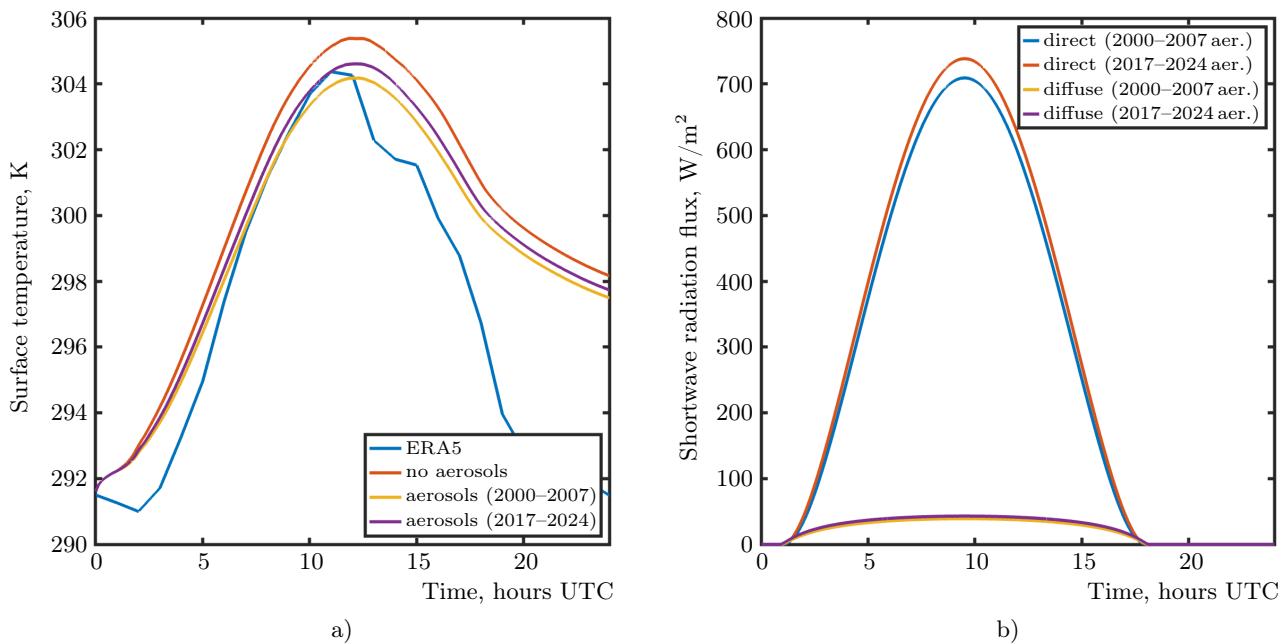


Рис. 2. Результаты экспериментов по воспроизведению прямого аэрозольного эффекта (по данным Метеорологической обсерватории МГУ): а) временной ход температуры поверхности; б) потоки прямого и рассеянного солнечного излучения у поверхности

Fig. 2. Results of experiments to reproduce the direct aerosol effect (based on data from the Moscow State University Meteorological Observatory): a) time evolution of surface temperature; b) fluxes of direct and diffuse solar radiation at the surface

На рис. 2 представлена временная изменчивость температуры поверхности и прямой и рассеянной коротковолновой радиации по данным экспериментов с вихреразрешающей моделью. Аэрозольный эффект оценивался для конфигураций модели с предписанной температурой поверхности и с интерактивной моделью деятельного слоя, в которой для расчета температуры использовалось уравнение (12). Отметим, что суточный ход поверхностной температуры отличается от реанализа, что связано с различиями в задании теплофизических свойств почвы. Получаемые в результате моделирования отклики (порядка 0.2–0.3 К в изменениях приземной температуры и 0.1 К/день в радиационном нагреве) на изменения аэрозольного состава в температуре и потоках прямой и рассеянной радиации согласуются с более ранними исследованиями [48, 49].

4.2. Моделирование радиационного переноса в облачности. Для тестирования совместной модели в воспроизведении радиационного переноса в облачной атмосфере рассматривалась постановка численного эксперимента [50] по воспроизведению арктических холодных вторжений. Первые четыре часа эксперимента COMBLE-MIP (Cold-Air Outbreaks in the Marine Boundary Layer Experiment Model-Observation Intercomparison Project) в воздушной массе развивался устойчивый пограничный слой над выхоложенной поверхностью морского льда, затем происходило формирование мелкой конвекции над поверхностью открытой морской воды. Расчетная область модели составляла $(L_x, L_y, L_z) = (25.6, 25.6, 7)$ км при размере расчетной сетки $N_x \times N_y \times N_z = 128 \times 128 \times 75$ для грубого разрешения и $N_x \times N_y \times N_z = 256 \times 256 \times 150$ для более точного.

На рис. 3 представлена временная изменчивость приповерхностных потоков восходящего и нисходящего длинноволнового излучения, а также исходящего излучения на ВГА, по данным вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ. Показаны данные экспериментов с различными относительными периодами расчета радиационного переноса $\hat{t}_{\text{nskip}} = \{1, 20, 50, 100, 150, 200, 300\}$, где период обновления радиационного блока рассматривался относительно временного шага блока динамики LES модели $\hat{t}_{\text{nskip}} = \Delta t_{\text{radiation}} / \Delta t_{\text{dynamics}}$. В экспериментах с грубым разрешением $\Delta t_{\text{dynamics}} = 1$ с. Также на рис. 3 приведены результаты расчетов по другим моделям, участвующим в сравнительном эксперименте. В целом и временной ход, и абсолютные значения поверхностного потока хорошо согласуются с другими моделями. Более подробно влияние временного разрешения в блоке расчета радиационного переноса обсуждается в следующих разделах.

