

**Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям,
моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды:
ENVIROMIS-2018, 5 – 11 июля 2018 г., г. Томск, Россия**

**Исследование процессов взаимодействия атмосферного
пограничного слоя умеренных и высоких широт
с деятельным слоем суши и водоемами:
наблюдения, моделирование, параметризация**

**В.Н. Лыкосов^{1,2}, А.В. Глазунов^{1,2}, И.А. Репина^{3,2},
В.М. Степаненко², М.И. Варенцов², Е.В. Мортиков^{2,1}**

¹Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН,

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

³Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН

E-mail: lykossov@yandex.ru

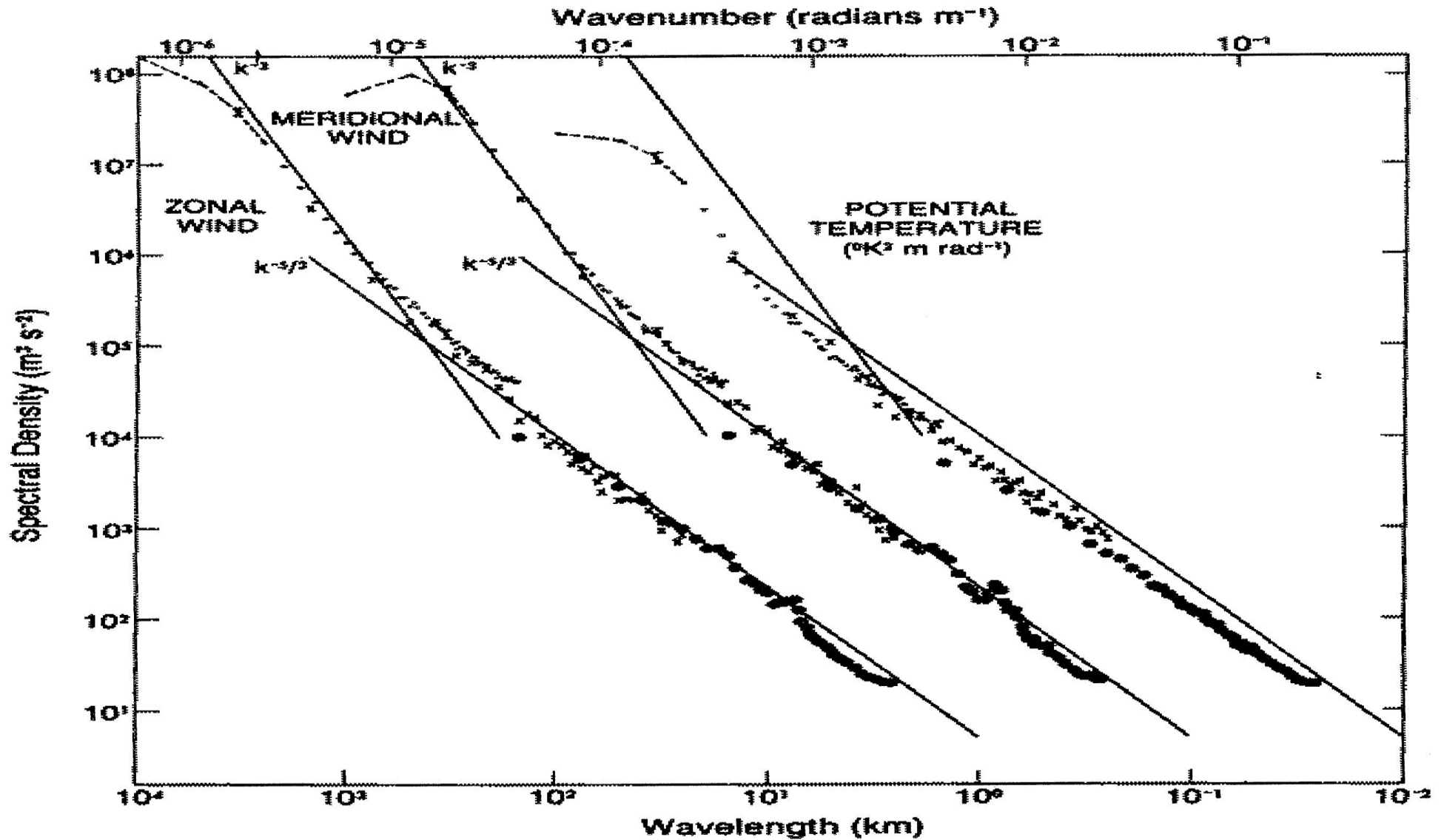


FIG. 1. Variance power spectra of wind and potential temperature near the tropopause from GASP aircraft data. The spectra for meridional wind and temperature are shifted one and two decades to the right, respectively; lines with slopes -3 and $-5/3$ are entered at the same relative coordinates for each variable for comparison. [Reproduced with permission from Nastrom and Gage (1985).]

Palmer T.N. Towards the probabilistic Earth-system simulator: a vision for the future of climate and weather prediction. - Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2012, v. 138, no. 665, p. 841-861.

Масштаб времени: $\tau(k) \propto k^{-3/2} E^{-1/2}(k)$, $[k] = m^{-1}$, $[E] = m^3 / s^2$

Пусть $\tau(k)$ характеризует время, за которое ошибки в спектральной компоненте модельного решения с волновым числом k за счет нелинейных взаимодействий повлияют на точность воспроизведения компоненты с волновым числом $k/2$. Пусть также k_L соответствует (условной) правой границе длинноволновой (крупномасштабной) части спектра.

Вопрос: каково время T , за которое ошибки в коротковолновой части спектра (на больших волновых числах $2^N k_L$, $N \gg 1$) повлияют на воспроизведение крупномасштабных процессов?

$$T(N) = \tau(2^N k_L) + \tau(2^{N-1} k_L) + \dots + \tau(2^0 k_L) = \sum_{n=0}^N \tau(2^n k_L)$$

$$E(k) \propto k^{-3} \rightarrow \tau(k) = \text{const} \rightarrow T(N) \propto N$$

$$E(k) \propto k^{-5/3} \rightarrow \tau(k) \propto k^{-2/3} \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} T(N) \propto 2.7 \tau(k_L)$$

Earth System Model

R. Loft. The Challenges of ESM Modeling at the Petascale

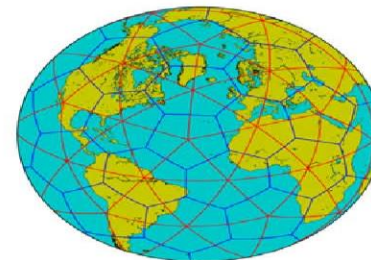
ESM Vision

Coupled Ocean-Land-Atmosphere Model

~10 km x ~10 km (eddy-resolving)
100 levels
Unstructured, adaptive grids

~100 m
10 levels
Landscape-resolving

~1 km x ~1 km (cloud-resolving)
100 levels, **whole atmosphere**
Unstructured, adaptive grids



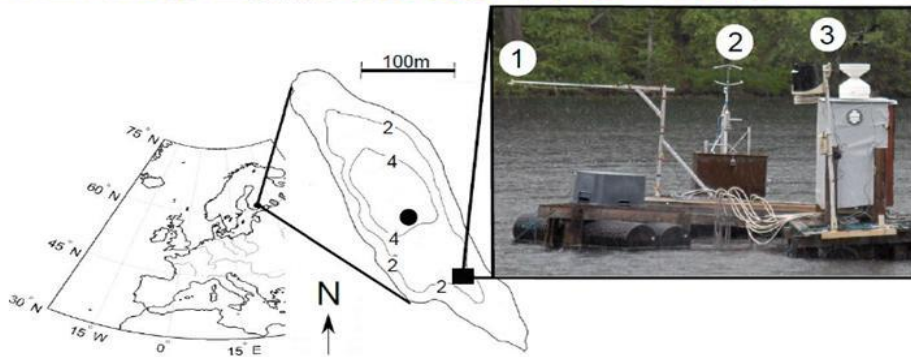
Assumption: Computing power enhancement by a factor of 10^4 - 10^6

ESSL - The Earth & Space Systems Laboratory

4/11/08

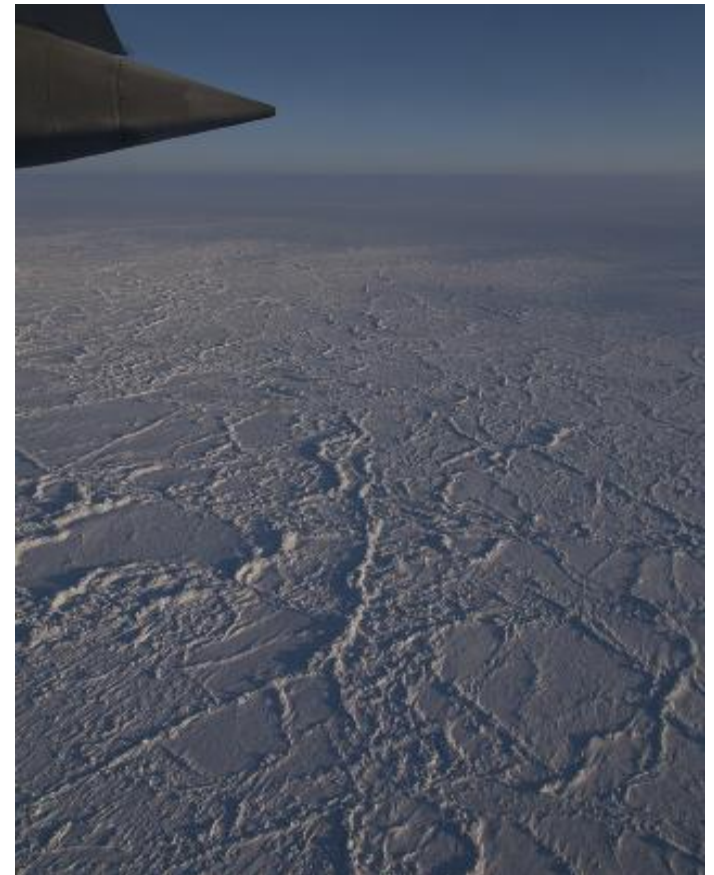
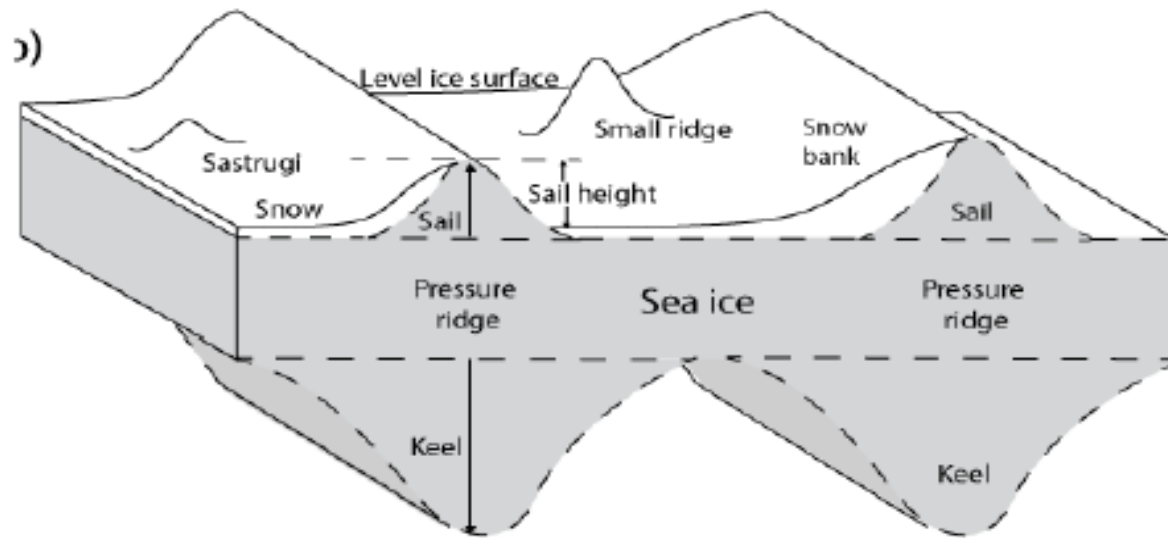
Площадь поверхности Земли: 510 072 000 км²

Общее количество озер с площадью менее 10 км² составляет 99,9 % от числа внутренних водоемов на поверхности Земли, а их суммарная территория составляет 54% от общей площади внутренних водоемов

