

Novel Approaches in Observations and Modeling of Geophysical Turbulence



2025

Программа конференции

Современные подходы в измерениях и моделировании геофизической турбулентности II

8 – 10 октября 2025г.
ИВМ РАН



Конференция «Novel approaches in observations and modeling of geophysical turbulence II»

Проводится в гибридном формате ИВМ РАН (Москва, ул. Губкина 8) в конференц-зале (727, 7ой этаж)

Для прохода в здание ИВМ при себе необходимо иметь паспорт!

Для дистанционных участников будет доступна трансляция в Zoom:

Topic: Novel approaches in observations and modeling of geophysical turbulence II

<https://us02web.zoom.us/j/83313343127?pwd=fcmH8QUfx4cPeYe3SEx9JW2sDIGCIN.1>

Meeting ID: 833 1334 3127

Passcode: 328041

Программный комитет:

Глазунов А.В., д.ф.-м.н., ИВМ РАН

Мортиков Е.В., к.ф.-м.н., НИВЦ МГУ

Троицкая Ю.И., д.ф.-м.н., ИПФ РАН

Организационный комитет:

Секретарь – Дебольский А.В., НИВЦ МГУ

Гладских Д.С., к.ф.-м.н., НИВЦ МГУ

Суязова В.И., к.ф.-м.н., НИВЦ МГУ

Конференция посвящена памяти профессора Сергея Сергеевича Зилитинкевича и чл.-корр. Василия Николаевича Лыковского, проводивших подобное мероприятие в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН в 2019 году.

Основная цель конференции - коммуникация и организация коллаборации между группами исследователей, занимающихся численным моделированием, натурными измерениями и теоретическими аспектами турбулентных течений в атмосфере и океане.

Конференция поддержана Московским центром фундаментальной и прикладной математики в ИВМ РАН (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2025-347)

В рамках конференции будут проходить занятия по численному моделированию для студентов и аспирантов, где им будет предоставлена возможность провести расчеты турбулентных течений при помощи LES модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, а также визуализировать и проанализировать результаты этих расчетов. Практические занятия пройдут 8го октября (среда) с 14:30 до 18:00 в ИВМ РАН, для прохода в ИВМ также понадобится паспорт.

По любым вопросам, касающимся организации конференции,

обращайтесь к секретарю А.В. Дебольскому

e-mail: and.debol@rcc.msu.ru

тел. +79060367065

Расписание конференции

8ое октября			
14:30	А.В. Дебольский Р.А. Ахтамьянов Д.С. Гладских	НИВЦ	Практические занятия
9ое октября			
11:00	Е.В. Мортиков	НИВЦ	Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования городской среды
11:30	Jinxi Li	IAP CAS	AI-Driven Optimisation of an Adaptive Mesh Framework in the Fluidity–Atmosphere Model
12:00	А.В. Глазунов	ИВМ	Вихреразрешающее моделирование турбулентности в идеализированной среде городского типа как метод разработки подходов к построению RANS-моделей городского слоя.
12:30 – 13:00 кофе брейк			
13:00	А.Е. Тельминов	ИМКЭС	Региональная система мониторинга энергообмена городского ландшафта с атмосферой г. Томск
13:20	В.И. Суязова	НИВЦ	Изучение характеристик приземного слоя при наличии переноса взвешенных снежных частиц
13:40	Д.Г. Чечин	ИФА	Влияние разводий на структуру АПС над морским льдом
14:00	В.П. Юшков	Физ.ф-т МГУ	Акустика и турбулентность
14:20 – 14:50 кофе брейк			
14:50	Ю.И. Троицкая	ИПФ	«Микрофизика» взаимодействия атмосферы и океана при штормовом ветре: лабораторное моделирование и адаптация к натурным условиям
15:20	Е.А. Малиновская	ИФА	Конвективные и электростатические структуры при выносе пылевого аэрозоля
15:40	П.И. Константинов	Геогр.ф-т МГУ	Современные натурные исследования городского микроклимата высоких широт для пользы развития модельных технологий
16:00	Е.Н. Шишков	НИВЦ	Применение нейронных сетей для улучшения параметризации турбулентного обмена в приземном слое атмосферы
16:20	А.И. Варенцов	НИВЦ	Перенос и осаждение аэрозолей различного происхождения в городском пограничном слое по результатам численного гидродинамического моделирования

10ое октября			
11:00	Igor Ezau		Top-down mechanism of air-sea turbulent coupling: Analysis with large-eddy simulations
11:30	И.А. Репина	ИФА	Современные методы экспериментальных исследований атмосферной турбулентности
12:00	О.А. Дружинин	ИПФ	Математическое моделирование пограничных слоев атмосферы и гидросферы с учётом комплексной реологии.
12:30 – 13:00 кофе брейк			
13:00	Д.С. Гладских	НИВЦ	О параметризации диссипативных процессов в моделях турбулентности для описания переноса биохимических примесей во внутреннем водоеме
13:20	М.А. Струнин	МФТИ	Методы определения характеристик атмосферной турбулентности и турбулентного обмена по данным стандартного радиозондирования
13:40	А.В. Дебольский	НИВЦ	Исследование вычислительной эффективности и адаптация блока радиационного переноса в вихреразрешающей модели атмосферного пограничного слоя
14:00 – 14:30 кофе брейк			
14:30	М.И. Варенцов	НИВЦ	Мониторинг турбулентного энергообмена урбанизированных ландшафтов с атмосферой в контексте развития городских параметризаций для моделей погоды и климата
15:00	Р.А. Ахтамьянов	НИВЦ	Развитие модели вертикального турбулентного перемешивания и её интеграция в климатическую модель ИВМ РАН
15:20	И.А. Емекеев	МФТИ	Моделирование вертикальных профилей коэффициента структурной функции
15:40	А.М. Ярославцев	РУДН	Современные методы мониторинга и моделирования потоков и запасов углерода антропогенно измененных экосистем
16:00	В.И. Васенев	РУДН	Моделирование и оценка экосистемных функций городской зеленой инфраструктуры: опыт междисциплинарного взаимодействия
16:20	Dmitrii Mironov	DWD	Strongly Stable Couette Flows over Thermally Heterogeneous Surfaces: Effect of Orientation of Heterogeneity Patterns