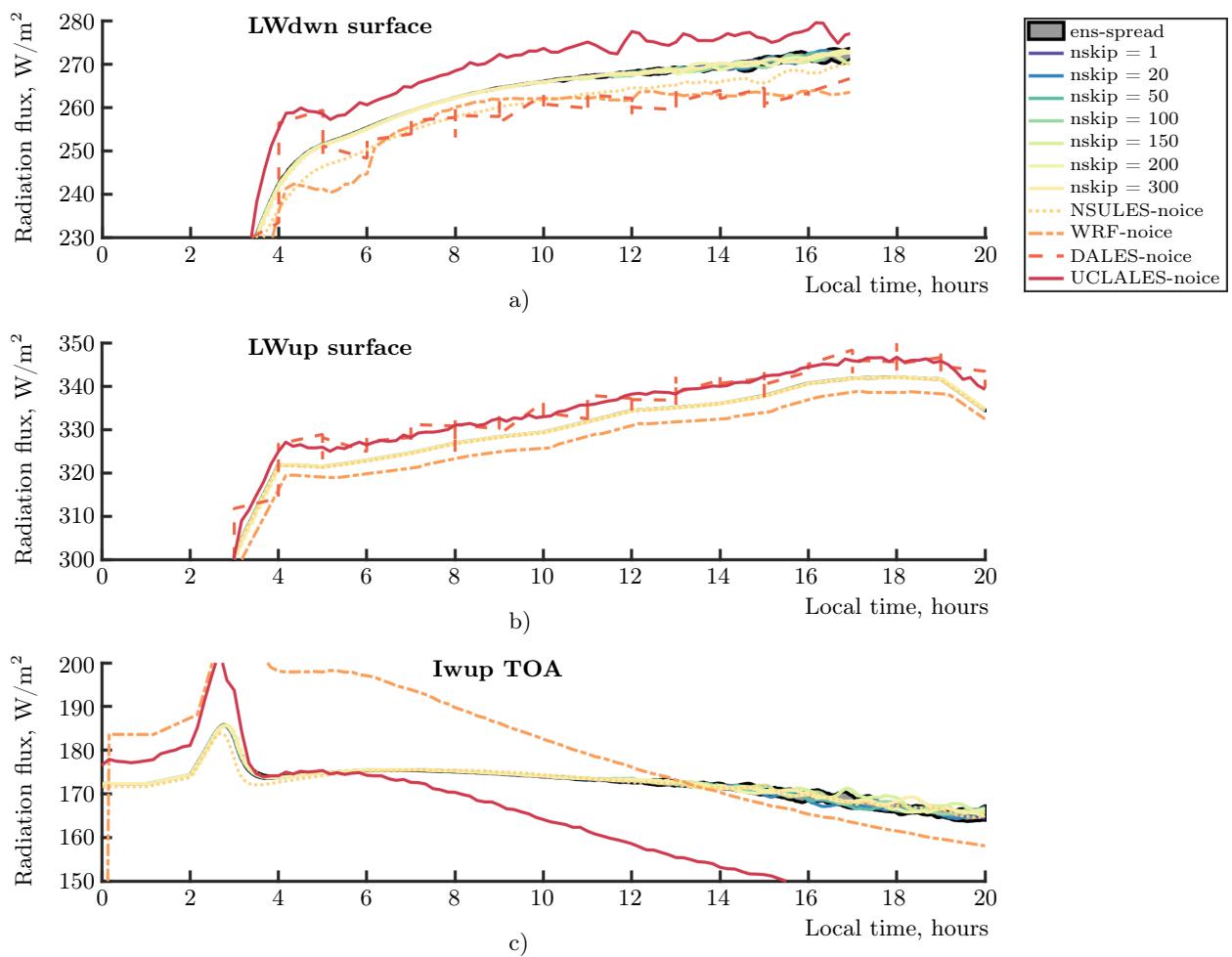


Рис. 3. Результаты расчетов изменения во времени радиационных потоков в эксперименте COMBLE-MIP для модели MSU LES с различным времененным разрешением блока радиационного переноса и других моделей: а) для нисходящей длинноволновой радиации на поверхности; б) для восходящей длинноволновой радиации на поверхности; в) для восходящей длинноволновой радиации на ВГА

Fig. 3. Temporal variation of radiation fluxes in the COMBLE-MIP experiment for MSU LES model with different temporal resolutions of the radiative transfer block and other models: a) for downward longwave radiation at the surface; b) for upward longwave radiation for upward longwave radiation at the surface; c) for upward longwave radiation at the TOA

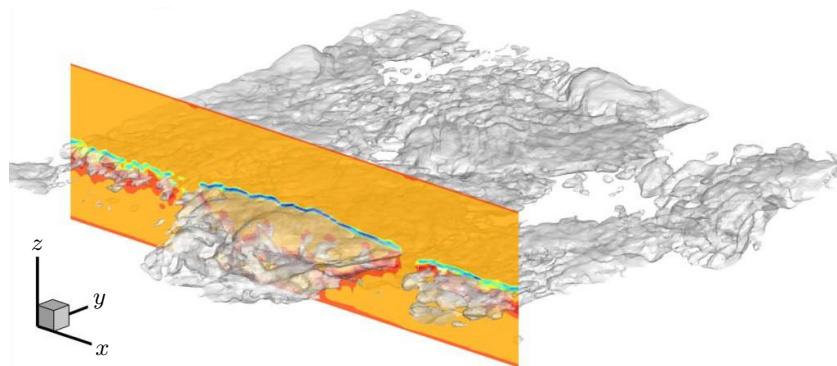


Рис. 4. Мгновенное трехмерное поле облачности и вертикальный срез в плоскости (x, z) поля радиационного нагрева в эксперименте COMBLE-MIP по данным вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ

Fig. 4. Instantaneous three-dimensional cloud field and vertical slice in the (x, z) plane of the radiation heating field in the COMBLE-MIP experiment ($t = 5$ hours) based on the data of the eddy-resolving model of MSU LES model

5. Вычислительная эффективность совместной модели.

5.1. Чувствительность к временному интервалу расчета радиации. Поскольку даже расчет радиационного переноса в каждой колонке с тем же временным разрешением, что и динамический блок вихреразрешающей модели, все еще достаточно вычислительно дорог и занимает от 80 до 90% расчетного времени, возможно рассмотреть конфигурации, в которых радиационный блок рассчитывается реже. Априорные оценки показывают, что для случаев ясного неба такой подход оправдан ввиду малости радиационного нагрева непосредственно атмосферы, тогда как радиационный нагрев поверхности имеет характерный временной масштаб равный половине суток. При наличии облачности же, дивергенция потока теплового излучения может быть значительной и, более того, значительно коррелировать с полем облачной влаги.

Для исследования влияния временного разрешения радиационного блока на точность воспроизведения мелкой облачной конвекции рассматривался также случай холодного вторжения. Были проведены ансамблевые расчеты с LES моделью (10 членов ансамбля, генерация ансамбля с помощью возмущения начальных условий в температуре), которые использовались для оценки значимости влияния временного разрешения радиационного блока. Расчеты проводились на суперкомпьютере Ломоносов-2 Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ. На рис. 5 представлены результаты воспроизведения временного хода средних по области балла облачности и водозапаса облачной влаги по данным численных экспериментов с LES моделью при различном временному разрешении расчета радиационного блока. Ансамблевые расчеты проводились при $\hat{t}_{\text{nskip}} = 50$. Как видно из рис. 5, различия в интегральных характеристиках облачности между экспериментами почти всегда находятся в пределах разброса ансамбля. Аналогичным образом на рис. 3 представлен временной ход средних по горизонтали радиационных характеристик — нисходящего и восходящего потоков длинноволновой радиации у поверхности и исходящего потока на ВГА.

Для данных характеристик реализации с $\hat{t}_{\text{nskip}} = 200$ и $\hat{t}_{\text{nskip}} = 300$ значительно выбиваются за разброс ансамбля в конце эксперимента, поэтому максимальный относительный период обновления ради-