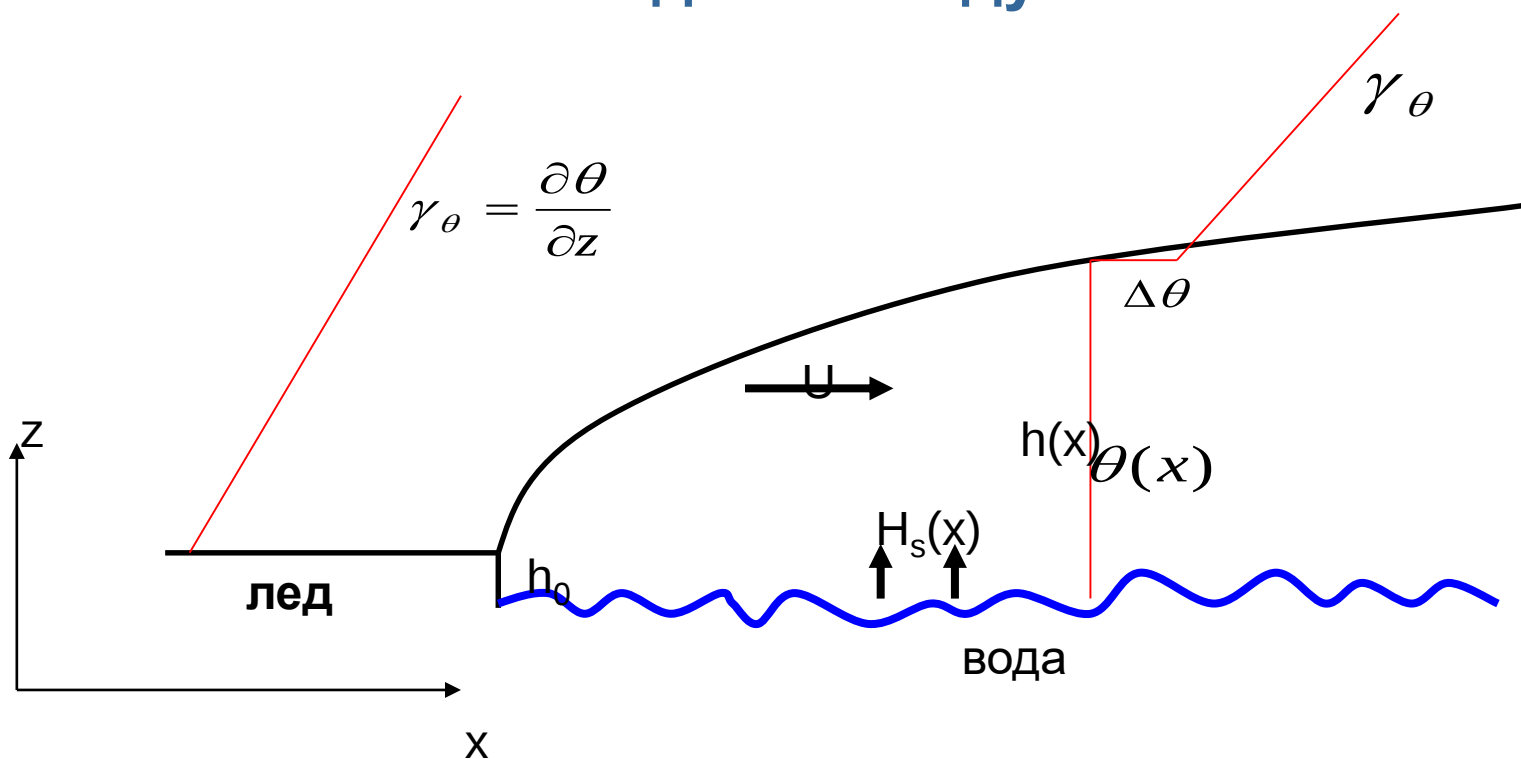


Для современных моделей прогноза погоды и климата требуется вычисление балансов тепла, влаги и газовых примесей на поверхности с учетом наличия водных объектов подсеточного масштаба.

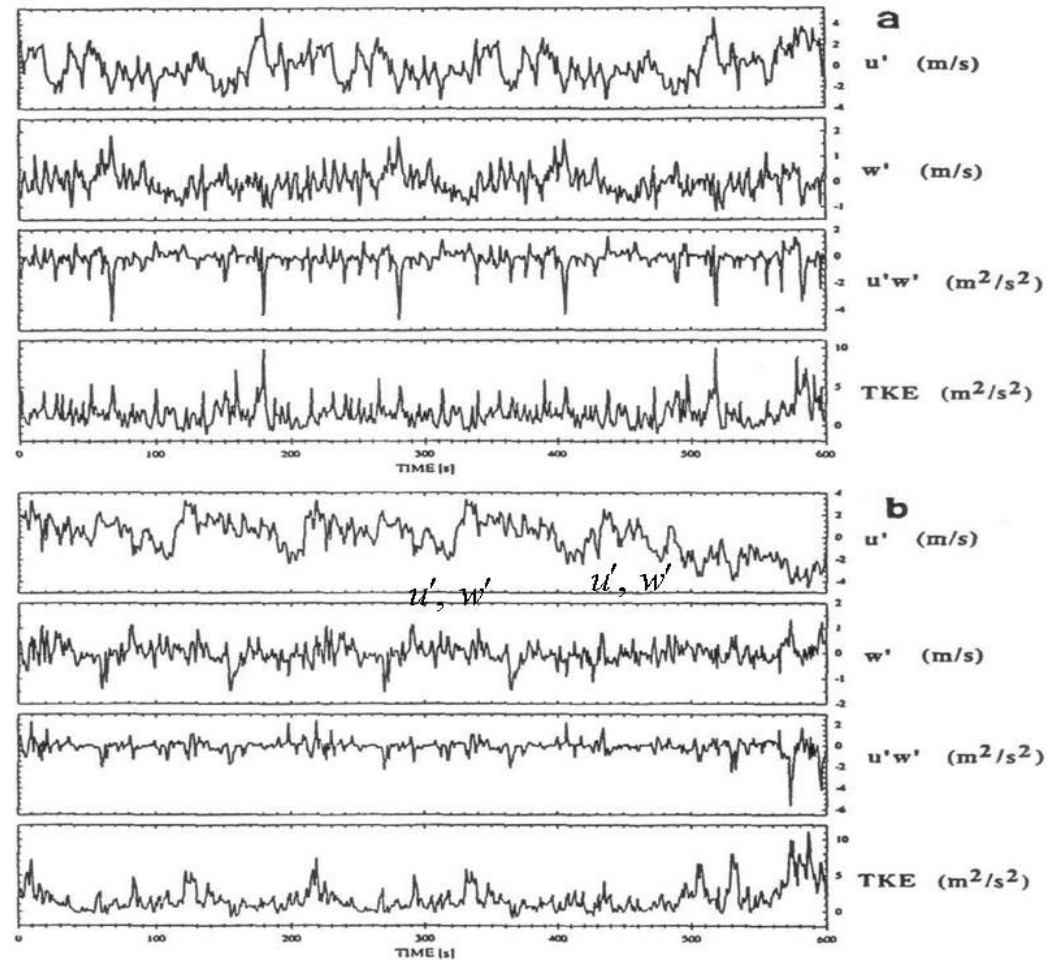
Торосы



Формирование внутреннего конвективного пограничного слоя над полыньей при натекании холодного воздуха.



$$C_H = f(U, \Delta T, L, x)$$



Пример временных рядов пульсаций скорости u', w' , вертикальной компоненты потока импульса $u'w'$ и кинетической энергии турбулентности $TKE = (u'^2 + v'^2 + w'^2) / 2$ в условиях снежной метели (a) и без нее (b).

Эффект Томса

Toms B.A. Some observation on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. - Proc. 1st Intl. Congr. on Rheology, v. II, p. 135-141, North Holland, Amsterdam, 1948.

- ❑ При добавлении в воду полимерной присадки (раствор полиметилметакрилата в моноклорбензоле) трение между турбулентным потоком и трубопроводом значительно снижается.**
- ❑ Эффект Томса обуславливается образованием на границе твердое тело-жидкость молекулярных растворов, которые ослабляют турбулентность потока. Установлено, что добавка полимеров более эффективно действует при высоких скоростях потока, когда его турбулентность проявляется сильнее.**
- ❑ Практическое применение: "смазывают" различными присадками трубопроводы, "смазывают" полимерами морские и речные суда, напорные колонны глубоких скважин и т.д.**
- ❑ Эффект Томса наблюдается и при движении твердых частиц в жидкости (в частности, за счет стратификации плотности взвеси).**

Polymeric stresses, wall vortices and drag reduction

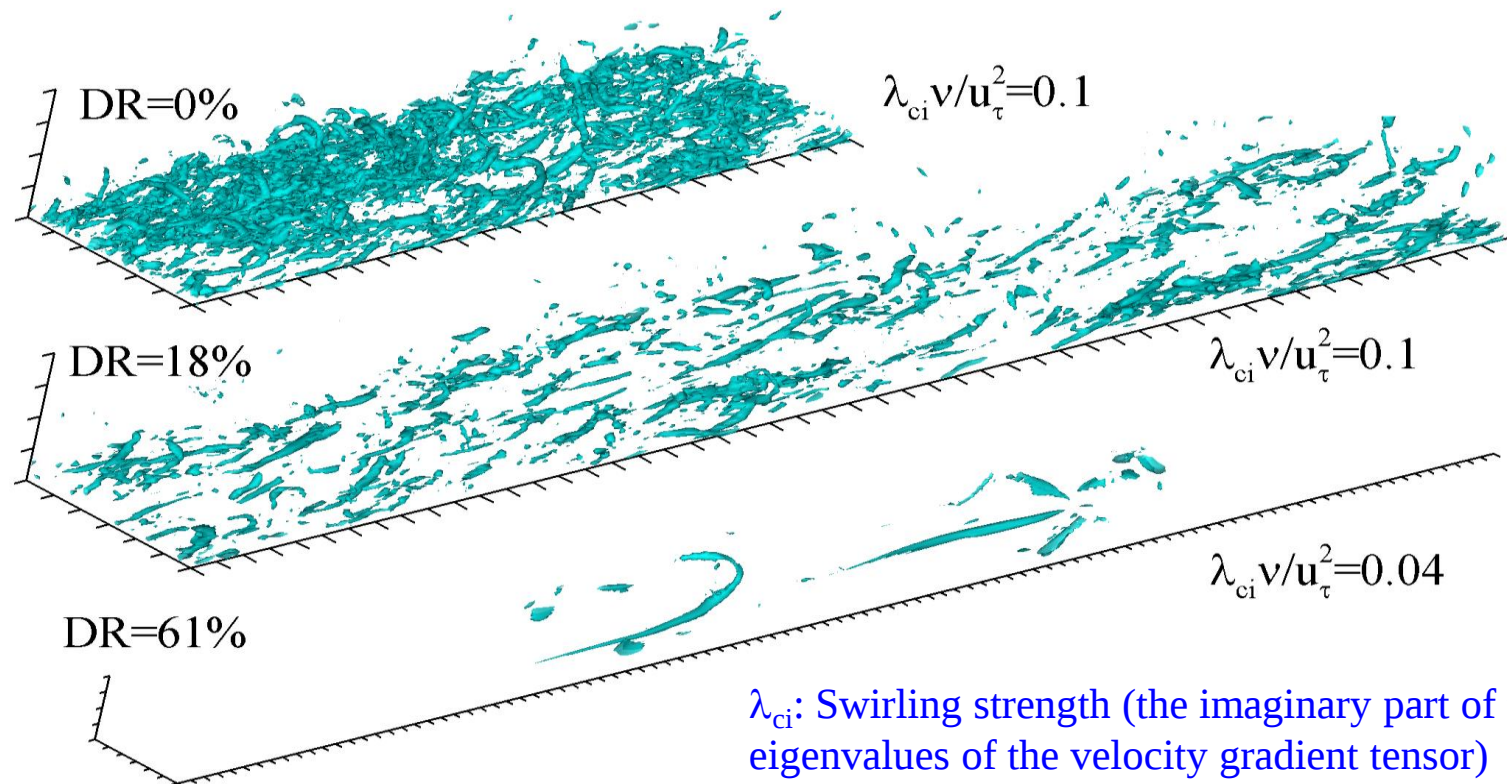
Ronald J. Adrian

*Arizona State University-Tempe
Mechanical and Aerospace Engineering*

“High Reynolds Number Turbulence”, Isaac Newton Institute, Sept. 8-12, 2008

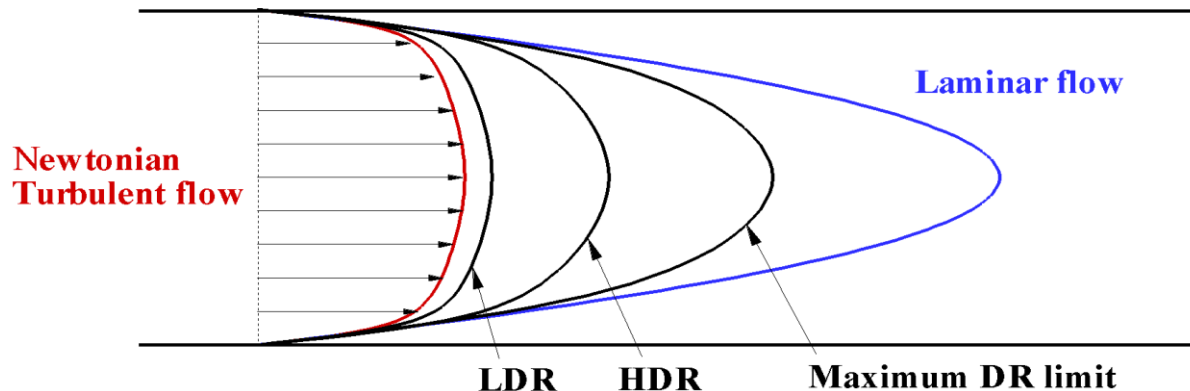
Near-Wall Vortical Structures

- ❑ Vortical structures in polymer solutions are:
- ❑ Weaker
- ❑ Thicker
- ❑ Longer
- ❑ Fewer



