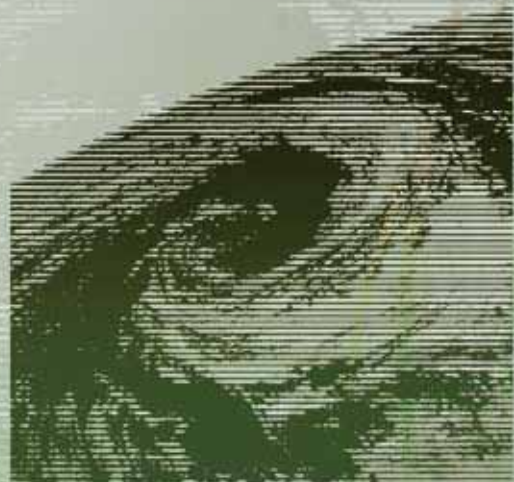


Вихреразрешающее моделирование атмосферного пограничного слоя в высоких широтах



1 Large Eddy Simulation of Atmospheric Boundary Layer in Polar Regions

This paper shortly reviews the large eddy simulation – a powerful method of modeling turbulent flows in atmospheric boundary layer. A few examples of its application in studies of dynamics and structure of atmospheric boundary layer in polar regions are presented.

Key words: large eddy simulation, atmospheric boundary layer, Polar regions

AUTHORS:

V.M. Stepanenko – Senior Research Fellow, Research Computing Center, MSU
e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

A.V. Glazunov – Senior Research Fellow, Institute of Numerical Mathematics RAS
e-mail: glazunov@inm.ras.ru

V.N. Lykosov – Principal Scientist, Institute of Numerical Mathematics RAS
e-mail: lykossov@inm.ras.ru

A.V. Debolsky – Student, Faculty of Geography, MSU
e-mail: and.debol@gmail.com

Вихреразрешающее моделирование атмосферного пограничного слоя в высоких широтах

1

В статье кратко описан мощный аппарат математического моделирования турбуленности в пограничном слое атмосферы – вихреразрешающее моделирование. Демонстрируются примеры его применения к задачам изучения структуры и динамики пограничного слоя в высоких широтах (Арктике).

Ключевые слова: вихреразрешающее моделирование, пограничный слой атмосферы, Арктика

АВТОРЫ:

В.М. Степаненко – старший научный сотрудник НИВЦ МГУ, старший научный сотрудник географического факультета МГУ
e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

А.В. Глазунов – старший научный сотрудник ИВМ РАН, старший научный сотрудник НИВЦ МГУ
e-mail: glazunov@inm.ras.ru

В.Н. Лыкосов – главный научный сотрудник ИВМ РАН, заведующий лабораторией НИВЦ МГУ
e-mail: lykossov@inm.ras.ru

А.В. Дебольский – студент географического факультета МГУ
e-mail: and.debol@gmail.com

Атмосферный планетарный пограничный слой (ППС) — это прилегающий к поверхности планеты турбулизированный слой, свойства которого определяются тепловым и динамическим взаимодействием с поверхностью. При разных погодных условиях толщина ППС меняется в пределах от нескольких десятков метров до нескольких километров. В зависимости от направления потока тепла на поверхности разделяют три типа ППС: устойчиво-стратифицированный, нейтрально-стратифицированный и конвективный. Известно, что наряду с мелкомасштабной стохастической турбулентностью, в нейтрально-стратифицированном и конвективном ППС всегда существуют организованные крупные вихри (ОКВ). Крупные вихри обеспечивают значительную часть обмена импульсом, теплом и влагой с подстилающей поверхностью, и этот обмен принципиально важно учитывать при прогнозе погоды и изменений климата. В настоящее время не существует универсальной теории образования ОКВ в планетарном пограничном слое. Детальные натурные измерения, которые могли бы дать исчерпывающую информацию о структуре и физических механизмах формирования ОКВ, в настоящее время также отсутствуют. К счастью, возможности современных параллельных суперкомпьютеров позволяют воспроизводить динамику ППС одновременно в широком диапазоне пространственных масштабов — от нескольких метров до нескольких десятков километров. Вихреразрешающее численное моделирование (LES — Large Eddy Simulation) является оптимальным инструментом для решения подобного рода задач. Моделирование с помощью LES требует достаточно высокого пространственного разрешения, зависящего от типа турбулентного течения. Пожалуй, наиболее полный обзор подходов к построению моделей LES приводится в (Sagaut, 2005). Результаты расчетов по современным LES-моделям обычно хорошо согласуются с данными измерений и результатами прямого численного моделирования (DNS — Direct Numerical Simulation).

В качестве приложений LES-моделей можно выделить, по крайней мере, следующие направления:

- изучение фундаментальных свойств турбулентности в ППС;
- разработка параметризаций (замыканий) турбулентности для глобальных и мезомасштабных моделей атмосферы;
- расчеты аэродинамической нагрузки, а также оценки комфортности зданий и сооружений.