Top-down mechanism of air-sea turbulent coupling: Analysis with large-eddy simulations

Igor Esau

Observational studies of air-sea turbulent exchange in the marine atmospheric boundary layer reveal a significant role of large (coherent) turbulent eddies in generation of turbulent surface stress. Such large eddies always exist in the atmospheric boundary layer. They may descend from the turbulent boundary layer core, imprint on the sea surface, and generate splats of surface roughness. This mechanism was referred as "top-down" turbulent coupling by J.C.R. Hunt who developed its theory and distinct it from the bottom-up mechanism of the turbulent stress generation demonstrated in low-Re boundary layers. Numerous indirect evidence of the top-down mechanism at work have been reported over the last 25 years. There were however surprisingly few studies that referred to this mechanism in the large-eddy simulation studies where it could be investigated in greater details. We capitalize on the recent advances of the PALM large-eddy simulation modeling system (internal nesting, dynamic subgrid closure, better numerical schemes, and output sampling) to investigate details of the turbulent stress generation in the eddy surface layer.

I do not include in this abstract any concrete results as we are checking them now with higher resolution runs. The plan is to present evidence that the surface stress patterns are related to the descending large eddies and thus controlled from the ABL not by the surface streaks as in the low-Re flows. Then we will present the key statistics that distinct the bottom-up and top-down mechanisms. The earlier work in this direction is:

Zilitinkevich, S. S., Hunt, J. C. R., Esau, I. N., Grachev, A. A., Lalas, D. P., Akylas, E., Tombrou, M., Fairall, C. W., Fernando, H. J. S., Baklanov, A. A., & Joffe, S. M. (2006). The influence of large convective eddies on the surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(618), 1423-1456. <https://doi.org/10.1256/qj.05.79>

Zilitinkevich, S., Gryanik, V. M., Lykossov, V. N., & Mironov, D. V. (1999). Third-Order Transport and Nonlocal Turbulence Closures for Convective Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(19), 3463-3477. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<3463:TOTANT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<3463:TOTANT>2.0.CO;2)

AI-Driven Optimisation of an Adaptive Mesh Framework in the Fluidity–Atmosphere Model

Li Jinxi

International Center for Climate and Environment Sciences
Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS)

High-resolution numerical weather prediction faces the dual challenge of high computational cost and the need to represent multi-scale processes. Dynamically adaptive meshes provide a promising approach—increasing resolution in regions of interest while improving computational efficiency. However, their widespread use has been limited by the high computational overhead of 3D mesh generation and frequent remeshing. To address these limitations, this study develops an AI-driven adaptive mesh framework within the Fluidity–Atmosphere (FA) model. An LSTM-based model for predicting the Riemann metric tensor effectively replaces original mesh regulation in FA model, achieving accurate metric prediction and reducing the number of mesh elements by 40%–50% in 3D simulations, while preserving fine-scale features such as fluid interfaces and vortical structures. Additionally, a hybrid CNN–ANN model (HyMeshAI) enables end-to-end prediction of both mesh density and nodal

positions, showing strong agreement with FA benchmarks and improving mesh quality by 30%-40%. In a case study of mountain wave simulation over the northeastern Tibetan Plateau, the AI-driven mesh refinement effectively eliminates numerical noise near steep topography, reduces the total number of nodes, improves computational efficiency by approximately 20%, and accurately captures wave evolution consistent with theoretical predictions. This work establishes an efficient and high-fidelity framework for adaptive mesh atmospheric modelling, offering a powerful tool for the next generation of numerical weather prediction systems.

Strongly Stable Couette Flows over Thermally Heterogeneous Surfaces: Effect of Orientation of Heterogeneity Patterns

Dmitrii Mironov¹ and Peter Sullivan²

1 German Weather Service, Offenbach am Main, Germany

2 National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

Results from direct numerical simulations (DNS) of stably stratified plane Couette flows over thermally heterogeneous surfaces are presented. A plane Couette flow configuration at bulk Reynolds number of 10^4 and bulk Richardson number of 0.25 is used as a proxy for real-world stably stratified boundary layers. The focus of the present study is on the effect of orientation of the surface heterogeneity patterns on the boundary-layer structure and the efficiency of heat and momentum transfer. In our Couette flow configuration, the temperature of the upper and lower walls is either homogeneous or varies sinusoidally, where the temperature-wave crests are either normal or parallel to the mean flow (HETx and HETy cases, respectively). The horizontal-mean surface temperature is the same all simulations.

The stratification is strong enough to extinguish turbulence over a homogeneous surface, but turbulence survives over heterogeneous surfaces. In all HET cases, both molecular diffusion and turbulence transfer momentum down the gradient of mean velocity. The total (turbulent plus diffusive) heat flux is down-gradient, but quasi-organized boundary-layer scale eddy motions generated by the surface thermal heterogeneity induce heat transfer up the gradient of the mean temperature. This suggests an analogy to convective boundary layers driven by the surface buoyancy flux, where counter-gradient heat transport is often encountered. It is attributed to quasi-organized structures, e.g., convective plumes and rolls, whose spatial scales are larger than the spatial scales of chaotic, nearly isotropic turbulence.