Structural changes found in experiments

- Increased spacing and coarsening of streamwise streaks
- Damping of small spatial scales
- Reduced streamwise vorticity
- Enhanced streamwise velocity fluctuations
- Reduced vertical and spanwise velocity fluctuations and Reynolds stresses
- Parallel shift of mean velocity profile in low **Drag Reduction**
- Increase in the slope of log-law in high **Drag Reduction**

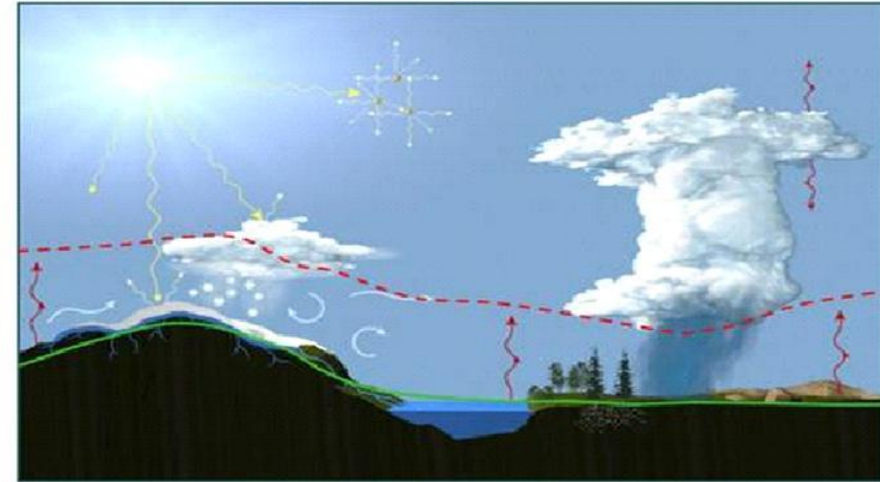


Турбулентность в геофизических пограничных слоях

- Шероховатость поверхности
- Многомасштабность
- Стратификация

Особенности турбулентных процессов в геофизических пограничных слоях

Атмосферный пограничный слой $H_{ABL} \sim 10^2 - 10^3 \text{ м}$
Верхний пограничный слой океана $H_{UOL} \sim 10^1 - 10^2 \text{ м}$
Придонный пограничный слой океана $H_{OBL} \sim 10^0 - 10^1 \text{ м}$



- Стратификация
- Солнечная радиация
- Наличие облачности и фазовые переходы в АПС
- Сильно шероховатая орографически и гидрологически неоднородная поверхность в АПС
- Генерация турбулентности за счет обрушения ветровых волн в ВПСО

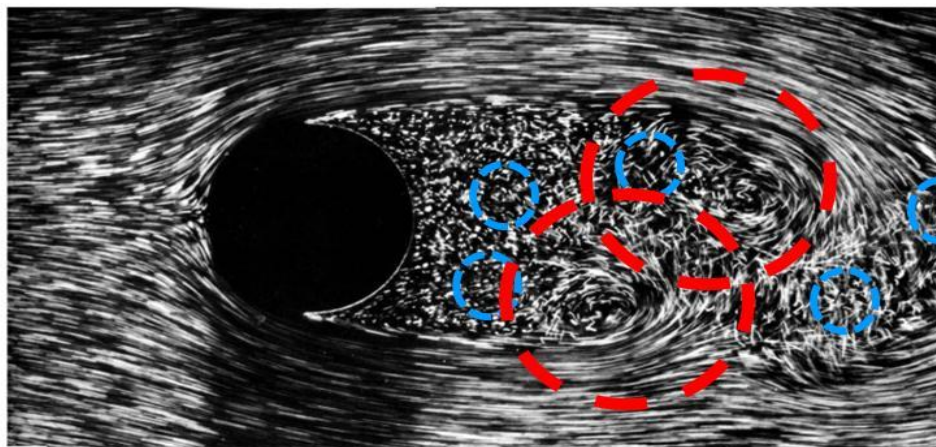
...

Очень большие числа Рейнольдса

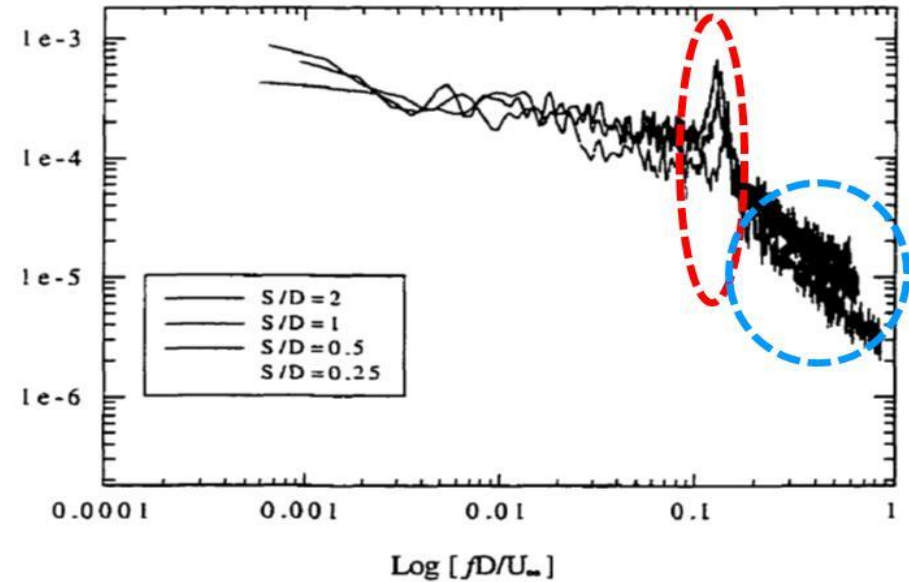
Атмосферный пограничный слой - $Re \sim 10^9$

Верхний слой океана - $Re \sim 10^6 - 10^7$

Придонный слой океана - $Re \sim 10^5 - 10^6$

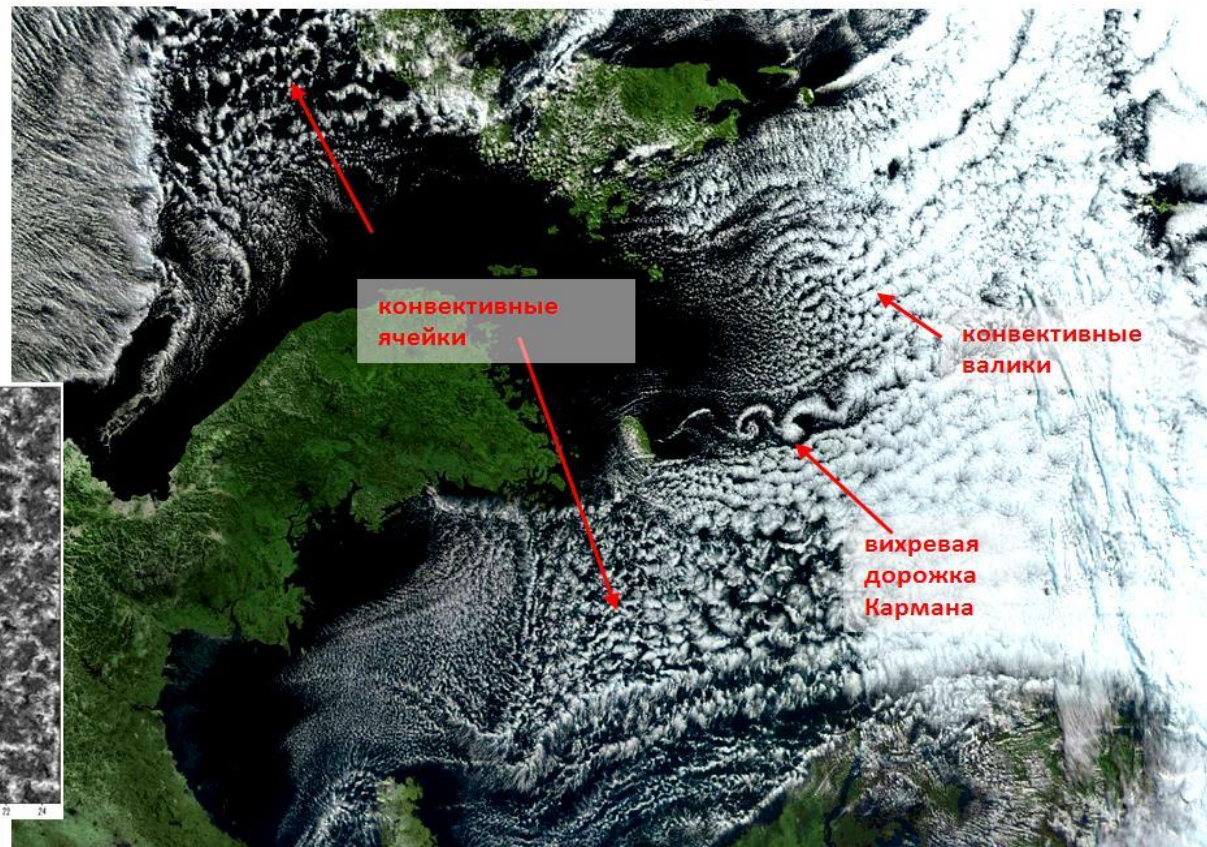
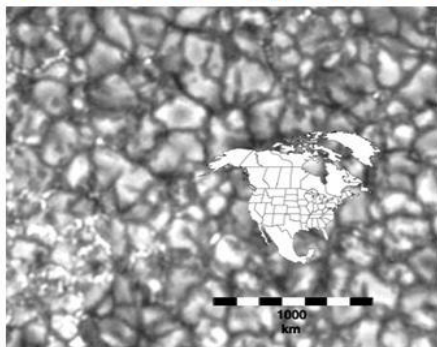


Log | power spectrum/ U_∞^2 |



Когерентные (организованные) структуры
Мелкомасштабная турбулентность

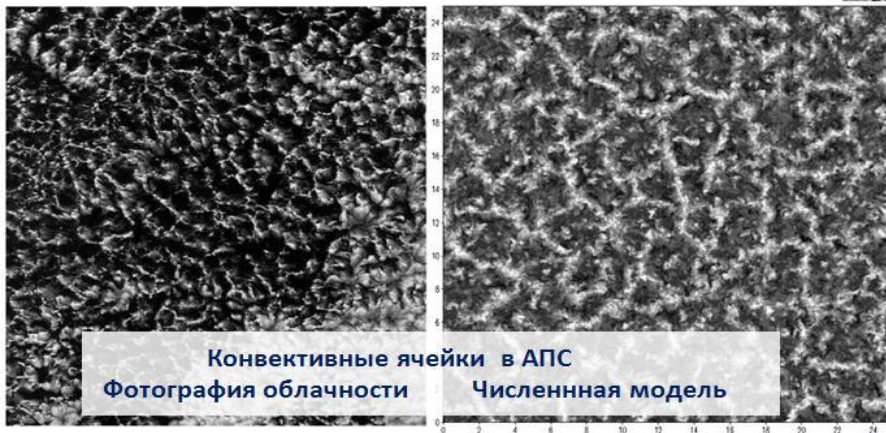
Конвективные
ячейки на Солнце
(гранулы).



конвективные
ячейки

конвективные
валики

вихревая
дорожка
Кармана



Конвективные ячейки в АПС
Фотография облачности

Численная модель

Моделирование динамики пограничного слоя атмосферы

- (1) Воспроизведение пестрой картины атмосферных движений над реальной подстилающей поверхностью при сравнительно однородных процессах в свободной атмосфере;**
- (2) изучение процессов взаимодействия деятельного слоя суши и верхнего слоя океана с атмосферой;**
- (3) оценка возможностей направленных воздействий с целью уменьшения рисков, связанных с опасными явлениями, и достижения экономического эффекта (рассеяние туманов, борьба с заморозками и засухой, изменение турбулентного режима, в частности, **снижение сопротивления** и др.);**
- (4) разработка схем параметризации для гидродинамических моделей прогноза погоды и климата.**

P. Viterbo et al. The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer. – Q.J.R. Meteorol. Soc., 1999, v. 125, p. 2401-2426.