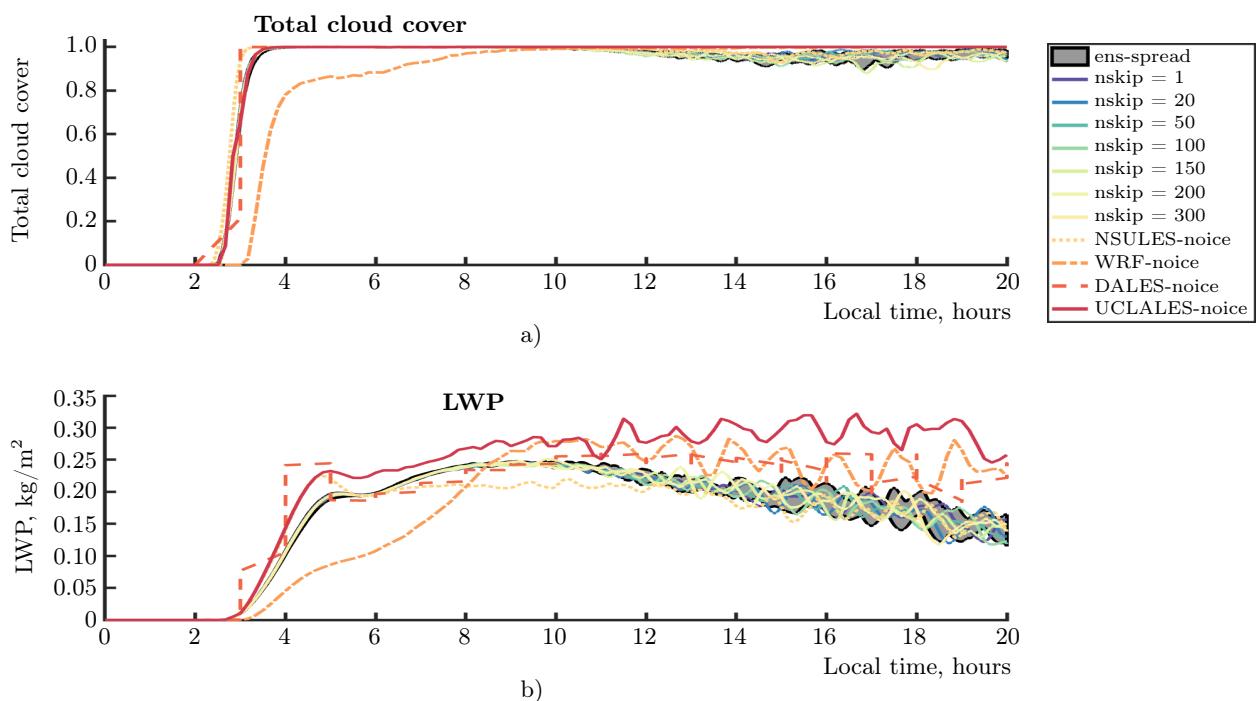


Рис. 5. Изменения по времени облачных характеристик в эксперименте COMBLE-MIP по данным модели MSU LES с различным временным разрешением блока радиационного переноса и других моделей: а) изменение балла облачности с течением времени; б) изменение водности облаков с течением времени

Fig. 5. Temporal evolution of cloud characteristics in the COMBLE-MIP for MSU LES model with different relative time resolutions of the radiative transfer block and other models: a) time evolution of the total cloud cover; b) time evolution of the liquid water path



аационного блока \hat{t}_{nskip} , который можно использовать для корректной оценки средних, составляет порядка $\hat{t}_{\text{nskip}} \sim 150$, что соответствует приблизительно половине от характерного масштаба времени Дирдорфа.

Поскольку максимальные радиационные нагрев/охлаждение происходят на нижней/верхней границе облаков (рис. 4), наибольший отклик на временнóе разрешение блока радиационного переноса можно ожидать в дисперсии влагосодержания облаков. Временнóй ход профиля дисперсии влагосодержания для экспериментов с различным \hat{t}_{nskip} представлен на рис. 6. Значительных различий между экспериментами не наблюдается. Однако области выбросов дисперсии за пределы ансамбля соответствуют областям выбросов за пределы разброса ансамбля во временнóй изменчивости вертикального профиля радиационного

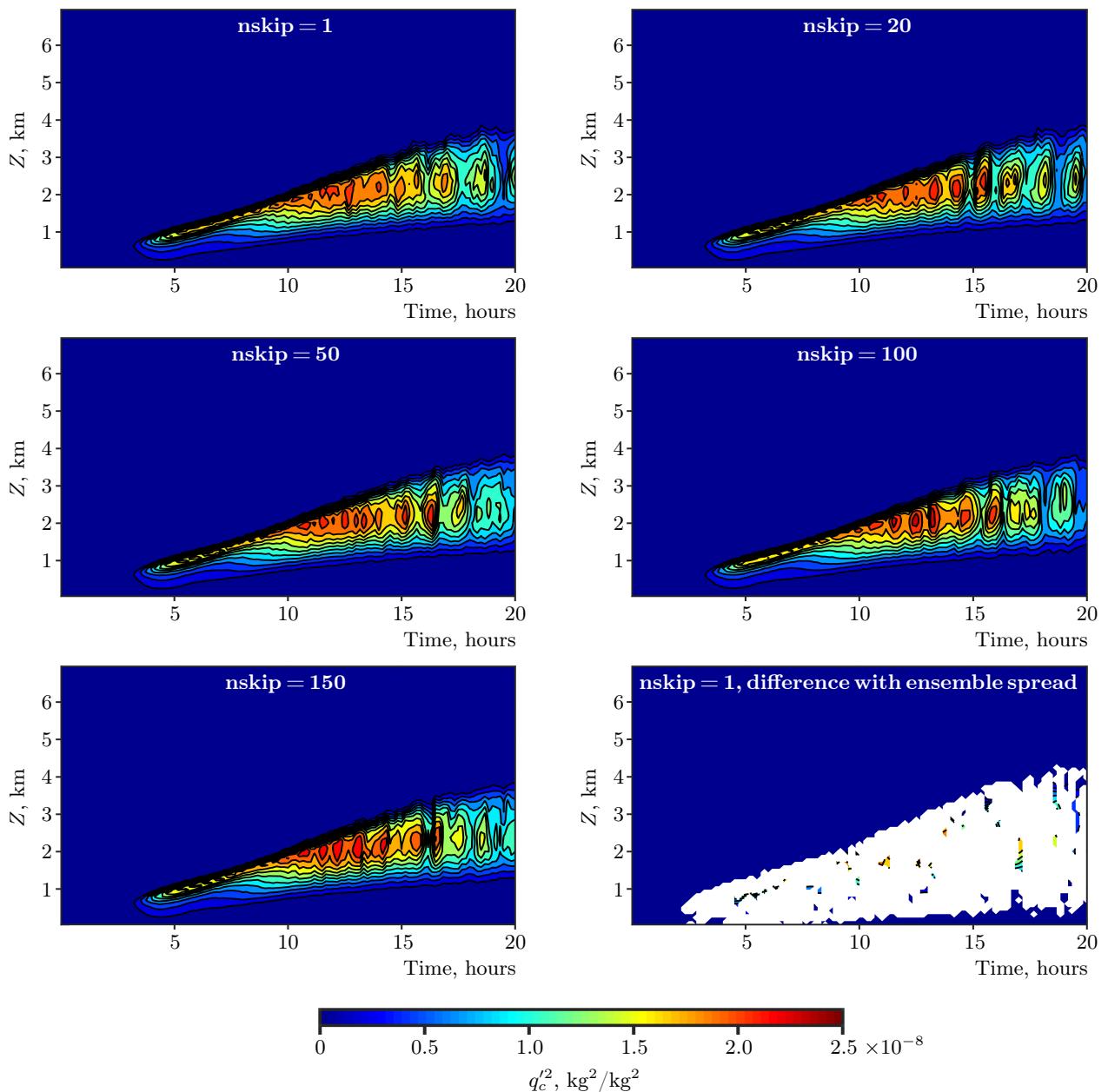


Рис. 6. Изменение во времени профиля дисперсии влагосодержания облаков по результатам вычислительных экспериментов с различным временнóм разрешением блока радиационного переноса в эксперименте COMBLE-MIP. На нижнем справа рисунке незакрашенная область соответствует выходу за пределы разброса ансамбля

Fig. 6. Time evolution of the cloud moisture dispersion profile based on the results of computational experiments with different time resolutions of the radiative transfer block in the COMBLE-MIP experiment. In the lower right figure, the unshaded region corresponds to the deviation beyond the ensemble spread

нагрева, что свидетельствует о наличии значимого отклика дисперсии влагосодержания на изменения радиационного нагрева. Это означает, что при исследовании тонких взаимосвязей, например обмена между ядром облачного термика с фоновой массой воздуха (значительно зависящего от старших турбулентных моментов), следует все же использовать более точное временн δ е разрешение расчета радиационного переноса, при этом для средних профилей $\Delta t_{\text{radiation}}$ может достигать долей характерных турбулентных временных масштабов.