Comparison of HETx and HETy cases shows that the configuration with the spanwise heterogeneity is more efficient in transporting momentum and heat vertically than its counterpart with the streamwise heterogeneity. Vertical profiles of mean fields and turbulence moments are considerably different in the HETx and HETy cases. For example, the streamwise heat flux differs not only in magnitude but also in sign. Analysis of the second-order turbulence moments, the vertical-velocity skewness, the temperature skewness, and the flow eddy structure suggests a physically plausible explanation of the observed differences between the HETx and HETy cases.

The implications of our DNS results for modelling turbulence within the Reynolds-Averaged Navier-Stokes framework are discussed. A physically sound turbulence closure model (parameterization scheme) that accounts for the effect of the surface thermal heterogeneity, including the orientation of the heterogeneity patterns, is still to be developed. Results from the present study emphasize several important aspects that should be considered to accomplish this objective.

Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2016: Second-moment budgets and mixing intensity in the stably stratified atmospheric boundary layer over thermally heterogeneous surfaces. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 449-464. doi: 10.1175/JAS-D-15-0075.1

Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2023: Turbulence structure and mixing in strongly stable boundary-layer flows over thermally heterogeneous surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, **187**, 371-393. doi: 10.1007/s10546-022-00766-x

Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2024: Turbulence structure and mixing in strongly stable Couette flows over thermally heterogeneous surfaces: effect of heterogeneity orientation. *Flow Turbul. Combust.*, **114**, 967-994. doi: <https://doi.org/10.1007/s10494-024-00593-9>

Развитие модели вертикального турбулентного перемешивания и её интеграция в климатическую модель ИВМ РАН

Ахтамьянов Р. А.^{1,3,4,6}, Гладских Д. С.^{1,2,3,4}, Мортиков Е. В.^{1,3,4,5}

1 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

2 Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

3 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

4 Московский центр фундаментальной и прикладной математики

5 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

6 Гидрометцентр России

Турбулентное перемешивание в верхнем слое океана вносит значительный вклад в обмен импульсом и теплом между океаном и атмосферой и существенно влияет на формирование климатических полей. В работе представлена модифицированная одномерная модель вертикального перемешивания, предназначенная для расчёта коэффициентов турбулентного обмена в океаническом пограничном слое. Модель реализует различные подходы к заданию зависимости коэффициентов диффузии и вязкости от стратификации и сдвига, включая модифицированную схему Пакановского–Филандера. Разработанная модель интегрирована в климатическую модель ИВМ РАН, что обеспечивает возможность выбора схем перемешивания и анализа их влияния на стратификацию и динамику верхнего слоя океана. Проведены оффлайн- и онлайн-эксперименты, подтверждающие корректность работы блока и демонстрирующие чувствительность вертикальной стратификации к используемой параметризации.

Перенос и осаждение аэрозолей различного происхождения в городском пограничном слое по результатам численного гидродинамического моделирования

Варенцов А. И., Степаненко В. М., Мортиков Е. В.

Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

По мере роста городов увеличивается потребность в точном мониторинге и прогнозировании качества городского воздуха, а для этого требуется понимание влияния застройки на распределение аэрозолей.

В данном исследовании используется современный подход, который сочетает в себе микромасштабное вихреразрешающее моделирование с классификацией локальных климатических зон (ЛКЗ) для моделирования переноса аэрозольных частиц в различных типах городской застройки. Для оценки влияния геометрии зданий на перенос частиц были изучены как регулярные, так и рандомизированные конфигурации застройки.

Исследование показало, что влияние параметров застройки на перенос частиц на масштабе отдельных зданий и на масштабе района может очень сильно меняться в зависимости от типа застройки (регулярная или рандомизированная).

Также продемонстрировано значительное влияние осаждения частиц на стенах зданий на их концентрацию и скорость уменьшения концентрации по мере удаления от

источника. Показана важность учёта осаждения частиц на стенах в задачах моделирования городского качества воздуха.

Работа поддержана грантом РНФ 25-77-20011.

Мониторинг турбулентного энергообмена урбанизированных ландшафтов с атмосферой в контексте развития городских параметризаций для моделей погоды и климата

*Варенцов М. И.^{1,2}, Тарасова М.А.^{1,2}, Ретина И.А.^{2,1},
Степаненко В.М.^{2,1}, Тельминов А.Е.³, Джоу Л.⁴*

1 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1 стр. 4, Москва, Россия, 119234;

2 Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. д. 3, Москва, Россия, 119017.

3 Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, 10/3, Томск, Россия, 634055

4 Институт физики атмосферы Китайской академии наук, Пекин, КНР

Для учета влияния городов на атмосферные процессы в моделях прогноза погоды и климата используются так называемые городские параметризации. К настоящему времени разработано большое количество таких параметризаций разного уровня сложности, многие из которых имплементированы в региональные, реже в глобальные модели атмосферы. В то же время, актуальными вопросами развития таких параметризаций является их калибровка, расширение набора описываемых в них процессов, а также совершенствование и актуализация их отдельных блоков. Последнее особенно актуально для используемых подходов к описанию турбулентного энергообмена в сложной городской среде, часто опирающиеся на устаревшие полуэмпирические зависимости.