- В «одномерных» схемах параметризации приземного слоя атмосферы реализуется положительная обратная связь между температурой подстилающей поверхности и устойчивой стратификацией пограничного слоя атмосферы, наиболее сильно проявляющаяся при больших числах Ричардсона.**
- Процесс промерзания почвы – важный механизм регулирования сезонного хода температуры (зимой препятствует чрезмерному усилению устойчивости пограничного слоя).**

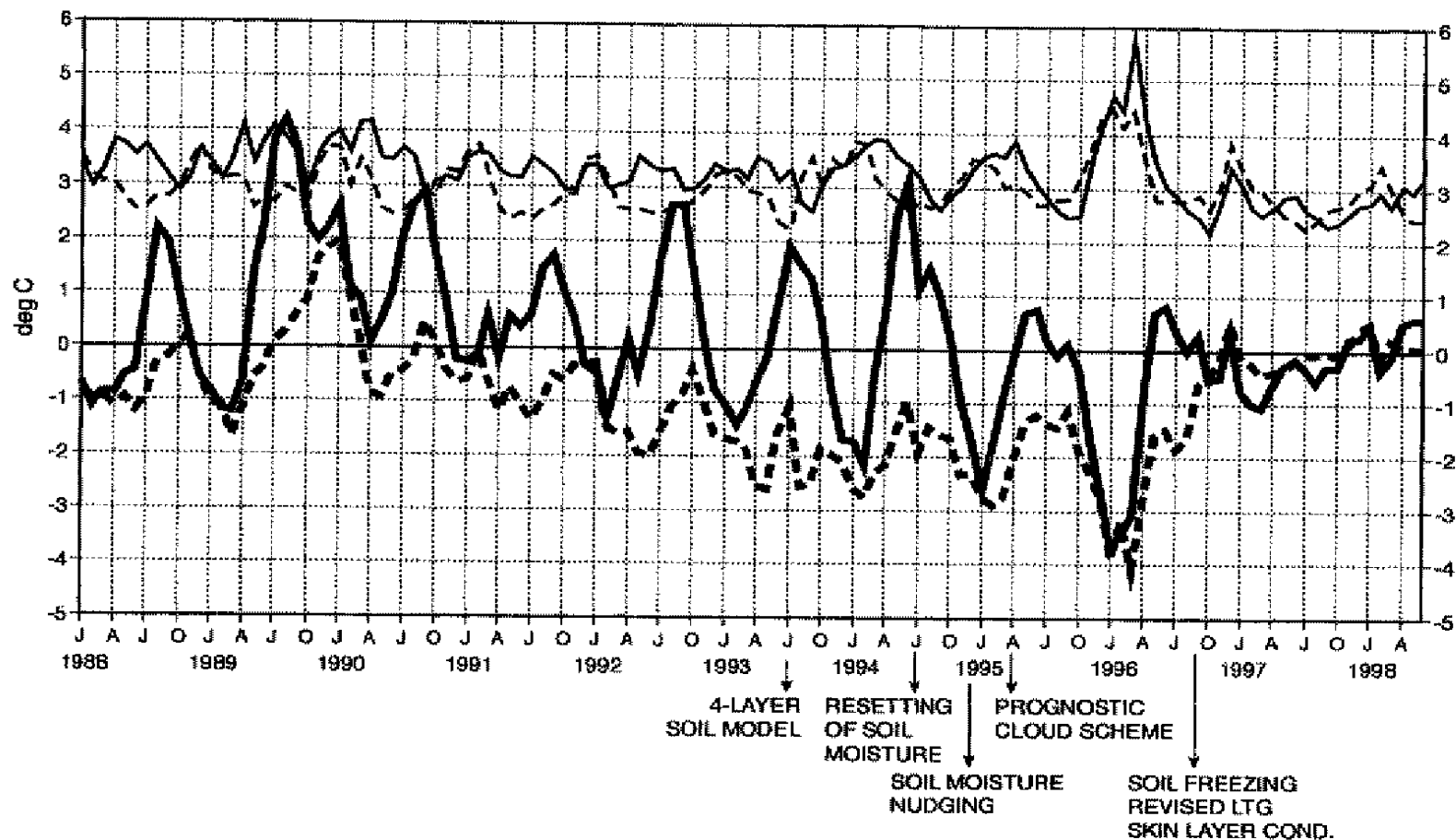


Figure 15. History of monthly biases (thick solid and dashed lines) and standard deviations (thin solid and dashed lines) with respect to observations of the daytime (72-hour: solid lines) and night-time (60-hour: dashed lines) operational 2 m temperature forecasts, averaged over all available SYNOP stations in the European area of 30°N to 72°N and 22°W to 42°E.

В Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) последние 20 лет использовался подход, с помощью которого искусственно завышалась степень турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы в условиях его устойчивой стратификации [Sandu et al., 2013], чтобы учесть вклад подсеточных процессов, обусловленных неоднородностью подстилающей поверхности, гравитационными волнами или мезомасштабной изменчивостью, не разрешаемых явно прогностической моделью. С помощью такого подхода удалось улучшить качество воспроизведения температуры подстилающей поверхности и синоптических образований.

Анализ результатов ряда 10-дневных прогностических экспериментов, проведенных в ЕЦСПП с моделью T511L91 (горизонтального разрешения около 50 км и вертикального – 91 уровень) для зимнего (январь 2011 г.) и летнего (июль 2010 г.) сезонов, показал [Sandu et al., 2013], что отказ от искусственного завышения степени турбулентного обмена в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы приводит к улучшению качества воспроизведения низкоуровневых струйных течений и суточного хода температуры поверхности и влияет (в некоторых случаях – негативно) на характеристики крупномасштабных течений – интенсивность синоптических образований и амплитуду стационарных планетарных волн. Существенную роль здесь играют как выбор турбулентного замыкания, так и, например, параметризация орографического сопротивления или описание взаимодействия атмосферы и суши.

Sandu I., Beljaars A., Bechtold P., Mauritsen T., Balsamo G. Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models? – J. Adv. Model. Earth Syst., 2013, v. 5, p. 117-133.

Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective PBLs at Gray-Zone Resolutions

Hyeyum (Hailey) Shin¹ and Song-You Hong²

¹National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

²Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, South Korea

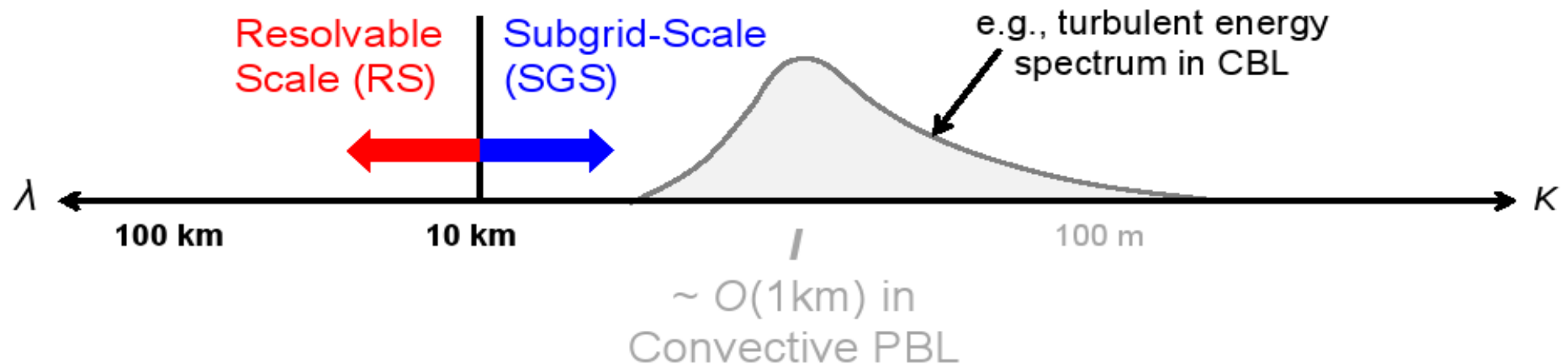
With acknowledgement to

Jimmy Dudhia, Peggy LeMone, Sang-Hun Park (MMM/NCAR),
Sungsu Park (CGD/NCAR), Yign Noh (YonSei Univ.)

NWP models and GCMs: $\Delta \sim O(10-100 \text{ km})$

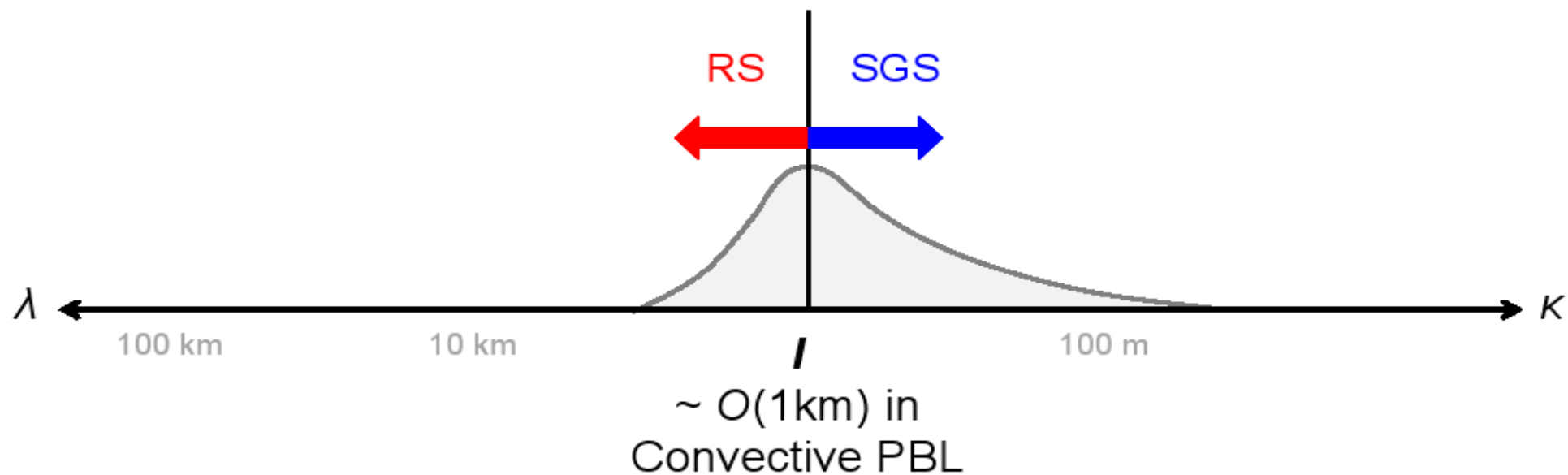
grid (Δ)
mean state

$$\frac{\partial \overline{c}}{\partial t} = \dots - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} ?$$



$\Delta \gg l$: Totally subgrid-scale (SGS) $\rightarrow$ Entirely parameterized.

At higher resolutions: $\Delta \sim O(0.1-1 \text{ km})$

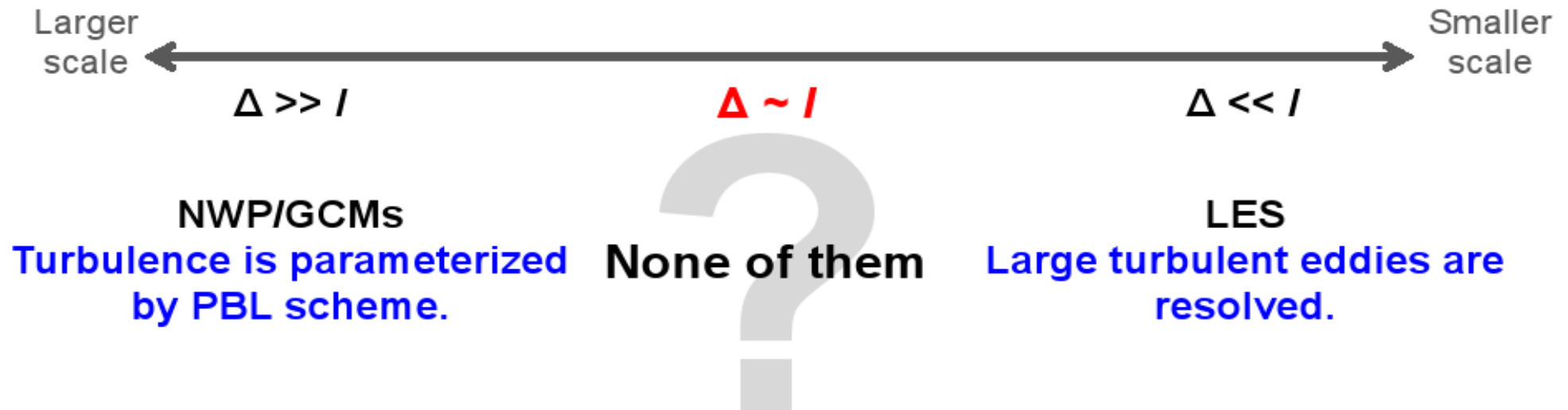


$\Delta \sim l$: **Partly resolved**, and **partly parameterized**.