5.2. Масштабируемость. Временн δ е разрешение расчетов радиационного блока значительно влияет на масштабируемость модели. Приведенный выше анализ показывает, что увеличение временн δ е разрешения блока радиационного переноса до значений порядка первых минут слабо влияет на результаты моделирования. Это в значительной степени позволяет ускорить время расчетов модели. Исследования масштабируемости проводились на кластере ИФА РАН, состоящем из двухпроцессорных узлов с 64-ядерными CPU AMD EPYC 7742.

На рис. 7 представлены доли, занимаемые вычислениями в блоке радиационного переноса (с учетом копирования данных в радиационный блок), для экспериментов с грубым разрешением с использованием одного узла кластера (128 ядер) с различными периодами обновления радиационного блока.

Для сравнения на рисунке также представлена доля вычислений радиационного блока с использованием средних по горизонтали полей. Так как расчет радиационного переноса происходит последовательно по колонкам модели на каждом MPI процессе, доля вычислений радиационного блока значительно зависит от размера подобласти, приходящейся на MPI процесс. С учетом размера области в экспериментах с грубым разрешением при использовании 128 ядер на MPI процесс в блоке расчета радиационного переноса приходится 128 колонок. Расчет с периодом обновления радиационных потоков порядка 40 с соответствует доле, занимаемой вычислениями в радиационном блоке расчета по осредненным полям (с учетом накладных расходов на осреднения для расчетов радиационного переноса по средним полям).

На рис. 8 представлена масштабируемость различных блоков вихреразрешающей модели и доля, занимаемая вычислениями в блоке радиационного переноса относительно полного времени расчетов для различного временн δ е разрешения радиационного блока, в зависимости от количества используемых вычислительных ядер. При обновлении радиационного блока на каждом шаге модели расчет радиационного переноса занимает почти все время. Соответственно, масштабируемость радиационного блока определяет и масштабируемость всей LES модели. С учетом того, что масштабируемость радиационного блока сильно зависит от размера доли расчетной области, приходящейся на MPI процесс, радиационный блок превосходно ускоряется с увеличением количества используемых ядер. С уменьшением относительной частоты расчетов радиационного блока (**Radiation**) блоки динамики (**Dynamics**) и расчета подсеточного замыкания вихреразрешающей модели (**LES closure**) в большей степени определяют масштабируемость всей модели, которая становится похожей на проведенное ранее тестирование [25]. При этом ускорение модели в терминах “масштабируемость — количество точек на ядро” не ухудшается по сравнению с масштабируемостью модели без блока радиационного переноса. Доля времени, затрачиваемого на расчет радиационного переноса, падает с увеличением количества MPI процессов, так как поколоночный расчет почти не содержит операций по горизонтали и, соответственно, обладает большей чем остальные части модели локальностью данных. Нелинейное уменьшение (с увеличением числа процессов) доли затрачиваемой на расчет радиационного переноса времени скорее всего связано с эффектами кэширования, а также сокращения времени поиска оптических свойств по поисковым таблицам для более схожих профилей (из-за уменьшения горизонтальной “дисперсии” внутри одной MPI подобласти при уменьшении ее размера).

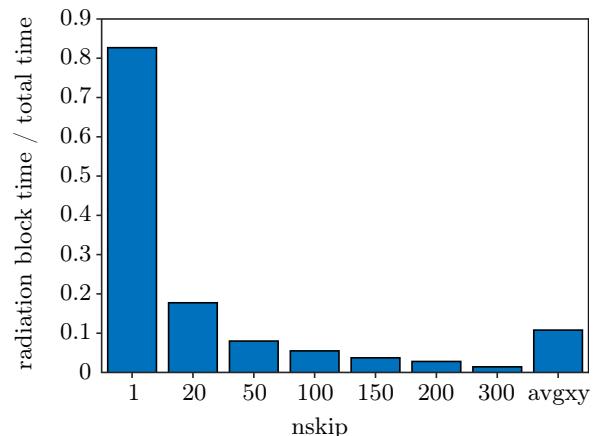


Рис. 7. Доля, занимаемая расчетом блока радиации от общего времени счета модели, в зависимости от временн δ е разрешения

Fig. 7. Relative load of radiative transfer model

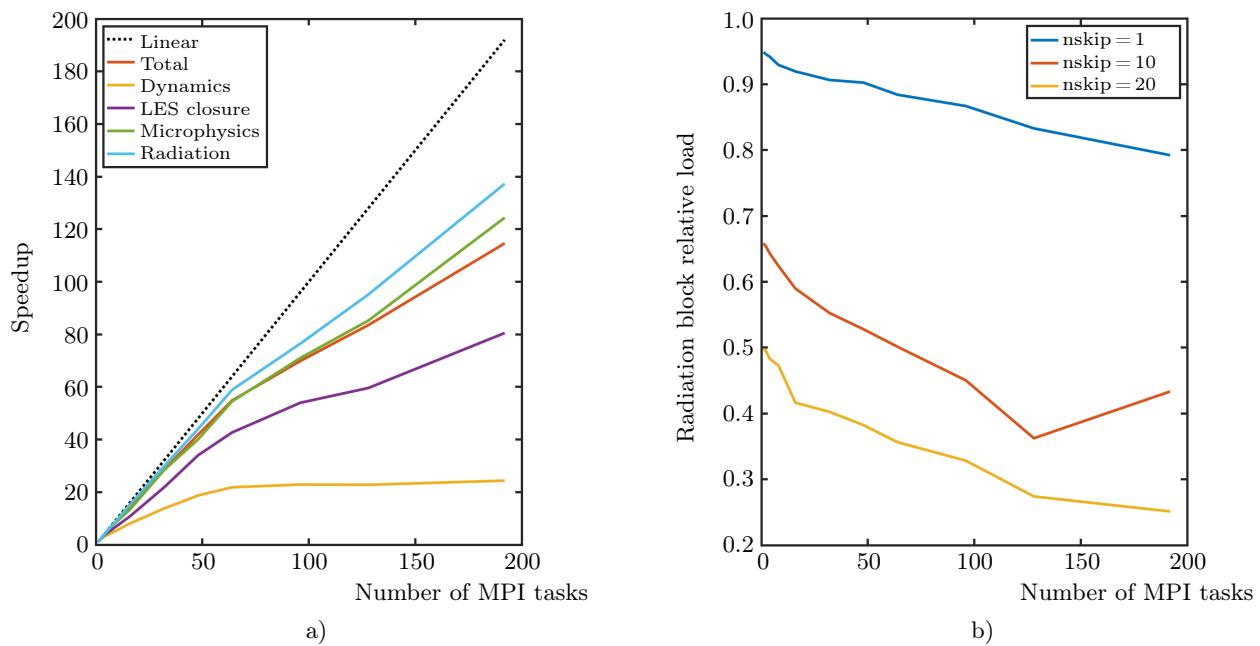


Рис. 8. Зависимости от числа MPI процессов при различных относительных периодах расчета блока радиационного переноса: а) масштабируемости модели совместно с блоком радиации при обновлении профилей на каждом шаге по времени; б) доли времени, затрачиваемой на расчет радиационного переноса относительно остальных частей модели

Fig. 8. Dependences on the number of MPI processes for different relative periods of calculation of the radiative transfer block: a) scalability of the model together with the radiation block when updating profiles at each time step; b) the proportion of time spent on calculating radiative transfer relative to the rest of the model parts

6. Заключение. В вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ включена модель радиационного переноса RRTMG. Реализован интерфейс последовательного поколоночного расчета переноса радиации внутри MPI подобластей. Произведено согласование блока радиационного переноса с блоком микрофизики и тестирование совместной модели в экспериментах с кучевой и кучево-слоистой облачностью. Исследовано влияние временного разрешения блока радиационного переноса на масштабируемость и качество воспроизведения конвективных облачных пограничных слоев. Для оценки качества воспроизведения проводилось сравнение с данными ансамблевых расчетов и других LES моделей. Увеличение периода обновления радиационных потоков до двух-трех минут незначительно влияет на результаты численных экспериментов в терминах средних профилей, преимущественно оставаясь в рамках собственной изменчивости LES модели. При таком временном разрешении вычисления в блоке радиационного переноса не превышают 10% времени расчета модели и не ухудшают масштабируемости модели, поэтому рекомендованы к использованию.