Для верификации и калибровки городских параметризаций наиболее ценными являются наблюдения за характеристиками энергообмена атмосферы с поверхностью - потоками тепла, влаги и импульса - величинами, которые параметризации должны рассчитывать и передавать в модель атмосферы. Такие наблюдения выполняются на мачтах выше уровня крыш, и являются крайне редкими. Так, в последнем крупном международном проекте по сравнению городских параметризаций Urban Plumber удалось собрать набор данных только для 20 городских мачт, в котором никак не представлена континентальная часть Северной Евразии, включая территории России и Китая.

В докладе представлен краткий обзор городских параметризаций и актуальных проблем их развития, а также первые результаты работы по сбору, систематизации и анализу немногочисленных наблюдений за турбулентным энергообменом городских ландшафтов с атмосферой в Северной Евразии. Используются данные микрометеорологической мачты в метеообсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова в Москве, сети пульсационных измерений Tomskfluxnet в городе Томск и его окрестностях, а также метеорологических мачт ИФА КНР в городе Пекин и его пригороде Сянхе. Уникальность данных для Томска и Пекина заключается в возможности сравнения характеристик взаимодействия атмосферы с поверхностью для городских и фоновых условий. Показаны существенные (на десятки процентов) различия потоков тепла и импульса между городскими и фоновыми точками. На примере популярной городской параметризации ТЕВ (Town Energy Balance) получен первый опыт сопоставления данных наблюдений и результатов моделирований.

Моделирование и оценка экосистемных функций городской зеленой инфраструктуры: опыт междисциплинарного взаимодействия

Васенев В.И.

Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов

Устойчивое развитие городской среды в значительной степени определяется функциональным озеленением. Современные подходы к городскому озеленению основаны на оценке и прогнозировании экосистемных функций зеленых насаждений на уровне города (для задач мастер-планирования) и на уровне объекта (для оценки эффективности проектов). Оценка экосистемных функций требует междисциплинарного подхода, объединяющего эколого-экономические подходы и инструменты процессного математического моделирования. Доклад обобщает результаты моделирования экосистемных функций зеленых насаждений г. Москвы на основе опыта взаимодействия с городскими службами и проектными организациями, обозначает методические и организационные ограничения и перспективы развития.

О параметризации диссипативных процессов в моделях турбулентности для описания переноса биохимических примесей во внутреннем водоеме

Гладских Д.С.^{1,2,3,4}, Мортиков Е.В.^{1,3,4,5}

- 1 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ,
- 2 Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
- 3 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
- 4 Московский центр фундаментальной и прикладной математики
- 5 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

В работе обсуждаются параметризации процессов турбулентного перемешивания в моделях внутренних водоемов (озер и водохранилищ), допускающие возможность поддержания турбулентных пульсаций при сильно устойчивой стратификации и наличии малых сдвигов скорости. Предложена параметризация турбулентного числа Прандтля [1], которая учитывает неградиентную поправку на поток массы и зависит от двух параметров – параметра анизотропии, описывающего различия в вертикальном и горизонтальном масштабах корреляции поля плотности, и максимального потокового числа Ричардсона. Предложенная параметризация включена в полную трехмерную модель термогидродинамики, биогеохимии и ледового режима внутреннего водоема [2], созданную на основе единого гидродинамического кода НИВЦ МГУ, объединяющего DNS, LES, RANS подходы для описания турбулентных течений в высоком пространственном и временном разрешении [3–4]. В рамках численных экспериментов по воспроизведению термического и биохимического режима внутренних водоемов (на примере оз. Куйвоярви и Рыбинского водохранилища) показано, что значение максимального потокового числа Ричардсона и, как следствие, асимптотика увеличения турбулентного числа Прандтля при сильной устойчивости связаны с различиями в интегральных масштабах времени, определяемых скоростью диссипации кинетической или потенциальной энергии и интенсивностями флуктуаций соответствующих полей, что согласуется с данными прямого численного моделирования сдвиговой турбулентности. Параметр анизотропии задает переходный режим – от нейтральной стратификации к сильной устойчивости. Результаты показывают, что распределение биохимических концентраций и процессы газообмена в большей степени чувствительны к заданию максимального потокового числа Ричардсона.

1. Гладских Д. С., Мортиков Е. В. О параметризации диссипативных процессов в моделях турбулентного переноса для описания термогидродинамики и биогеохимии стратифицированных внутренних водоемов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2024. – Т. 60. – №. 3.
2. Gladskikh D. S. et al. Study of Temperature Regime and Horizontal Heterogeneity in the Rybinsk Reservoir During the Open Water Period Using Three-Dimensional Mathematical Modeling // Water. – 2025. – Т. 17. – №. 11. – С. 1573.
3. 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. – Т. 34. – №. 2. – С. 119-132.
4. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2021. – Т. 147. – №. 737. – С. 2233-2243.

Вихреразрешающее моделирование турбулентности в идеализированной среде городского типа как метод разработки подходов к построению RANS-моделей городского слоя

Глазунов А.В.^{1,2}, Мортиков Е.В.^{2,1,3}, Дебольский А.В.^{2,3}

1 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

2 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ,

3 Московский центр фундаментальной и прикладной математики

Представлены результаты LES-расчетов турбулентных течений в среде городского типа. Рассматриваются идеализированные поверхности, состоящие из объектов простой формы, имитирующих здания. Исследуется влияние стратификации и растительности на статистические характеристики течений с точки зрения последующей параметризации обнаруженных эффектов в многослойных моделях городского слоя. Для устойчиво-стратифицированного пограничного слоя атмосферы над городом обнаружен эффект уменьшения термической шероховатости поверхности. Продемонстрировано влияние морфологии городского слоя и характеристик слоя растительности на турбулентные масштабы длины и показана связь этих масштабов со спектрами турбулентности. Предложен простой подход к параметризации сопротивления формы, основанный на методах теории подобия.