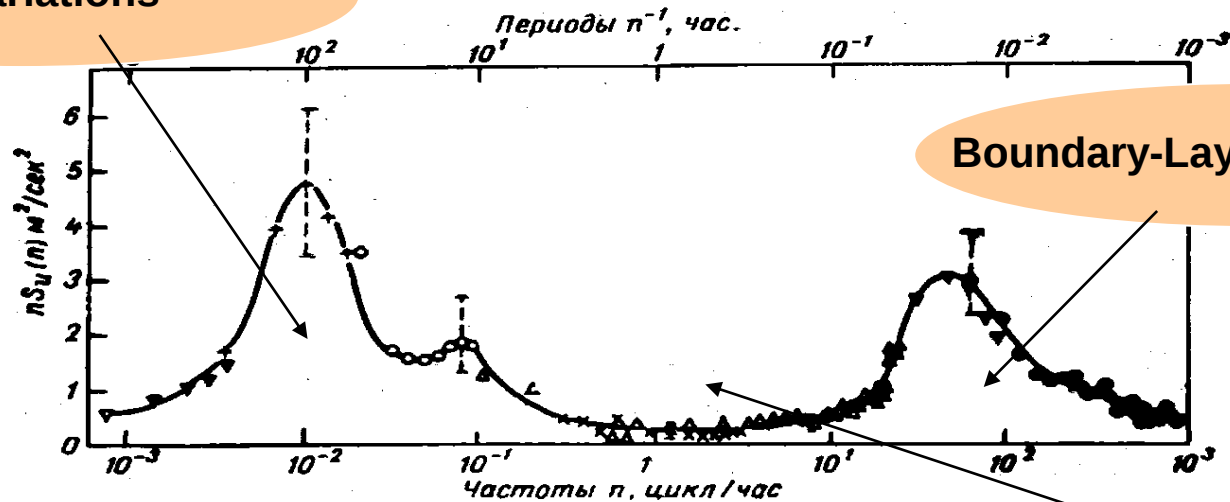
“GRAY ZONE”

FROM “The theoretical view”

Two traditional modeling methods of turbulent flows
according to the ratio Δ/l



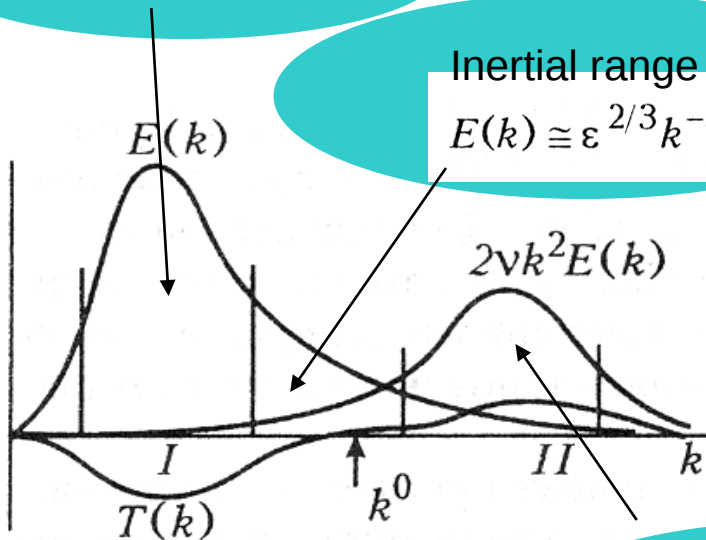
Synoptic variations



Спектр скорости ветра в приземном слое атмосферы (по Ван дер Ховену (1957), n — частота, $S_u(n)$ — спектральная плотность).

Boundary-Layer turbulence

Energy range



Inertial range

$$E(k) \cong \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

Mesoscale processes

$$a(x_i, t) = \tilde{a}(x_i, t) + a'(x_i, t) + a''(x_i, t)$$

$$\bar{a}(x_i, t) = \int G(x_i - x'_i) a(x'_i, t) dx'_i$$

$$\bar{a}(x_i, t) = \tilde{a}(x_i, t) + a'(x_i, t)$$

Dissipation range

Три подхода к численному моделированию турбулентности

1. Прямое численное моделирование (в англоязычной литературе – **direct numerical simulation, DNS**).

Численно решаются системы алгебраических уравнений, с высокой точностью аппроксимирующие исходную систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса. Этот метод требует детального пространственно-временного разрешения и, следовательно, ведет к большим вычислительным затратам. Поэтому DNS редко применяется в практических задачах и чаще всего служит инструментом для получения больших массивов данных о турбулентных потоках простой структуры.

2. Вихреразрешающее моделирование (**Large Eddy Simulation, LES**).

Основой вихреразрешающего моделирования турбулентных потоков с очень большими числами Рейнольдса ($Re \gg 1$) является подтверждаемая экспериментально гипотеза о независимости статистических характеристик крупномасштабных турбулентных движений от молекулярной вязкости. Согласно этому предположению, возможно построение численной модели, явно описывающей нестационарную динамику только относительно крупных вихрей (вихрей, вносящих основной вклад в энергию турбулентного потока и определяющих взаимодействие турбулентности со средним движением). Влияние мелкомасштабной турбулентности учитывается при помощи турбулентных замыканий.

3. Решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (**Reynolds averaged Numerical Simulation, RANS**). В данном случае модель воспроизводит только средние значения скорости (и, при необходимости, скалярных величин, например температуры, влажности воздуха, концентрации примеси), а влияние всех флуктуаций учитывается при помощи турбулентных замыканий. Под осреднением в RANS понимается осреднение по ансамблю состояний. В силу предполагаемой эргодичности и в случае наличия статистически однородных направлений модели RANS могут быть не только трехмерными, но и двумерными и одномерными. Последние, как правило, используются в качестве блоков, параметризующих турбулентность в геофизических пограничных слоях в глобальных, региональных и мезомасштабных моделях атмосферы и океана.

Система уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + F_i^e,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

Прямое численное моделирование

(Direct Numerical Simulation, DNS)

$$F(a(x, t)) \equiv \bar{a}(x, t) = \int_{R^3} G(x - x', \Delta_f) a(x', t) dx'$$

Фильтрация по пространству

$$\overline{\frac{\partial a(x, t)}{\partial x_i}} = \frac{\partial \bar{a}(x, t)}{\partial x_i}; \quad \overline{\frac{\partial a(x, t)}{\partial t}} = \frac{\partial \bar{a}(x, t)}{\partial t}$$

Сводит исходную систему к системе с меньшим количеством степеней свободы

Вихреразрешающее моделирование (Large Eddy Simulation, LES)

Для очень больших чисел Re

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \bar{F}_i^e,$$

1. Влиянием молекулярной вязкости на крупные вихри можно пренебречь

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

2. Необходимо найти турбулентное замыкание

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j.$$

$$\tau_{ij} \approx T_{ij}(\bar{u}_k, \bar{u}_l, \bar{u}_m)$$

Центральная проблема LES

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = -\bar{u}_i \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_i} - \frac{\partial \sigma_i^s}{\partial x_i} + \bar{Q}^s$$

$$\sigma_i^s = \overline{s u_i} - \bar{u}_i \bar{s}$$

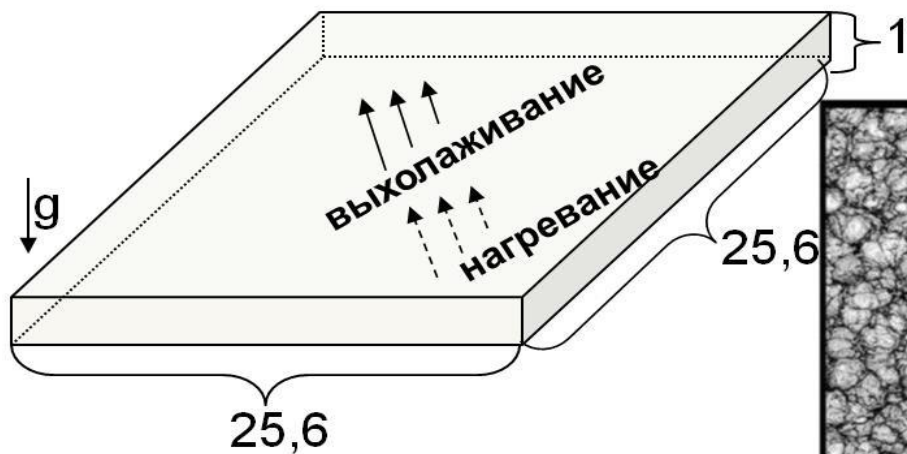
Аналогичная задача для скаляров (температура, влажность воздуха, концентрации газовых примесей)

Glazunov A.V., Dymnikov V.P., Lykossov V.N. Mathematical modelling of spatial spectra of atmospheric turbulence. – Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2010, v. 25, no. 5, p. 431–451.

С помощью вихреразрешающей (LES) модели исследована (с точки зрения воспроизведения спектральных свойств) **термическая конвекция Рэлея-Бенара** в двояко-периодическом канале с твердыми стенками как аналог многомасштабной атмосферной турбулентности.

Большое **отношение его горизонтального размера к вертикальному (26:26:1)** обеспечило существование квазидвумерных крупномасштабных компонент течения, а размер равномерной расчетной сетки в несколько **десятков миллионов узлов** позволил явно воспроизвести динамику мелкомасштабной трехмерной турбулентной составляющей.

Декомпозиция изучаемого турбулентного течения на **баротропную** (осредненную по вертикали) и **бароклинную** компоненты позволила предложить схему преобразований кинетической энергии в изучаемой системе, объясняющую некоторые спектральные свойства наблюдающейся атмосферной турбулентности.



Турбулентная конвекция Рэля-Бенара

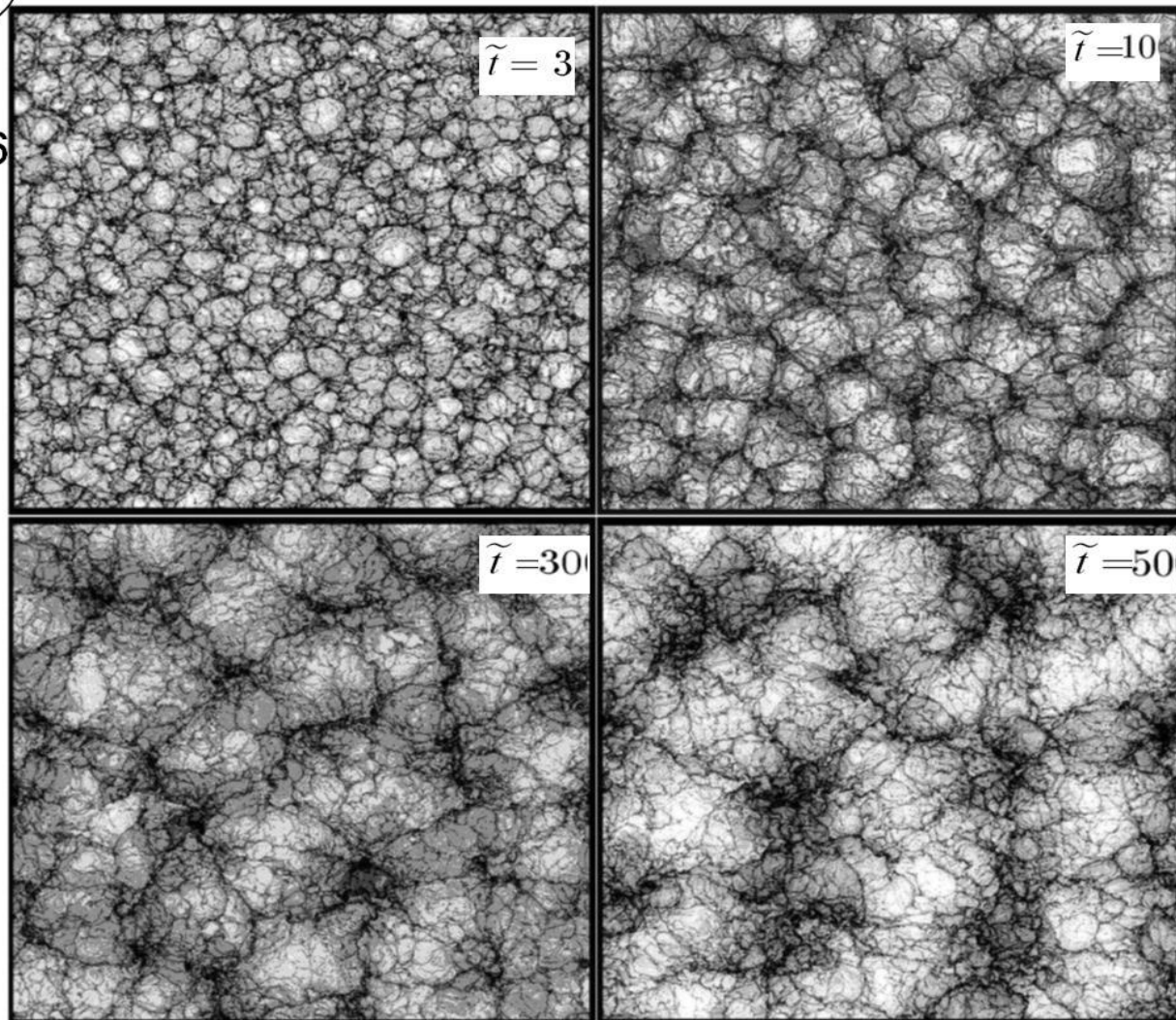
Равномерная сетка
1024x1024x40

Большое отношение
горизонтального размера расчетной
области к вертикальному
обеспечивает (L_1/L_3) существование
квазидвумерных мод.