Программные реализации и выбор алгоритмов в вихреразрешающих моделях достаточно обширен, как и подключаемых к ним моделей радиационного переноса, что порождает вопрос об универсальности представленных в данном исследовании результатов. Утверждать об этом с абсолютной уверенностью невозможно, однако можно привести несколько аргументов в пользу некоторой универсальности. Большинство алгоритмов (аппроксимации производных, фильтрация и т.д.), используемых в динамическом блоке вихреразрешающих моделей, представляют собой двумерные/трехмерные стенсилы небольшого размера, которые делают программную реализацию модели ограниченной пропускной способностью оперативной памяти. С другой стороны, модель MSU LES обладает высоким быстродействием и значительно оптимизирована в плане низкоуровневых оптимизаций (уровня векторизации, использования кэш-памяти и т.п.). Поэтому ее масштабируемость можно предполагать характерной для подобного рода моделей. RRTMG при этом является крайне популярной библиотекой расчета радиационного переноса в атмосфере. Возможно, какое-то преимущество в быстродействии удастся получить, используя “in-house” реализацию радиационного переноса за счет отказа от дополнительного копирования данных через ин-

терфейсы и использование единых структур данных как в динамическом, так и в радиационном блоке, что, однако, требует значительных затрат разработчиков.

Оптимальная относительная частота расчета радиационного переноса является по сути “физической” задачей и, соответственно, определяется взаимосвязью характерных турбулентных масштабов времени и величиной радиационного отклика на изменения концентраций аэрозолей и гидрометеоров. Однако, с одной стороны, на внутреннюю изменчивость вихреразрешающей модели может влиять эффективное разрешение, выбор подсеточного замыкания и т.п., а с другой — корректно поставленный модельный эксперимент должен обладать сходимостью по шагу сетки, и для высоких разрешений разница между LES моделями должна уменьшаться. В этой связи определенные в данной работе относительные частоты расчета радиационного переноса стоит трактовать как априорные оценки при постановке конкретных экспериментов.

Список литературы

1. *Slater J., Tonttila J., McFiggans G., et al.* Using a coupled large-eddy simulation–aerosol radiation model to investigate urban haze: sensitivity to aerosol loading and meteorological conditions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. **20**, N 20. 11893–11906. doi [10.5194/acp-20-11893-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-11893-2020).
2. *Su T., Li Z., Zheng Y., et al.* Aerosol-boundary layer interaction modulated entrainment process // *NPJ Climate and Atmospheric Science*. 2022. **5**, N 1. Article Number 64. doi [10.1038/s41612-022-00283-1](https://doi.org/10.1038/s41612-022-00283-1).
3. *Barbaro E., Vilá-Guerau de Arellano J., Krol M.C., Holtslag A.A.M.* Impacts of aerosol shortwave radiation absorption on the dynamics of an idealized convective atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology* 2013. **148**, N 1. 31–49. doi [10.1007/s10546-013-9800-7](https://doi.org/10.1007/s10546-013-9800-7).
4. *Costa-Surós M., Sourdeval O., Acquistapace C., et al.* Detection and attribution of aerosol–cloud interactions in large-domain large-eddy simulations with the ICOsahedral non-hydrostatic model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. **20**, N 9. 5657–5678. doi [10.5194/acp-20-5657-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-5657-2020).
5. *Lu M.-L., Seinfeld J.H.* Effect of aerosol number concentration on cloud droplet dispersion: a large-eddy simulation study and implications for aerosol indirect forcing // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2006. **111**, N D02207. 1–16. doi [10.1029/2005JD006419](https://doi.org/10.1029/2005JD006419).
6. *Xue H., Feingold G.* Large-eddy simulations of trade wind cumuli: investigation of aerosol indirect effects // *Journal of the atmospheric sciences*. 2006. **63**, N 6. 1605–1622. doi [10.1175/JAS3706.1](https://doi.org/10.1175/JAS3706.1).
7. *Johnson B.T., Shine K.P., Forster P.M.* The semi-direct aerosol effect: impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2004. **130**, N 599. 1407–1422. doi [10.1256/qj.03.61](https://doi.org/10.1256/qj.03.61).
8. *Herbert R.J., Bellouin N., Highwood E.J., Hill A.A.* Diurnal cycle of the semi-direct effect from a persistent absorbing aerosol layer over marine stratocumulus in large-eddy simulations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. **20**, N 3. 1317–1340. doi [10.5194/acp-20-1317-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-1317-2020).
9. *Ding K., Huang X., Ding A., et al.* Aerosol-boundary-layer-monsoon interactions amplify semi-direct effect of biomass smoke on low cloud formation in Southeast Asia // *Nature communications*. 2021. **12**, N 1. Article Number 6416. doi [10.1038/s41467-021-26728-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26728-4).
10. *Erfani E., Blossey P., Wood R., et al.* Simulating aerosol lifecycle impacts on the subtropical stratocumulus-to-cumulus transition using large-eddy simulations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. **127**, N 21. e2022JD037258. doi [10.1029/2022JD037258](https://doi.org/10.1029/2022JD037258).
11. *Yamaguchi T., Feingold G., Kazil J., McComiskey A.* Stratocumulus to cumulus transition in the presence of elevated smoke layers // *Geophysical Research Letters*. 2015. **42**, N 23. 10478–10485. doi [10.1002/2015GL066544](https://doi.org/10.1002/2015GL066544).
12. *Pincus R., Stevens B.* Monte Carlo spectral integration: a consistent approximation for radiative transfer in large eddy simulations // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2009. **1**, N 2. 1–9. doi [10.3894/JAMES.2009.1.1](https://doi.org/10.3894/JAMES.2009.1.1).
13. *Krč P., Resler J., Sühring M., et al.* Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0 // *Geoscientific Model Development Discussions*. 2021. **14**, N 5. 3095–3120. doi [10.5194/gmd-14-3095-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021).
14. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. **102**, N D14. 16663–16682. doi [10.1029/97JD00237](https://doi.org/10.1029/97JD00237).
15. *Hogan R.J., Bozzo A.* A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2018. **10**, N 8. 1990–2008. doi [10.1029/2018MS001364](https://doi.org/10.1029/2018MS001364).
16. *Lac C., Chaboureau J.-P., Masson V., et al.* Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications // *Geoscientific Model Development*. 2018. **11**, N 5. 1929–1969. doi [10.5194/gmd-11-1929-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018).
17. *Dipankar A., Stevens B., Heinze R., et al.* Large eddy simulation using the general circulation model ICON // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2015. **7**, N 3. 963–986. doi [10.1002/2015MS000431](https://doi.org/10.1002/2015MS000431).