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

Дебольский А.В.^{2,5}, Полюхов А.А.^{3,1,5}, Мортиков Е.В.^{1,4,5}

1 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова

2 Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

3 Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

4 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

5 Московский центр фундаментальной и прикладной математики

В работе рассматриваются результаты подключения блока радиационного переноса RRTMG в вихреразрешающую модель Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. Ломоносова (НИВЦ МГУ). Для апробации подключенного блока радиационного переноса, были проведены исследования по анализу влияния турбулентного переноса аэрозольных частиц на суточную динамику атмосферного пограничного слоя в безоблачных условиях и в экспериментах по моделированию холодных вторжений в Арктике. Исследована чувствительность

результатов моделирования к частоте "синхронизации" радиационного блока с блоком динамики, которые показали что результаты моделирования находятся в пределах разброса ансамбля для времен синхронизации много меньших чем характерные турбулентные времена. Данный результат вместе с анализом масштабируемости совместной системы моделирования показывает, что совместная модель может быть вычислительно эффективной в задачах анализа прямых и не прямых эффектов аэрозолей, а также при моделировании облачного отклика.

Исследования авторов поддержаны Московским центром фундаментальной и прикладной математики МГУ имени М. В. Ломоносова по соглашению № 075-15-2025-345, а также грантом РФФИ № 25-77-20011 по теме «Новые вычислительные технологии многомасштабного прогнозирования и мониторинга состояния городской среды».

Математическое моделирование пограничных слоев атмосферы и гидросферы с учётом комплексной реологии.

О.А. Дружинин

Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950

E-mail: druzhinin@ipfran.ru

Проводится численное моделирование мелкомасштабных процессов обмена, происходящих вблизи границы раздела воздушной и водной сред с учётом поверхностных волн и присутствия капель брызг в воздухе и воздушных пузырьков в воде. Используется математическая модель, где поверхностная волна считается заданной, и уравнения для полей несущих сред решаются в эйлеровой формулировке одновременно с интегрированием уравнений лагранжевой динамики частиц.

Обсуждается влияние различных параметров сред и поверхностных волн на потоки импульса, тепла и массы от капель к воздуху и потоки концентрации пузырьков и их параметризации для использования в прогностических моделях.

Моделирование вертикальных профилей коэффициента структурной функции флюктуаций показателя преломления воздуха в атмосфере по самолётным данным

Емеев И.А.¹, Струнин А.М.², Струнин М.А.¹

1 Московский физико-технический институт (национальный университет)

2 Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета

Сведения о вертикальных распределениях коэффициента структурной функции флюктуаций показателя преломления (оптической плотности) воздуха C_n , характеризующего влияние атмосферной турбулентности на прохождение светового излучения, необходимы для обеспечения высококачественных наблюдений за состоянием поверхности земли с космических аппаратов и астрономических наблюдений.

Полученные в настоящей работе результаты основаны на данных семи летних экспериментов, выполненных с помощью самолёта-лаборатории Як-42Д «Росгидромет». Во время самолётных наблюдений проводились измерения пульсаций трёх компонентов скорости ветра и температуры воздуха. Излагаются методы расчёта спектральных характеристик атмосферной турбулентности (с помощью вейвлет-преобразования Морле) и структурных функций пульсаций температуры воздуха по самолётным данным, приводятся оценки качества расчётов. Проанализированы различные методы расчёта коэффициента структурной функции пульсаций температуры C_t и показана возможность его определения для масштабов флюктуаций вплоть до 0,1

м. Предложены и проанализированы различные способы расчёта коэффициента C_n по структурной функции пульсаций температуры воздуха.

Приводятся результаты моделирования вертикальных профилей коэффициентов C_n . Обнаружена высокая корреляция дисперсий пульсаций температуры для диапазона масштабов 9 - 350 м с коэффициентом структурных функций для флуктуаций показателя преломления воздуха. В качестве параметров для моделирования вертикальных профилей коэффициента C_n предложено использовать локальные значения температуры трения и конвективной температуры. Важно, что эти параметры могли быть рассчитаны по результатам независимых измерений. Приведено сопоставление предлагаемой модели с известными профилями коэффициентов структурных функций C_n в атмосфере.

Современные натурные исследования городского микроклимата высоких широт для пользы развития модельных технологий

Константинов П.И.^{1,2}

1 МГУ имени М.В.Ломоносова

2 Shenzhen MSU-BIT University

На рубеже XX и XXI в переживающей буквально второе рождение городской метеорологии были получены принципиально новые результаты, демонстрирующие важность изучения населенных территорий в высоких широтах. Причиной этого являются как достигающее в Арктике с одной стороны необычайной интенсивности хорошо известное явление «городского острова тепла», так и чрезвычайно мощные термические инверсии в приземном слое атмосферы, определяющие качество воздуха. Полученные в конце 2010-х результаты вихреразрешающего моделирования предварительно позволили разделить вклад антропогенного потока тепла и циркуляционного фактора в формирование термических аномалий в городах Арктики. В настоящем сообщении освещаются предварительные результаты полевой кампании, впервые охватившей «необитаемый город» в республике Коми – поселок Комсомольский Воркутинского кольца (Рис.1) и их обсуждение. Также ставится дискуссионный вопрос о пользе расширения подобных кампаний для повышения точности LES-моделей для городских ландшафтов.