Шаг сетки достаточен для
воспроизведения инерционного
интервала трехмерной
турбулентности.

$$t_* = L_3/w_* = (L_3^2/\alpha H)^{1/3}$$

$$\tilde{t} = t / t_*$$

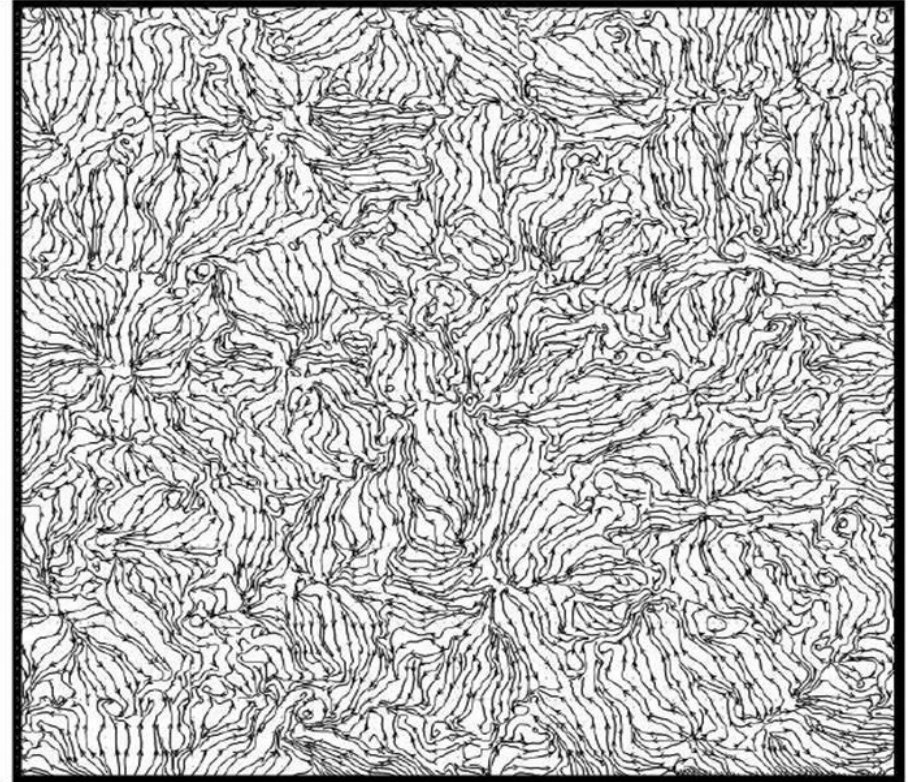
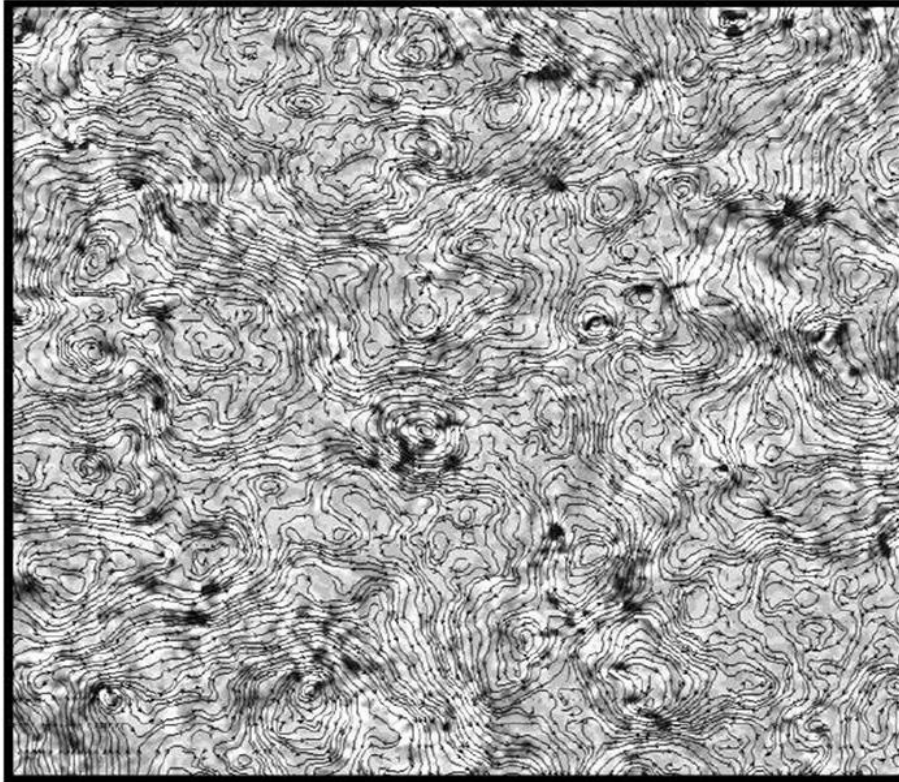


Потенциальная температура на $z = L_3/8$

Для конвективного АПС с $H \sim 100$ Вт/м² $L_3 \sim 1$ км:
аномалии с горизонтальным масштабом ~ 10 км,
характерным временем ~ 15 час.

Баротропная и бароклинная компоненты течения

$$\begin{aligned}\tilde{u}_i &= F^{bt} u_i = \frac{1}{L_3} \int_0^{L_3} u_i dx_3, \quad (i = 1, 2), & u_i^{bc} &= u_i - \tilde{u}_i \\ \tilde{u}_3 &= 0,\end{aligned}$$



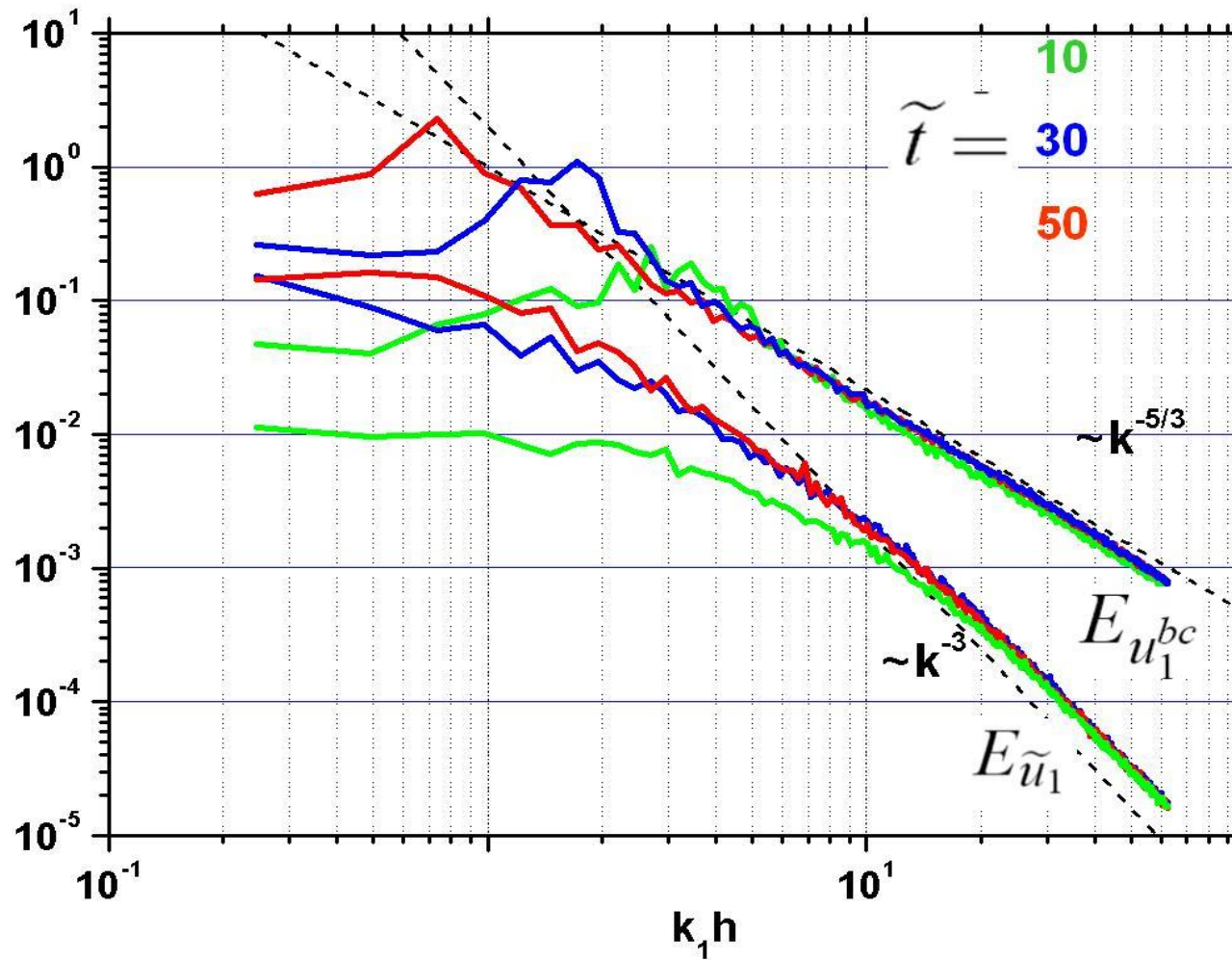
$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} &= -\frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial R_{ij}^{bc}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \widetilde{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{i3}(x_1, x_2, L_3) - \tau_{i3}(x_1, x_2, 0)}{L_3}, \\ \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} &= 0, \quad (i, j = 1, 2).\end{aligned}$$

$$R_{ij}^{bc} = \widetilde{u_i^{bc} u_j^{bc}}$$

Генерация энергии для
баротропной компоненты

$$P^{bt} = R_{ij}^{bc} \tilde{S}_{ij}$$

Одномерные однокомпонентные (u_1 вдоль x_1) спектры баротропной и бароклинной компонент скорости



$$E_{u_1}(k_1) = \int_{-k_2^{max}}^{k_2^{max}} E_{u_1}(k_1, k_2) dk_2, \quad k_2^{max} = \frac{\pi L_2}{\Delta x_2} \quad E_{u_1}(k_1, k_2) = \hat{u}_1(\mathbf{k}) \hat{u}_1^*(\mathbf{k})$$

Simple model of katabatic flow with suspended snow particles
(Idea: Kodama et al., 1985)

$$\frac{du}{dt} = (\lambda \vartheta - gC) \sin \alpha + f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial u}{\partial z},$$

$$\frac{dv}{dt} = (\lambda \vartheta - gC) \sin \beta - f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial v}{\partial z},$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} + S \left[(u - u_g) \sin \alpha + (v - v_g) \sin \beta \right] = \text{Pr} \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial \vartheta}{\partial z},$$

$$\frac{dC}{dt} - w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \text{Sc} \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial C}{\partial z},$$

$$\nu = \nu(\text{Ri}_C), \quad w_s > 0.$$

Стационарная аналитическая модель склонового течения с взвешенными частицами снега

$$(\lambda \vartheta - gC) \sin \alpha + \nu \frac{d^2 u}{dz^2} = 0,$$

$$-Su \sin \alpha + \text{Pr}^{-1} \nu \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} = 0,$$

$$w_s \frac{\partial C}{\partial z} + S m^{-1} \nu \frac{d^2 C}{dz^2} = 0,$$

$$u \rightarrow 0, \quad \theta \rightarrow 0, \quad C \rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow \infty,$$

$$u = 0, \quad \theta = \theta_0, \quad C = C_0 \quad \text{при } z = 0.$$

Стационарная аналитическая модель склонового течения с взвешенными частицами снега