Развитие первых двух направлений в последнее время особенно активно происходит в применении к Арктике. Это вызвано несколькими обстоятельства-

ми. Во-первых, в этом районе происходит особенно быстрое потепление климата. Во-вторых, здесь данные различных моделей климата в наибольшей степени расходятся между собой. И, в-третьих, данные натурных наблюдений здесь по-прежнему скудны. Быстрота климатических изменений, по крайней мере, отчасти связана здесь с изменением подстилающей поверхности (сокращением площади ледового покрова), а неадекватность результатов моделирования данным натурных измерений ряд исследователей связывают с неправильным описанием турбулентного обмена в условиях устойчивой стратификации. Таким образом, можно считать, что турбулентный обмен с подстилающей поверхностью действительно играет важную роль в современном изменении климата в

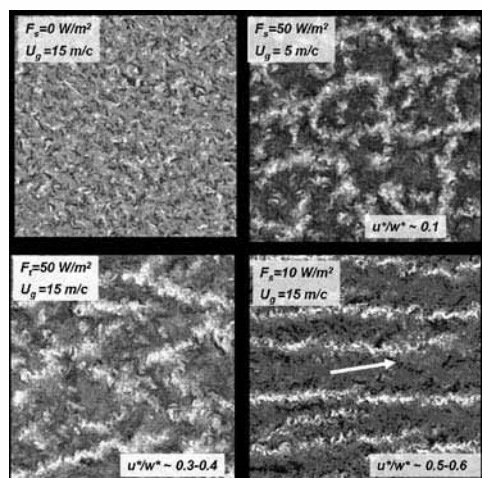


Рис. 1. Различные типы организованных крупных вихрей по данным расчетов LES-моделью ИВМ РАН/НИВЦ МГУ (размер расчетной области ~ 25 км × 25 км × 2 км, шаг сетки 25 м, итого $8 \cdot 10^7$ узлов сетки). Цветом показаны флуктуации вертикальной скорости в горизонтальном сечении области, проведенном на высоте середины пограничного слоя (ПС). Верхний левый рисунок – слабоустойчиво-стратифицированный ППС – ОКВ не образуются, на остальных рисунках изображены варианты КПС с различным отношением генерации кинетической энергии турбулентности за счет плавучести и сдвига скорости (конвекция организуется в виде ячеек или валиков, в зависимости от потока тепла на поверхности и скорости фонового ветра)

Арктике, и есть надежда, что данные LES-моделирования позволят улучшить описание соответствующих процессов в климатических моделях.

Все современные LES-модели реализованы для многопроцессорных вычислительных систем. Это диктуется необходимостью достаточно высокого пространственного разрешения (менее ~ 100 м), а также – в ряде приложений – целесообразностью использования больших расчетных областей. Так, при расчетной области 10 км × 10 км × 2 км и разрешении 100 м размер сетки составляет $2 \cdot 10^5$, а при разрешении 10 м – уже $2 \cdot 10^8$ узлов.

Теперь приведем несколько иллюстраций применения LES-модели, разработанной в Институте вычислительной математики РАН и Научно-исследовательском вычислительном центре Московского государственного университета (Glazunov, 2009), к воспроизведению динамики атмосферного ППС в высоких широтах. Все расчеты выполнены на суперкомпьютере «Ломоносов», установленном в МГУ.

Так, на рис. 1 изображены 4 варианта структуры поля вертикальной скорости, возникающие при развитии конвективного пограничного слоя (КПС) при различном потоке тепла с подстилающей поверхности и различной скорости фонового потока. Отметим, что в целом форма конвективных ячеек и валиков (направленных почти параллельно скорости ведущего потока) согласуется с данными спутниковых наблюдений облачности, возникающей над Северо-Атлантическим морским течением при холодных арктических вторжениях.

Помимо динамики КПС над однородной поверхностью океана, интерес представляет также развитие этого слоя вблизи кромки льда, где наряду с конвективной неустойчивостью развивается также бароклинная. Последняя приводит к образованию ледового бриза и, при некоторых условиях, интенсивных мезомасштабных циклонов. На рис. 2 изображен пример расчета КПС, возникающего при натекании устойчиво-стратифицированного воздушного потока со льда на воду, в случае прямой кромки льда. Видно развитие ОКВ (термиков) и их укрупнение по мере удаления от границы льда. Высота КПС h хорошо согласуется с аналитическим решением $h \sim \sqrt{(x - x_0)}$, где x — горизонтальная координата, x_0 — положение кромки льда. Отметим, что данный расчет был реализован с помощью

двух сопряженных численных экспериментов. В первом эксперименте воспроизводился атмосферный поток над однородной поверхностью льда с использованием периодических боковых граничных условий. При этом гидродинамические величины с одной боковой грани этого эксперимента использовались в качестве условий Дирихле во втором эксперименте, где уже задавалась граница льда и воды. Результаты второго эксперимента изображены на рис. 2.