Рис. 1. Поселок Комсомольский (республика Коми).

Конвективные и электростатические структуры при выносе пылевого аэрозоля

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

При ветропесчаном переносе движущиеся в потоке частицы электризуются в результате взаимных соударений. Это влияет на величину электрического поля [1, 2]. Основным фактором, определяющим перенос пылевого аэрозоля ($\sim 0,1\text{--}5$ мкм) с аридных территорий и изменение величины электрического поля, является ветер [3, 4]. При превышении пороговой скорости ветра происходят скачкообразные перемещения крупных частиц ($\sim 70\text{--}150$ мкм) вблизи поверхности (сальтации). Летом, в условиях значительного нагрева поверхности, существенное влияние оказывают конвективные движения [5].

Измерения температуры и скорости ветра (1000 Гц), напряжённости электрического поля (100 Гц) и концентрации пылевого аэрозоля (10 Гц) в аридных условиях (2022–2024 гг.) позволяют выявить постоянно возникающие здесь когерентные структуры [5]. Наблюдается синхронизация колебаний концентрации аэрозоля, температуры и напряжённости электрического поля. Корреляции для их усреднённых значений также устойчиво наблюдаются.

Для спектров температуры, скорости, концентрации и напряжённости электрического поля, помимо известного наклона $-5/3$, наблюдаются наклоны -1 , -3 и $-1/3$, связанные с конвективными процессами и структурами.

С учётом значений скоростей ветра на высоте измерений определены следующие характерные масштабы в точках перегиба спектров: для пульсаций скорости – 0,2 м (масштаб времени 0,03 с), для концентрации пылевого аэрозоля – 0,7 м (масштаб времени 0,1 с), для температуры – 2,7 м (масштаб времени 0,46 с), для напряжённости электрического поля – 5,3 м (масштаб времени 0,9 с).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-00346).

1. Kok J.F., Lacks D.J. Physical Review E, 2009. V. 79. №5. P. 051304.
2. Zhang, H., Bo, T. L., & Zheng, X. Earth and Planetary Science Letters, 2017. 461, 141-150.
3. Malinovskaya E. A. et al. Doklady Earth Sciences, 2022. 502(1). 59-67.
4. Shao Y. et al. Aeolian Research, 2015. V. 19. P. 37-54.
5. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. Doklady Earth Sciences, 2024, 516(1), 888-895.

Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования городской среды

Мортиков Е.В.^{1,2}, Глазунов А.В.^{2,1}, Дебольский А.В.^{1,3}, Гладских Д.С.^{1,4}, Вареницов А.И.¹, Пашкин А.Д.³

1 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова

2 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

3 Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

4 Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

В докладе рассматривается создание вычислительной технологии для численного моделирования турбулентности и переноса примесей в атмосфере, допускающей последовательную регионализацию с измельчением пространственных сеток. Данный подход представляется необходимым для изучения влияния неоднородности подстилающей поверхности и, в частности, городской среды на процессы обмена с

возможностью детализации до масштаба отдельных улиц и зданий. Вычислительная технология разрабатывается на основе унифицированного комплекса численных моделей, развиваемого в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, для расчета турбулентных течений в пограничных слоях атмосферы и океана и объединяющего три подхода: прямое численное моделирование (DNS, Direct Numerical Simulation), вихреразрешающее моделирование (Large-Eddy Simulation) и численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Обсуждаются основные требования к численным моделям и подсеточным замыканиям, а также представлены результаты моделирования атмосферного пограничного слоя при наличии неоднородной подстилающей поверхности с помощью разрабатываемой вычислительной технологии.

Исследования авторов поддержаны Московским центром фундаментальной и прикладной математики МГУ имени М. В. Ломоносова по соглашению № 075-15-2025-345, а также грантом РФФИ № 25-77-20011 по теме «Новые вычислительные технологии многомасштабного прогнозирования и мониторинга состояния городской среды».

Современные методы экспериментальных исследований атмосферной турбулентности

Репина И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

В докладе представляются методы и инструменты для измерения характеристик атмосферной турбулентности и турбулентного переноса в системе поверхность-атмосфера. Метод турбулентных пульсаций или вихревой ковариации остается эталонным и наиболее прямым способом измерения турбулентных потоков импульса, тепла и парниковых газов в приземном слое атмосферы. Его физическая основа — это теория переноса Рейнольдса, где турбулентный поток величины рассчитывается как ковариация между пульсациями вертикальной скорости ветра и пульсациями интересующей скалярной величины. Но современные исследования атмосферной турбулентности отошли от традиционных точечных измерений метеомачтами к комплексному использованию дистанционных методов и высокоточной аппаратуры. Эти подходы в совокупности позволяют изучать турбулентность в широком диапазоне масштабов, от мелких вихрей до крупных конвективных структур. Приводятся примеры экспериментальных кампаний. Особое внимание уделяется измерениям в полярных условиях и над неоднородной поверхностью.

Методы определения характеристик атмосферной турбулентности и турбулентного обмена по данным стандартного радиозондирования

Струнин М.А.

Московский физико-технический институт

Данные стандартного радиозондирования помимо средних величин скорости ветра и температуры воздуха содержат также и информацию об интенсивности турбулентности и турбулентного обмена в атмосфере. Однако передаточная функция радиозонда по отношению к турбулентным пульсациям скорости ветра неизвестна и вряд ли может быть достоверно определена.