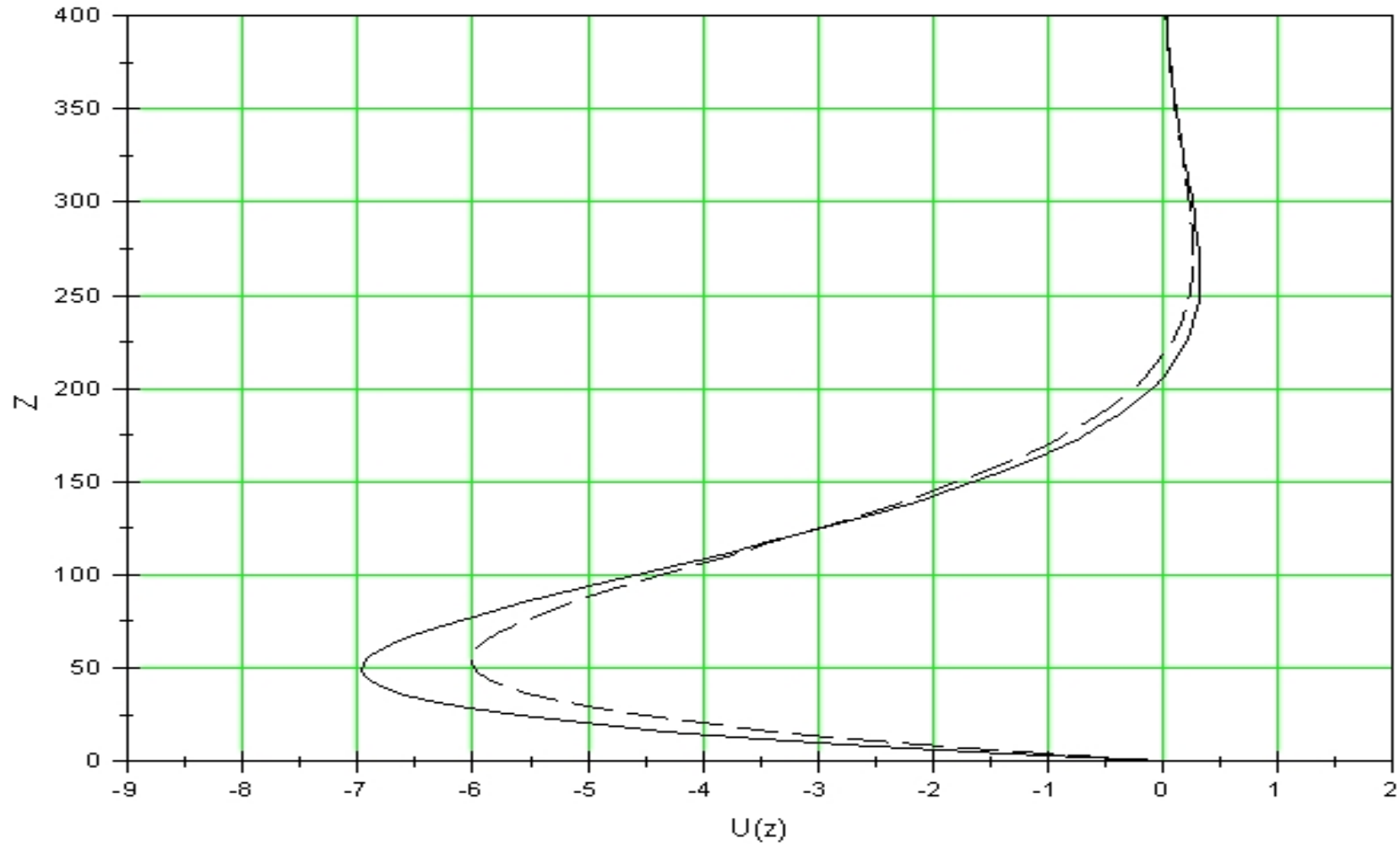
$$C(z) = C_0 e^{-z/d_C},$$

$$u(z) = c_u e^{-z/d_C} + \left[-c_u \cos(z/d) + (\theta_0 - c_\theta) \sqrt{\frac{\lambda}{S \text{Pr}}} \sin(z/d) \right] e^{-z/d},$$

$$\theta = c_\theta e^{-z/d_C} + \left[(\theta_0 - c_\theta) \cos(z/d) + c_u \sqrt{\frac{S \text{Pr}}{\lambda}} \sin(z/d) \right] e^{-z/d},$$

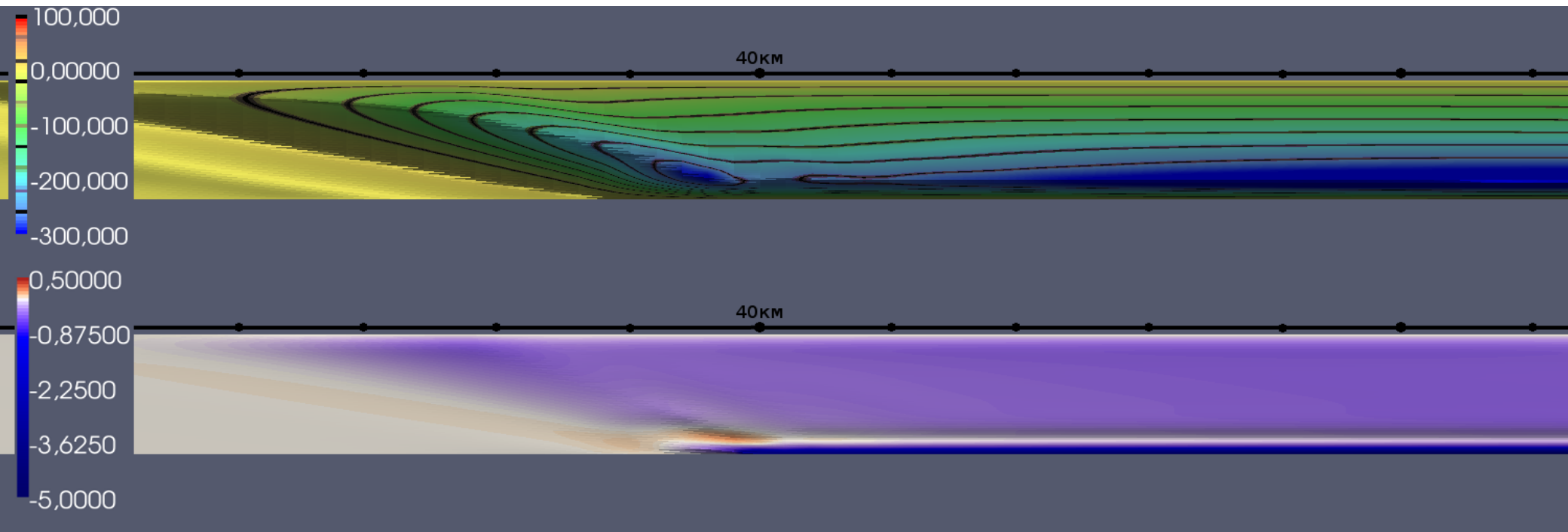
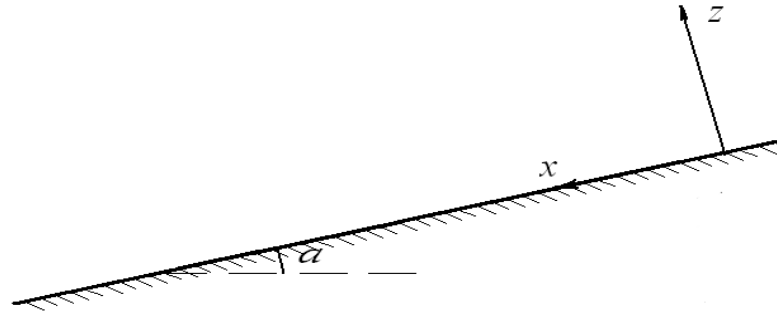
$$d = \sqrt[4]{\frac{4 \text{Pr}^{-1} \nu^2}{\lambda S \sin^2 \alpha}}, \quad d_C = \frac{S \text{m}^{-1} \nu}{w_s}, \quad c_u = \frac{g C_0 d_C^2 \sin \alpha}{(1 + 4 d_C^4 / d^4) \nu}, \quad c_\theta = \frac{g C_0 d_C^4 S \sin^2 \alpha}{(1 + 4 d_C^4 / d^4) \text{Pr}^{-1} \nu^2}.$$

Сравнение решений задачи Прандтля для скорости ветра с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктир) примеси

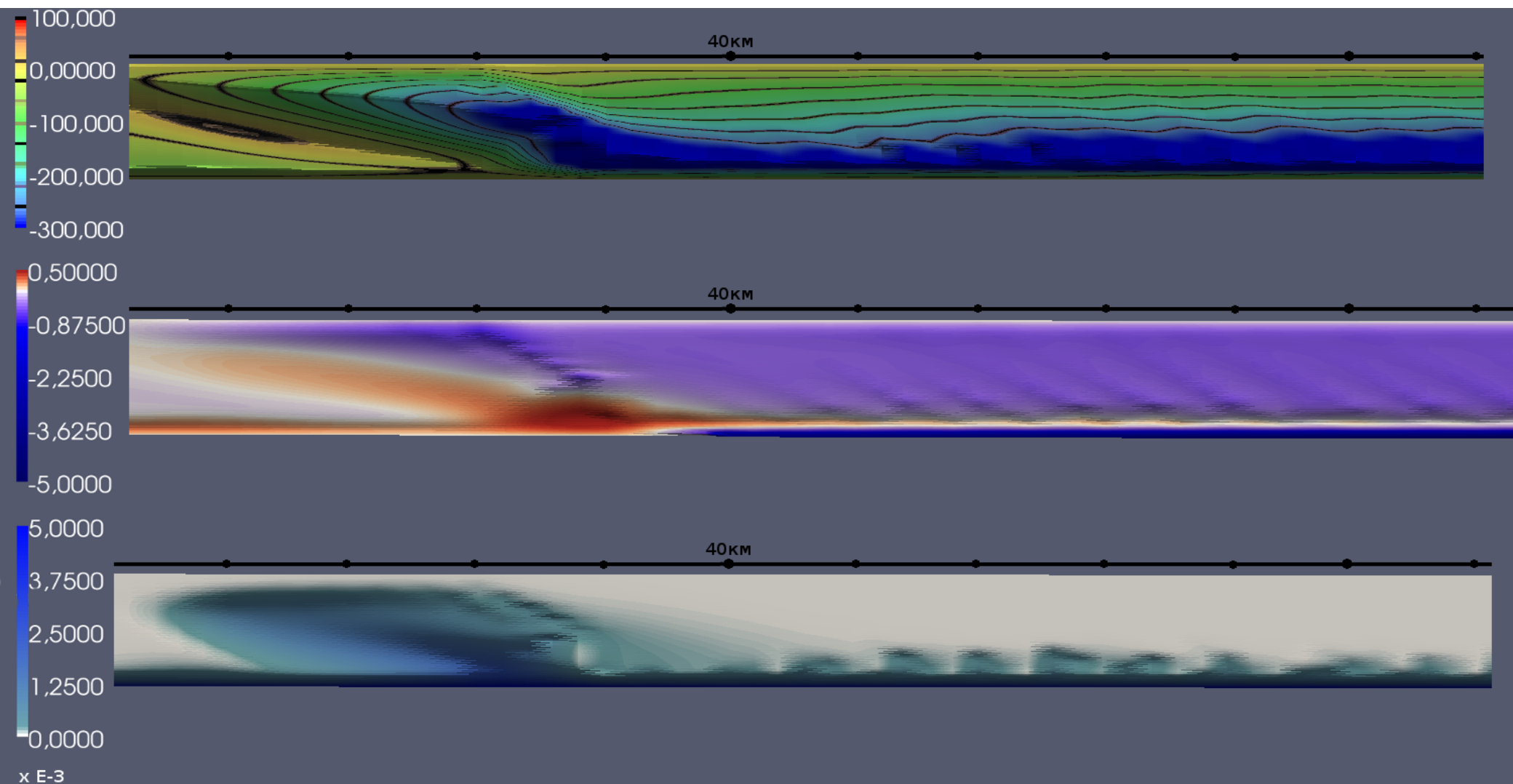


Двумерная задача (Русаев, 2011): эксперимент без частиц.

**Поля функции тока (верх) и отклонения потенциальной температуры (низ)
на момент модельного времени 6 час.**



Двумерная задача (Русаев, 2011): эксперимент с частицами.
Поля функции тока (верх), отклонения потенциальной температуры
(середина) и массовой концентрации частиц (низ) на момент модельного
времени 6 час.



Viroulet S. et al. Multiple solutions for granular flow over a smooth two-dimensional bump. - J. Fluid Mech. (2017), vol. 815, pp. 77-116