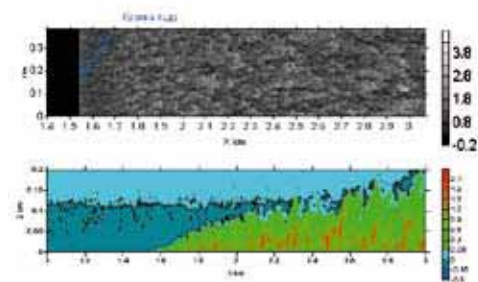


Рис. 2. Вертикальный поток тепла ($\text{м/с} \cdot \text{К}$) при натекании устойчиво-стратифицированного потока с ледового покрова на открытую поверхность воды. Фоновый поток направлен перпендикулярно кромке льда слева направо. На верхнем рисунке изображен кинематический поток тепла на поверхности, на нижнем – поток тепла в вертикальном разрезе расчетной области, перпендикулярном кромке льда

Другой пример использования описанной схемы сопряженных экспериментов заключается в расчете характеристик турбулентного потока над одним из норвежских фьордов (рис. 3). Мотивацией к проведению та-

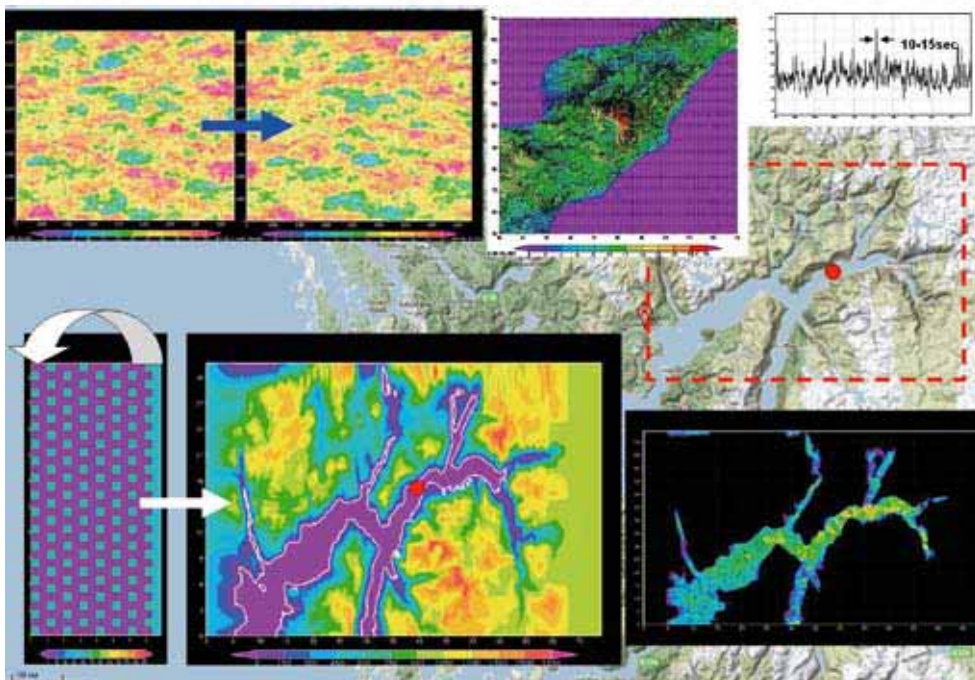


Рис 3.

Схема численного эксперимента по исследованию изменчивости ветра в норвежском фьорде. Использована схема двух сопряженных экспериментов LES-модели ИВМ РАН/НИВЦ МГУ. Верхний ряд рисунков (слева направо): мгновенное поле скорости ветра в (двух) сопряженных экспериментах, направление и модуль скорости на выбранном участке фьорда, временной ход модуля скорости ветра в точке, изображенной на карте красным кружком; нижний ряд рисунков (слева направо): высота рельефа во вспомогательном эксперименте, высота рельефа в основном эксперименте, мгновенное поле скорости ветра во фьорде

кого эксперимента послужила необходимостью оценки предельных порывов ветра в пределах фьорда для оптимального проектирования моста. Здесь, как и в численном эксперименте, описанном выше, использовалась схема сопряжения двух численных экспериментов.

Работы выполнены в рамках Программы развития Московского университета до 2020 года, при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-05-00981-а, 11-05-00435-а, 12-05-01068-а и 11-05-00679-а) и Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, проект «Изучение турбулентного

обмена атмосферы с подстилающей поверхностью при наличии мелкомасштабных водных объектов на основе суперкомпьютерного моделирования и натуральных измерений»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glazunov A.V.* Large-eddy simulation of turbulence with the use of a mixed dynamic localized closure: Part 1. Formulation of the problem, model description, and diagnostic numerical tests // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, Volume 45, Number 1, pp.5–24.
2. *Glazunov A.V.* Large-eddy simulation of turbulence with the use of a mixed dynamic localized closure: Part 2. Numerical experiments: Simulating turbulence in a channel with rough boundaries // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, Volume 45, Number 1, pp.25–36.
3. *Sagaut P.* Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction (Scientific Computation), Springer, 2005, p. 556.
4. *Глазунов А.В.* Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического замыкания: Часть I. Формулировка задачи, описание модели и диагностические численные тесты // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* – 2009. – Т. 45. – № 1. – С. 7–28.
5. *Глазунов А.В.* Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического замыкания: Часть II. Численные эксперименты; Моделирование турбулентности в канале с шероховатыми границами // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* – 2009. – Т. 45. – № 1. – С. 29–42.