В работе рассмотрены два метода расчётов характеристик турбулентности по данным стандартных радиозондовых измерений. Первый подход был основан на расчёте дисперсий пульсаций по вертикальным профилям компонентов скорости ветра, которые рассматриваются как реализации случайных процессов. Второй метод базировался на

известных соотношениях между вертикальными градиентами скорости ветра, энергией и масштабами турбулентности.

Валидация методов была выполнена по данным самолётных наблюдений, выполнявшимися синхронно с радиозондовыми измерениями. Показано хорошее совпадение вертикальных профилей энергии и коэффициентов турбулентности, рассчитанных по самолётным данным для горизонтальных участков полёта, по вертикальным самолётным зондировкам и по радиозондовым данным. Разработан способ определения энергии турбулентности для выбранного диапазона масштабов пульсаций, что дало возможность оценивать спектральные плотности пульсаций скорости ветра по данным радиозондирования. Предлагаемые методы дают возможность получать вертикальные профили турбулентной энергии и коэффициента турбулентности для высот от 150 м до 30 км.

Важным преимуществом предлагаемых методов является возможность получения данных о турбулентности в атмосфере без выполнения специальных измерений. Кроме того, методы обеспечивают выполнение исследований структуры турбулентности на высотах в атмосфере в любой точке стандартного радиозондирования.

Изучение характеристик приземного слоя при наличии переноса взвешенных снежных частиц

Суязова В.И.^{1,3,4}, Дебольский А.В.^{1,3,4}, Мортиков Е.В.^{1,2,3,4}, Медведев А.И.¹

1 Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

2 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

3 Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

4 Московский центр фундаментальной и прикладной математики

В полярных регионах и других заснеженных областях перенос снега является частым явлением. Взвешенные частицы снега изменяют структуру приземного слоя, усиливая его устойчивость. Данный «снежный» эффект не описывается в рамках классической теории подобия Мони́на-Обухова. Ранее авторами предложена параметризация приземного слоя, в которой влияние снега учитывается путем переопределения масштаба длины Обухова (Suiazova et al., 2024). Данная параметризация успешно внедрена в новые блоки приземного слоя моделей Земной системы INMCM (Володин и др., 2020) и модели деятельного слоя суши TerM (Stepanenko et al., 2024) а также в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ (Suiazova et al., 2024). Численные эксперименты с вихреразрешающей моделью подтверждают увеличение устойчивости приземного слоя, что выражается в уменьшении потока импульса, увеличении скорости ветра и снижению высоты пограничного слоя атмосферы.

Влияние снежных частиц (в рамках модуля приземного слоя) включено в функции устойчивости Бусингера-Дайера (Businger et al., 1971) и SHEBA (Gryanik et al., 2023) для устойчивой стратификации. По результатам экспериментов с моделью Земной системы INMCM можно заключить, что учет влияния снежных частиц оказывает влияние в планетарном масштабе, основной отклик выражается в увеличении скорости ветра и уменьшении высоты пограничного слоя. Функции устойчивости Бусингера-Дайера приводят к более выраженному увеличению скорости ветра по сравнению с функциями SHEBA.

В работе рассматривается также влияние учета снежных частиц на расчет параметров снегозапаса с использованием модели TerM. Новые «снежные» функции

позволяют уменьшить испарение и, таким образом, уменьшить ошибку в величине снеготопяемости. Таким образом, в работе проведено комплексное исследование изменений характеристик приземного слоя при наличии переноса взвешенных снежных частиц включающее идеализированные постановки экспериментов с вихреразрешающей моделью, климатическое моделирование и моделирование гидрологических характеристик с использованием модели деятельного слоя.

Региональная система мониторинга энергообмена городского ландшафта с атмосферой г. Томск

Тельминов А.Е.^{1,2}, Кобзев А.А.^{1,2}, Капустин С.Н.¹

1 Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

2 Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.

Ломоносова

Доклад посвящён разработке и внедрению специализированного измерительного комплекса для метеорологического мониторинга состояния городской среды, развёрнутого на базе Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН в Томске. Основу комплекса составляют ультразвуковые акустические термоанемометры, которые позволяют проводить высокочастотные измерения трёх компонент скорости ветра, акустической температуры, скорости звука, а также атмосферного давления и влажности воздуха.

Ключевой особенностью комплекса является его способность работать в режиме реального времени, автоматически вычисляя и усредняя метеорологические параметры, а также сохраняя данные для последующего анализа.

Комплекс интегрирован в измерительную сеть TomskFluxNet и предоставляет данные через веб-интерфейс. Это создаёт прототип микромасштабной системы для регистрации пространственно-временной изменчивости атмосферных параметров в условиях городской застройки. Кроме того, для удобства исследователей реализован методологический подход на языке Python («песочница»), позволяющий экспериментировать с данными, тестировать гипотезы и проводить параметризацию или верификацию городских моделей. Представленный комплекс открывает возможности для расширения измеряемых величин, включая солнечную радиацию, осадки и концентрацию взвешенных частиц.

«Микрофизика» взаимодействия атмосферы и океана при штормовом ветре: лабораторное моделирование и адаптация к натурным условиям

Троицкая Ю.И.

Институт прикладной физики РАН

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в прогнозировании траекторий штормов, в то время как прогноз интенсивности по-прежнему проблематичен особенно для наиболее интенсивных быстро развивающихся штормов, где максимальная скорость ветра часто занижается более чем вдвое. Это связано с тем, что интенсивность урагана определяется многими факторами, в том числе взаимодействием атмосферы и океана, которое при очень сильном ветре плохо изучено особенно на мелких масштабах. В настоящем сообщении представлен прогресс, достигнутый в понимании и описании «микромасштабных» процессов в пограничных слоях океана и атмосферы, брызг, пены и обрушения волн (их физических свойств, адаптации лабораторных данных к натурным условиям, обусловленных ими потоках из океана в атмосферу, влиянии на развитие океанских штормов) и связанные с этим проблемы и вопросы.