18. Stokowski D., Cotton W.R. The addition of the direct radiative effect of atmospheric aerosols into the Regional Atmospheric Modeling System // Colorado: Colorado State University, Department of Atmospheric Science, Fort Collins, 2005.
19. Harrington J.Y. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season Arctic stratus // Colorado: Colorado State University, USA, 1997.
20. Brown N., Weiland M., Hill A., et al. A highly scalable Met Office NERC Cloud model // arXiv preprint 2020. doi [10.48550/arXiv.2009.12849](https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.12849).
21. Edwards J.M., Slingo A. Studies with a flexible new radiation code. I: choosing a configuration for a large-scale model // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1996. **122**, N 531. 689–719. doi [10.1002/qj.49712253107](https://doi.org/10.1002/qj.49712253107).
22. Tonttila J., Maalick Z., Raatikainen T., et al. UCLALES-SALSA v1.0: a large-eddy model with interactive sectional microphysics for aerosol, clouds and precipitation // Geoscientific Model Development. 2017. **10**, N 1. 169–188. doi [10.5194/gmd-10-169-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-169-2017).
23. Fu Q., Liou K.N. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds // Journal of the Atmospheric Sciences. 2002. **59**, N 13. 2008–2025.
24. Heus T., van Heerwaarden C.C., Jonker H.J.J., et al. Formulation of the Dutch Atmospheric Large-Eddy Simulation (DALES) and overview of its applications // Geoscientific Model Development. 2010. **3**, N 2. 415–444. doi [10.5194/gmd-3-415-2010](https://doi.org/10.5194/gmd-3-415-2010).
25. Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. Intercomparison of subgrid scale models in large-eddy simulation of sunset atmospheric boundary layer turbulence: computational aspects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. **42**, N 7. 1580–1595. doi [10.1134/S1995080221070234](https://doi.org/10.1134/S1995080221070234).
26. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // Quarterly J. of the Royal Meteorological Society. 2021. **147**, N 737. 2233–2243. doi [10.1002/qj.4019](https://doi.org/10.1002/qj.4019).
27. Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lüpkes C. Evaluation of surface layer stability functions and their extension to first order turbulent closures for weakly and strongly stratified stable boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 2023. **187**. 73–93. doi [10.1007/s10546-023-00784-3](https://doi.org/10.1007/s10546-023-00784-3).
28. Mortikov E.V., Gashchuk E.M., Debolskiy A.V. GPU-based large-eddy simulation of mixed-phased clouds // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2025. In preparation.
29. Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., et al. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer // Geoscientific Model Development. 2016. **9**, N 9. 2925–2949. doi [10.5194/gmd-9-2925-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-2925-2016).
30. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. **34**, N 2. 119–132. doi [10.1515/rnam-2019-0010](https://doi.org/10.1515/rnam-2019-0010).
31. Bou-Zeid E., Meneveau C., Parlange M. A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows // Physics of Fluids. 2005. **17**, N 2. Article number 025105. doi [10.1063/1.1839152](https://doi.org/10.1063/1.1839152).
32. Meneveau C., Lund T.S., Cabot W.H. A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence // Journal of Fluid Mech. 1996. **319**, N 1. 353–385. doi [10.1017/S0022112096007379](https://doi.org/10.1017/S0022112096007379).
33. Мортиков Е.В. Численное моделирование движения ледяного киля в стратифицированной жидкости // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. **52**, N 1. 120–128. doi [10.7868/S0002351516010077](https://doi.org/10.7868/S0002351516010077).
34. Morinishi Y., Lund T.S., Vasilyev O.V., Moin P. Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow // Journal of Computational Physics. 1998. **143**, N 1. 90–124. doi [10.1006/jcph.1998.5962](https://doi.org/10.1006/jcph.1998.5962).
35. Brown D.L., Cortez R., Minion M.L. Accurate projection methods for the incompressible Navier–Stokes equations // Journal of Computational Physics. 2001. **168**, N 2. 464–499. doi [10.1006/jcph.2001.6715](https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6715).
36. Zang Y., Street R.L., Koseff J.R. A dynamic mixed subgrid-scale model and its application to turbulent recirculating flows // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1993. **5**, N 12. 3186–3196. doi [10.1063/1.858675](https://doi.org/10.1063/1.858675).
37. Lund T.S. On the use of discrete filters for large eddy simulation // Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs. 1997. 83–95.
38. Voevodin V.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. Facilitating the process of performance analysis of HPC applications // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. **44**, N 8. 3177–3189. doi [10.1134/S1995080223080589](https://doi.org/10.1134/S1995080223080589).
39. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2005. **91**, N 2. 233–244. doi [10.1016/j.jqsrt.2004.05.058](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.05.058).
40. Flemming J., Benedetti A., Inness A., et al. The CAMS interim reanalysis of carbon monoxide, ozone and aerosol for 2003–2015 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. **17**, N 3. 1945–1983. doi [10.5194/acp-17-1945-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-1945-2017).

41. Sieron S.B., Clothiaux E.E., Zhang F., et al. Comparison of using distribution-specific versus effective radius methods for hydrometeor single-scattering properties for all-sky microwave satellite radiance simulations with different microphysics parameterization schemes // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. **122** N 13. 7027–7046. doi [10.1002/2017JD026494](https://doi.org/10.1002/2017JD026494).
42. Fouquart Y., Bonnel B., Brogniez G., et al. Observations of Saharan aerosols: results of ECLATS field experiment. Part II: broadband radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1987. **26** N 1. 38–52. doi [10.1175/1520-0450\(1987\)026<0038:00SARO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0038:00SARO>2.0.CO;2).
43. Dubovik O., Holben B., Eck T.F., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2002. **59** N 3. 590–608. doi [10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2).
44. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. **79** N 5. 831–844. doi [10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPAAC>2.0.CO;2).
45. Lacis A.A., Mishchenko M.I., Carlson B.E. Parameterization of hygroscopic aerosols in a Climate GCM // *Proceedings of the Twelfth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting*. 2002. St. Petersburg, FL.
46. Hu Y.X., Stammes K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models // *Journal of Climate*. 1993. **6** N 4. 728–742. doi [10.1175/1520-0442\(1993\)006<0728:AAPOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0728:AAPOTR>2.0.CO;2).
47. Key J.R., Schweiger A.J. Tools for atmospheric radiative transfer: streamer and FluxNet // *Computers and Geosciences*. 1998. **24** N 5. 443–451. doi [10.1016/S0098-3004\(97\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00130-1).
48. Poliukhov A.A., Blinov D.V. Aerosol effects on temperature forecast in the COSMO-Ru Model // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. **46**, N 1. 19–27. doi [10.3103/S1068373921010039](https://doi.org/10.3103/S1068373921010039).
49. Poliukhov A., Debolskiy A., Mortikov E. The effects of long-term variability of the aerosol on the convective atmospheric boundary layer in Moscow // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. **1522**. Article Number 012033. doi [10.1088/1755-1315/1522/1/012033](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1522/1/012033).
50. Tornow F., Fridlind A.M., Ackerman A.S., et al. COMBLE-MIP: a model intercomparison to understand LES and SCM uncertainty in marine cold-air outbreaks over the Norwegian Sea // In *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2023. **2023**, Poster No. 2007, Article ID. A51H-2007.

Получена

13 октября 2025 г.

Принята

22 октября 2025 г.

Опубликована

27 ноября 2025 г.

Информация об авторах

Андрей Владимирович Дебольский — науч. сотр.; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.

Евгений Валерьевич Мортиков — к.ф.-м.н., заведующий лабораторией; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1, стр. 4, 119234, Москва, Российская Федерация.

Алексей Андреевич Поляхов — к.г.н., ст. науч. сотр.; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, стр. 1, 119234, Москва, Российская Федерация.

References

1. J. Slater, J. Tonttila, G. McFiggans, et al., “Using a Coupled Large-Eddy Simulation–Aerosol Radiation Model to Investigate Urban Haze: Sensitivity to Aerosol Loading and Meteorological Conditions,” *Atmospheric Chemistry and Physics* **20** (20), 11893–11906 (2020). doi [10.5194/acp-20-11893-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-11893-2020).
2. T. Su, Z. Li, Y. Zheng, et al., “Aerosol-Boundary Layer Interaction Modulated Entrainment Process,” *NPJ Climate and Atmospheric Science* **5** (1), Article Number 64 (2022). doi [10.1038/s41612-022-00283-1](https://doi.org/10.1038/s41612-022-00283-1).



3. E. Barbaro, J. Vilá-Guerau de Arellano, M. C. Krol, and A. A. M. Holtslag, “Impacts of Aerosol Shortwave Radiation Absorption on the Dynamics of an Idealized Convective Atmospheric Boundary Layer,” *Boundary-Layer Meteorology* **148** (1), 31–49 (2013). doi [10.1007/s10546-013-9800-7](https://doi.org/10.1007/s10546-013-9800-7).
4. M. Costa-Surós, O. Sourdeval, C. Acquistapace, et al., “Detection and Attribution of Aerosol–Cloud Interactions in Large-Domain Large-Eddy Simulations with the ICOsahedral Non-Hydrostatic Model,” *Atmospheric Chemistry and Physics* **20** (9), 5657–5678 (2020). doi [10.5194/acp-20-5657-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-5657-2020).
5. M.-L. Lu and J. H. Seinfeld, “Effect of Aerosol Number Concentration on Cloud Droplet Dispersion: A Large-Eddy Simulation Study and Implications for Aerosol Indirect Forcing,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **111** (D02207), 1–16 (2006). doi [10.1029/2005JD006419](https://doi.org/10.1029/2005JD006419).
6. H. Xue and G. Feingold, “Large-Eddy Simulations of Trade Wind Cumuli: Investigation of Aerosol Indirect Effects,” *Journal of the Atmospheric Sciences* **63** (6), 1605–1622 (2006). doi [10.1175/JAS3706.1](https://doi.org/10.1175/JAS3706.1).
7. B. T. Johnson, K. P. Shine, and P. M. Forster, “The Semi-Direct Aerosol Effect: Impact of Absorbing Aerosols on Marine Stratocumulus,” *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **130** (599), 1407–1422 (2004). doi [10.1256/qj.03.61](https://doi.org/10.1256/qj.03.61).
8. R. J. Herbert, N. Bellouin, E. J. Highwood, and A. A. Hill, “Diurnal Cycle of the Semi-Direct Effect From a Persistent Absorbing Aerosol Layer over Marine Stratocumulus in Large-Eddy Simulations,” *Atmospheric Chemistry and Physics* **20** (3), 1317–1340 (2020). doi [10.5194/acp-20-1317-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-1317-2020).
9. K. Ding, X. Huang, A. Ding, et al., “Aerosol–Boundary-Layer–Monsoon Interactions Amplify Semi-Direct Effect of Biomass Smoke on Low Cloud Formation in Southeast Asia,” *Nature communications* **12** (1), Article Number 6416 (2021). doi [10.1038/s41467-021-26728-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26728-4).
10. E. Erfani, P. Blossey, R. Wood, et al., “Simulating Aerosol Lifecycle Impacts on the Subtropical Stratocumulus-to-Cumulus Transition Using Large-Eddy Simulations,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **127** (21), e2022JD037258 (2022). doi [10.1029/2022JD037258](https://doi.org/10.1029/2022JD037258).
11. T. Yamaguchi, G. Feingold, J. Kazil, and A. McComiskey, “Stratocumulus to Cumulus Transition in the Presence of Elevated Smoke Layers,” *Geophysical Research Letters* **42** (23), 10478–10485 (2015). doi [10.1002/2015GL066544](https://doi.org/10.1002/2015GL066544).
12. R. Pincus and B. Stevens, “Monte Carlo Spectral Integration: A Consistent Approximation for Radiative Transfer in Large Eddy Simulations,” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **1** (2), 1–9 (2009). doi [10.3894/JAMES.2009.1.1](https://doi.org/10.3894/JAMES.2009.1.1).
13. P. Krč, J. Resler, M. Sühring, et al., “Radiative Transfer Model 3.0 Integrated into the PALM Model System 6.0,” *Geosci. Model Dev. Discussions* **14** (5), 3095–3120 (2021). doi [10.5194/gmd-14-3095-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021).
14. E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, et al., “Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-k Model for the Longwave,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **102** (D14), 16663–16682 (1997). doi [10.1029/97JD00237](https://doi.org/10.1029/97JD00237).
15. R. J. Hogan and A. Bozzo, “A Flexible and Efficient Radiation Scheme for the ECMWF Model,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **10** (8), 1990–2008 (2018). doi [10.1029/2018MS001364](https://doi.org/10.1029/2018MS001364).
16. C. Lac, J.-P. Chaboureau, V. Masson, et al., “Overview of the Meso-NH Model Version 5.4 and Its Applications,” *Geosci. Model Dev.* **11** (5), 1929–1969 (2018). doi [10.5194/gmd-11-1929-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018).
17. A. Dipankar, B. Stevens, R. Heinze, et al., “Large Eddy Simulation Using the General Circulation Model ICON,” *J. Adv. Model. Earth Syst.* **7** (3), 963–986 (2015). doi [10.1002/2015MS000431](https://doi.org/10.1002/2015MS000431).
18. D. Stokowski and W. R. Cotton, *The Addition of the Direct Radiative Effect of Atmospheric Aerosols into the Regional Atmospheric Modeling System* (Colorado State University, Department of Atmospheric Science, paper No. 764, Fort Collins, Colorado, 2005).
19. J. Y. Harrington, *The Effects of Radiative and Microphysical Processes on Simulated Warm and Transition Season Arctic Stratus* (Colorado State University, Colorado, 1997).
20. N. Brown, M. Weiland, A. Hill, et al., A Highly Scalable Met Office NERC Cloud Model arXiv preprint (2020). doi [10.48550/arXiv.2009.12849](https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.12849).
21. J. M. Edwards and A. Slingo, “Studies with a Flexible New Radiation Code. I: Choosing a Configuration for a Large-Scale Model,” *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **122** (531), 689–719 (1996). doi [10.1002/qj.49712253107](https://doi.org/10.1002/qj.49712253107).
22. J. Tonttila, Z. Maalick, T. Raatikainen, et al., “UCLALES–SALSA v1.0: a Large-Eddy Model with Interactive Sectional Microphysics for Aerosol, Clouds and Precipitation,” *Geoscientific Model Development* **10** (1), 169–188 (2017). doi [10.5194/gmd-10-169-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-169-2017).
23. Q. Fu and K. N. Liou, “Parameterization of the Radiative Properties of Cirrus Clouds,” *Journal of the Atmospheric Sciences* **50** (13), 2008–2025 (2002).
24. T. Heus, C. C. van Heerwaarden, H. J. J. Jonker, et al., “Formulation of the Dutch Atmospheric Large-Eddy Simulation (DALES) and Overview of Its Applications,” *Geosci. Model Dev.* **3** (2), 415–444 (2010). doi [10.5194/gmd-3-415-2010](https://doi.org/10.5194/gmd-3-415-2010).