Влияние разводий на структуру АПС над морским льдом

Чечин Д.Г.^{1,2}, Дебольский А.В.^{2,1}, Мортиков Е.В.²

1 Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

2 Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова

Email: chechin@ifaran.ru

В настоящей работе используются вихреразрешающее моделирование (LES) для явного воспроизведения конвекции над разводьями, а также устойчивых внутренних пограничных слоёв (ВПС) над льдом с подветренной стороны от разводий. Серия расчетов применяется для исследования влияния разводий на эволюцию пограничного слоя над морским льдом.

Результаты демонстрируют значительную чувствительность осреднённых по площади вертикальных профилей к ширине разводий и к размерам прилегающих ледяных полей. В частности, над широкими разводьями усиливаются приземная скорость ветра и поток тепла, а высота конвективной струи увеличивается. Над прилегающим льдом скорость ветра уменьшается, а турбулентность затухает по мере удаления от разводья по ветру, при этом высота устойчивого ВПС возрастает. В условиях узких, но часто встречающихся разводий существует хорошо выраженная высота смешения (blending height), тогда как при широких разводьях и обширных ледяных полях высоты конвективного и устойчивого ВПС существенно различаются.

Модели с грубым разрешением обычно используют так называемый «плиточный» подход для агрегирования потоков над неоднородной поверхностью, который в своей самой простой форме учитывает только долю площади разводий, но не влияние их ширины. Чтобы подчеркнуть недостатки такого подхода, мы сравниваем результаты LES с одноколоночной моделью, где турбулентный обмен параметризован. Расчёты с одноколоночной моделью показывают сильную чувствительность к вертикальной дискретизации сетки и большие расхождения по сравнению с LES, что указывает на недостаточность простого плиточного подхода. Обсуждаются шаги в направлении более адекватной параметризации, учитывающей влияние разводий.

Применение нейронных сетей для улучшения параметризации турбулентного обмена в приземном слое атмосферы

Шишков Е.Н.^{1,2}, Мортиков Е.В.², Дебольский А.В.^{2,3}, Суязова В.И.²

1 Механико-математический факультет МГУ им М.В. Ломоносова

2 Научно-исследовательский вычислительный центр, МГУ им М.В. Ломоносова

3 Институт физики атмосферы им А.М. Обухова РАН

Турбулентные потоки тепла и импульса в приземном слое существенно влияют на климат и атмосферные процессы, однако их параметризации, основанные на теории подобия Монина–Обухова (ТПМО), имеют серьёзные ограничения. Они плохо работают в устойчиво стратифицированных условиях полярных регионов, не описывают неградиентный перенос в конвективном слое и игнорируют влияние топографии и неоднородностей поверхности, что приводит к систематическим ошибкам в моделях климата.

В работе рассматривается применение нейросетевого алгоритма, обученного на данных полевых кампаний (MOSAIC, SHEBA и др.) и синтетических профилях из RANS-моделей. Такой подход позволяет учесть нелинейные связи между параметрами, повысить устойчивость и обобщающую способность модели. Результаты показывают улучшение воспроизведения турбулентных потоков по сравнению с параметризацией

ТПМО, используемой в INMCM, что подтверждает потенциал машинного обучения для повышения точности прогноза погоды и климата.

Акустика и турбулентность

В.П.Юшков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет

E-mail: yushkov@phys.msu.ru

В докладе показано, что будущее развитие теории турбулентности должно быть направлено на анализ не только вихревой несжимаемой, но и адиабатической компоненты, прежде всего флуктуаций давления и плотности. Предлагается уравнение связывающее генерацию и выравнивание флуктуаций энтропии лагранжевых (воздушных) частиц со скоростью генерации адиабатических флуктуаций. Случайный источник в этом уравнении связывается с полем скорости диссипации и радиационного баланса. Флуктуации давления сопоставляются с флуктуациями потенциально доступной энергии. По измерениям в атмосферном пограничном слое оценивается постоянная скорости выравнивания флуктуаций энтропии. Эта постоянная позволяет связать интегральный пространственный масштаб турбулентных вихрей со среднеквадратичным отклонением флуктуаций скорости звука в атмосферном пограничном слое. Построены оценки амплитуды адиабатического шума в турбулентной среде и показана связь его энергии с временем стационарности и временем корреляции флуктуаций вихревой компоненты скоростей.

Современные методы мониторинга и моделирования потоков и запасов углерода антропогенно измененных экосистем

Ярославцев А.М.

Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов

В работе представлены комплексные подходы к количественной оценке запасов и потоков углерода в антропогенно измененных экосистемах. На примере ячменного поля показана возможность выявления особенностей углеродного обмена с помощью модели следа турбулентного потока, позволившей установить связь между пространственной вариабельностью биомассы и характеристиками потоков углерода, обусловленных почвенной неоднородностью. Для городских экосистем, отличающихся сложной пространственной структурой, надземная биомасса (AGB) деревьев была оценена на примере кампуса РУДН с использованием технологии наземного лазерного сканирования (TLS) на основе одновременной локализации и картографирования (SLAM). Полученные результаты соответствуют современным направлениям в параметризации турбулентных потоков углерода и формируют научно-методическую основу для развития цифровых двойников антропогенно измененных экосистем, предназначенных для комплексного анализа и прогнозирования их функционирования.