25. E. V. Tkachenko, A. V. Debolskiy, and E. V. Mortikov, “Intercomparison of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation of Sunset Atmospheric Boundary Layer Turbulence: Computational Aspects,” *Lobachevskii Journal of Mathematics* **42** (7), 1580–1595 (2021). doi [10.1134/S1995080221070234](https://doi.org/10.1134/S1995080221070234).
26. E. Kadantsev, E. Mortikov, and S. Zilitinkevich, “The Resistance Law for Stably Stratified Atmospheric Planetary Boundary Layers,” *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **147** (737), 2233–2243 (2021). doi [10.1002/qj.4019](https://doi.org/10.1002/qj.4019).
27. A. V. Debolskiy, E. V. Mortikov, A. V. Glazunov, and C. Lüpkes, “Evaluation of Surface Layer Stability Functions and Their Extension to First Order Turbulent Closures for Weakly and Strongly Stratified Stable Boundary Layer,” *Boundary-Layer Meteorology* **187**, 73–93 (2023). doi [10.1007/s10546-023-00784-3](https://doi.org/10.1007/s10546-023-00784-3).
28. E. V. Mortikov, E. M. Gashchuk, and A. V. Debolskiy, “GPU-Based Large-Eddy Simulation of Mixed-Phased Clouds,” *Supercomputing Frontiers and Innovations* (2025) in preparation.
29. A. Glazunov, Ü. Rannik, V. Stepanenko, et al., “Large-Eddy Simulation and Stochastic Modeling of Lagrangian Particles for Footprint Determination in the Stable Boundary Layer,” *Geoscientific Model Development* **9** (9), 2925–2949 (2016). doi [10.5194/gmd-9-2925-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-2925-2016).
30. E. V. Mortikov, A. V. Glazunov, and V. N. Lykosov, “Numerical Study of Plane Couette Flow: Turbulence Statistics and the Structure of Pressure-Strain Correlations,” *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling* **34** (2), 119–132 (2019). doi [10.1515/rnam-2019-0010](https://doi.org/10.1515/rnam-2019-0010).
31. E. Bou-Zeid, C. Meneveau, and M. Parlange, “A Scale-Dependent Lagrangian Dynamic Model for Large Eddy Simulation of Complex Turbulent Flows,” *Physics of Fluids* **17** (2), Article number 025105 (2005). doi [10.1063/1.1839152](https://doi.org/10.1063/1.1839152).
32. C. Meneveau, T. S. Lund, and W. H. Cabot, “A Lagrangian Dynamic Subgrid-Scale Model of Turbulence,” *Journal of Fluid Mech.* **319** (1), 353–385 (1996). doi [10.1017/S0022112096007379](https://doi.org/10.1017/S0022112096007379).
33. E. V. Mortikov, “Numerical Simulation of the Motion of an Ice Keel in a Stratified Flow,” *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* **52** (1), 108–115 (2016). doi [10.1134/S0001433816010072](https://doi.org/10.1134/S0001433816010072).
34. Y. Morinishi, T. S. Lund, O. V. Vasilyev, and P. Moin, “Fully Conservative Higher Order Finite Difference Schemes for Incompressible Flow,” *Journal of Computational Physics* **143** (1), 90–124 (1998). doi [10.1006/jcph.1998.5962](https://doi.org/10.1006/jcph.1998.5962).
35. D. L. Brown, R. Cortez, and M. L. Minion, “Accurate Projection Methods for the Incompressible Navier–Stokes Equations,” *Journal of Computational Physics* **168** (2), 464–499 (2001). doi [10.1006/jcph.2001.6715](https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6715).
36. Y. Zang, R. L. Street, and J. R. Koseff, “A Dynamic Mixed Subgrid-Scale Model and Its Application to Turbulent Recirculating Flows,” *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* **5** (12), 3186–3196 (1993). doi [10.1063/1.858675](https://doi.org/10.1063/1.858675).
37. T. S. Lund, “On the Use of Discrete Filters for Large Eddy Simulation,” *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, 83–95 (1997).
38. V. V. Voevodin, A. V. Debolskiy, and E. V. Mortikov, “Facilitating the Process of Performance Analysis of HPC Applications,” *Lobachevskii Journal of Mathematics* **44** (8), 3177–3189 (2023). doi [10.1134/S1995080223080589](https://doi.org/10.1134/S1995080223080589).
39. S. A. Clough, M. W. Shephard, E. J. Mlawer, et al., “Atmospheric Radiative Transfer Modeling: A Summary of the AER Codes,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **91** (2), 233–244 (2005). doi [10.1016/j.jqsrt.2004.05.058](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.05.058).
40. J. Flemming, A. Benedetti, A. Inness, et al., “The CAMS Interim Reanalysis of Carbon Monoxide, Ozone and Aerosol for 2003–2015,” *Atmos. Chem. Phys.* **17** (3), 1945–1983 (2017). doi [10.5194/acp-17-1945-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-1945-2017).
41. S. B. Sieron, E. E. Clothiaux, F. Zhang, et al., “Comparison of Using Distribution-Specific Versus Effective Radius Methods for Hydrometeor Single-Scattering Properties for All-Sky Microwave Satellite Radiance Simulations with Different Microphysics Parameterization Schemes,” *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** (13), 7027–7046 (2017). doi [10.1002/2017JD026494](https://doi.org/10.1002/2017JD026494).
42. Y. Fouquart, B. Bonnel, G. Brogniez, et al., “Observations of Saharan Aerosols: Results of ECLATS Field Experiment. Part II: Broadband Radiative Characteristics of the Aerosols and Vertical Radiative Flux Divergence,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **26** (1), 38–52 (1987). doi [10.1175/1520-0450\(1987\)026<0038:OOSARO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0038:OOSARO>2.0.CO;2).
43. O. Dubovik, B. Holben, T. F. Eck, et al., “Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations,” *Journal of the Atmospheric Sciences* **59** (3), 590–608 (2002). doi [10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2).
44. M. Hess, P. Koepke, and I. Schult, “Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC,” *Bulletin of the American Meteorological Society* **79** (5), 831–844 (1998). doi [10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2).
45. A. A. Lacis, M. I. Mishchenko, and B. E. Carlson, “Parameterization of Hygroscopic Aerosols in a Climate GCM,” *Proceedings of the Twelfth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting 2002. St. Petersburg, FL*.



46. Y. X. Hu and K. Stamnes, “An Accurate Parameterization of the Radiative Properties of Water Clouds Suitable for Use in Climate Models,” *Journal of Climate* **6** (4), 728–742 (1993). doi [10.1175/1520-0442\(1993\)006<0728:AAPOTR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0728:AAPOTR>2.0.CO;2).
47. J. R. Key and A. J. Schweiger, “Tools for Atmospheric Radiative Transfer: Streamer and FluxNet,” *Computers and Geosciences* **24** (5), 443–451 (1998). doi [10.1016/S0098-3004\(97\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00130-1).
48. A. A. Poliukhov and D. V. Blinov, “Aerosol Effects on Temperature Forecast in the COSMO-Ru Model,” *Russian Meteorology and Hydrology* **46** (1), 19–27 (2021). doi [10.3103/S1068373921010039](https://doi.org/10.3103/S1068373921010039).
49. A. Poliukhov, A. Debolskiy, and E. Mortikov, “The Effects of Long-Term Variability of the Aerosol on the Convective Atmospheric Boundary Layer in Moscow,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **1522**, Article Number 012033 (2025). doi [10.1088/1755-1315/1522/1/012033](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1522/1/012033).
50. F. Tornow, A. M. Fridlind, A. S. Ackerman, et al., “COMBLE-MIP: A Model Intercomparison to Understand LES and SCM Uncertainty in Marine Cold-Air Outbreaks over the Norwegian Sea,” In *AGU Fall Meeting Abstracts 2023*, Poster No. 2007, Article ID. A51H-2007 (2023).

Received
October 13, 2025

Accepted
October 22, 2025

Published
November 27, 2025

Information about the authors

Andrey V. Debolskiy – Researcher; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

Evgeny V. Mortikov – Ph.D., Head of Laboratory; Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, 119234, Moscow, Russia.

Aleksei A. Poliukhov – Ph.D., Senior Researcher; Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Leninskie Gory, 1, building 1, 119234, Moscow, Russia.