81

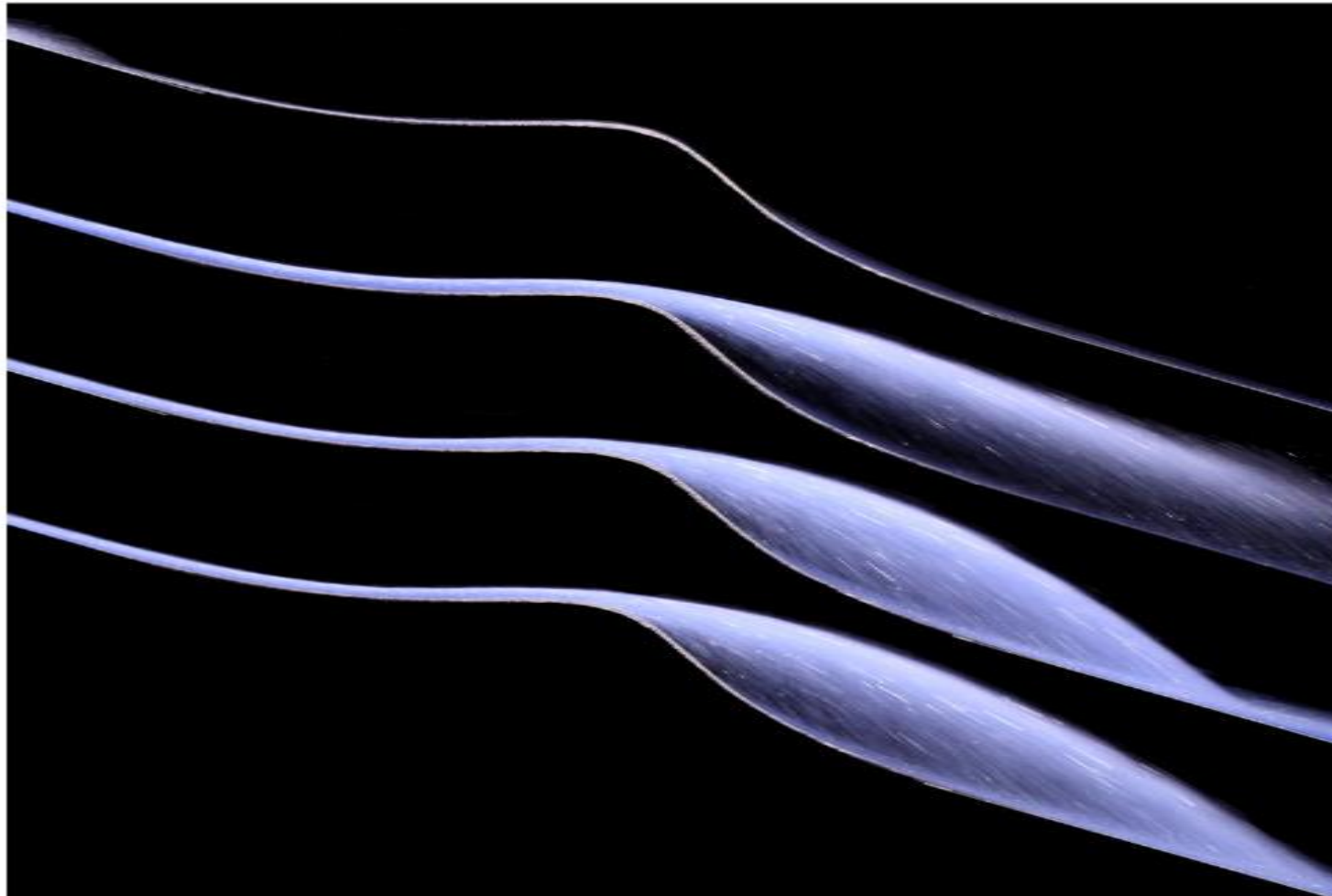
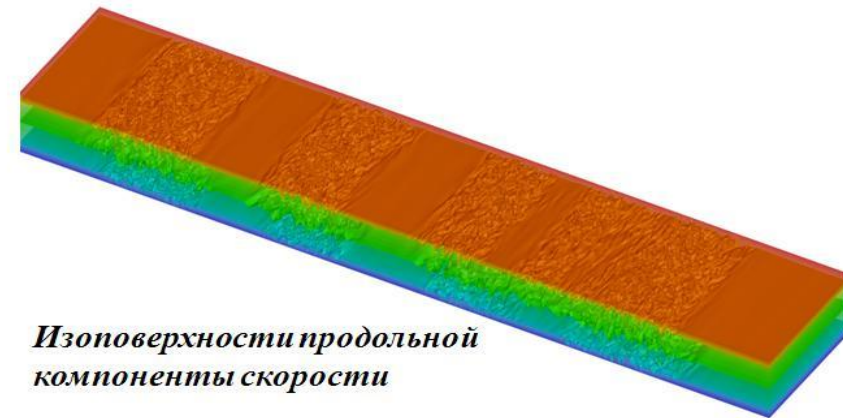


FIGURE 1. Snapshots of an experiment showing the time evolution of the jet to the steady state. As the oncoming material flows over the top of the bump it is able to detach from the base and follow ballistic trajectories, before landing and coming into contact with the chute once again. The experiment is performed at a constant slope angle $\theta = 39^\circ$ with pictures taken at approximate times $t = 0.3; 0.6; 0.9$ and 4.0 s. Note that the images have been slightly rotated to maximise space. The bump height of 4.75 cm acts as a scale. The time-dependent evolution is shown in supplementary movie 1, which is available online.

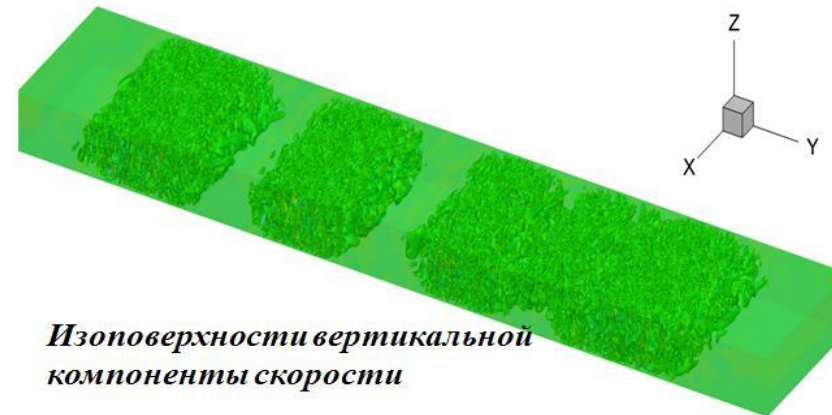
Структура турбулентного течения: режим сильной устойчивости

- Перемежающаяся турбулентность при сильной устойчивости
- Формирование вторичных структур в стратифицированной жидкости:
 - ответственны за поддержание турбулентности при числах Ричардсона, превышающих пороговое значение
 - поперечный размер валиков увеличивается при усилении стратификации – дополнительное ограничение на размер вычислительной области

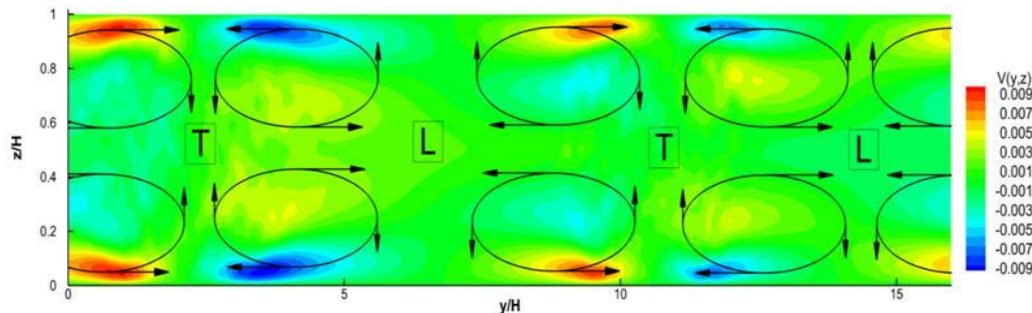
Глазунов А.В., Мортиков Е.В., Лыкосов В.Н.
Суперкомпьютерные технологии
математического моделирования
геофизической турбулентности. – Труды
конференции ВПМ-2017, г. Новосибирск



*Изоповерхности продольной
компоненты скорости*

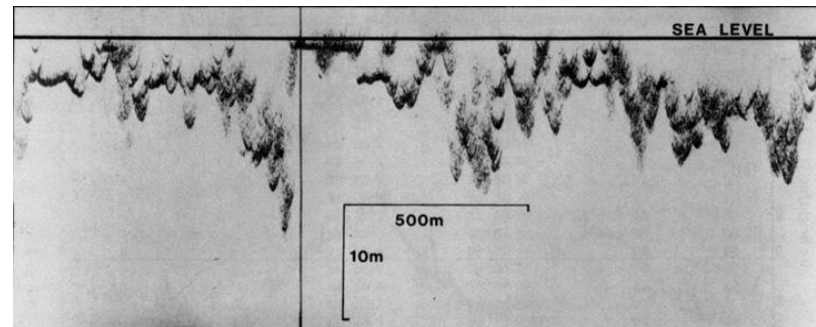


*Изоповерхности вертикальной
компоненты скорости*

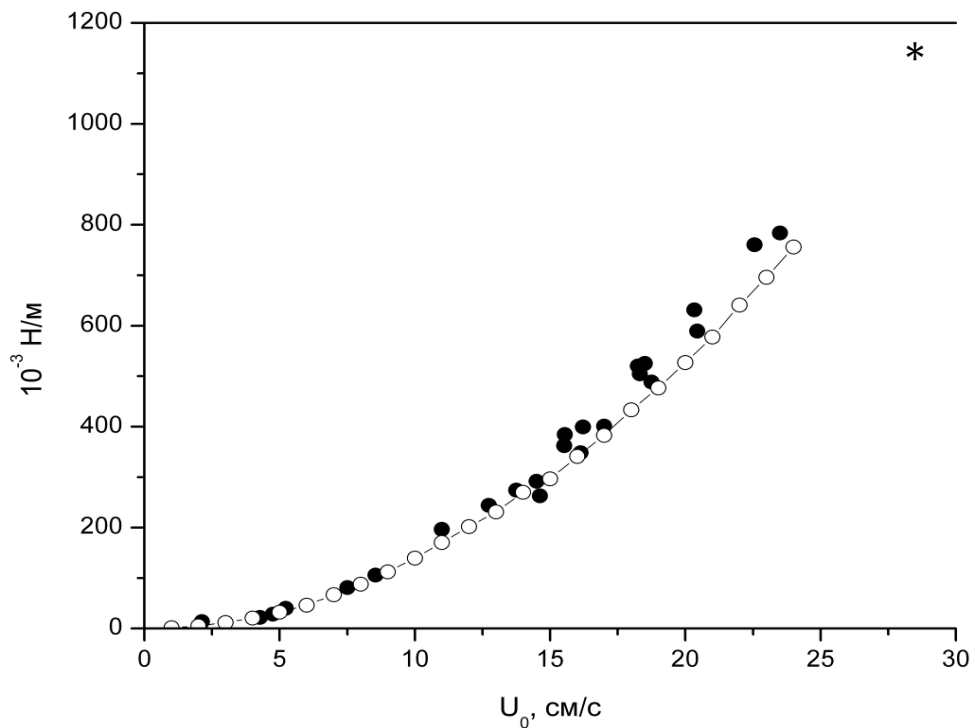


*L – ламинарная подобласть течения
T – турбулентная подобласть
течения*

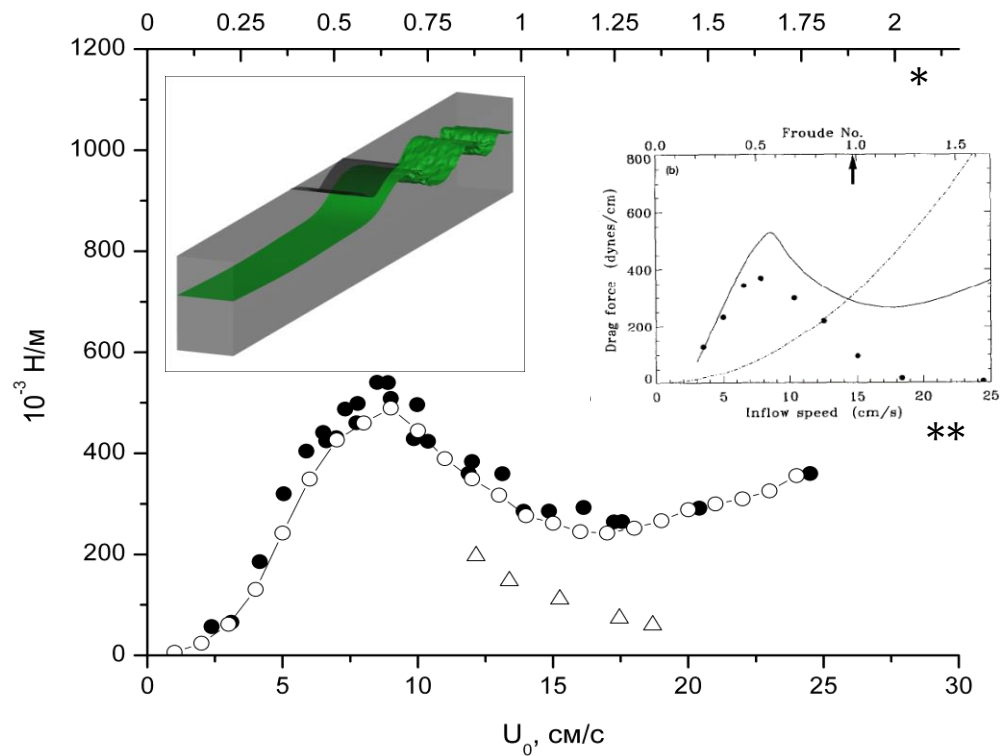
DNS. Численное моделирование движения ледяного кия Результаты расчета силы сопротивления



● Однородная жидкость



● Двухслойная жидкость



* данные лабораторных экспериментов [Pite et al., 1995]

** численная модель [Cummins et al., 1994]

Модели турбулентных течений, разработанные в ИВМ РАН и НИВЦ МГУ

	Отличительные особенности (вычислительные методы и параметризации)	Возможности	Программная реализация и параллельные вычислительные технологии
DNS	Метод погруженной границы.	Моделирование течений в областях сложной конфигурации, в том числе с подвижной границей.	C++ MPI OpenMP CUDA
	Консервативные конечно-разностные схемы высокого порядка точности.	Решение модельных задач для исследования фундаментальных свойств турбулентности.	
LES	Динамическая подсеточная модель.	Моделирование стратифицированных турбулентных течений при очень больших числах Рейнольдса на достаточно грубых сетках без необходимости подбора параметров.	FORTRAN MPI
	Блок расчета лагранжева переноса трассеров.	Изучение турбулентности и крупных организованных структур в ПСА. Моделирование и изучение турбулентности в городской среде. Задачи переноса примесей.	

Исследование процессов взаимодействия атмосферного пограничного слоя умеренных и высоких широт с деятельным слоем суши и водоемами: разработка параметризаций для моделей Земной системы (грант РФФИ № 17-17-01210, май 2017 г. – декабрь 2019 г.)

Теоретические и экспериментальные работы по изучению:

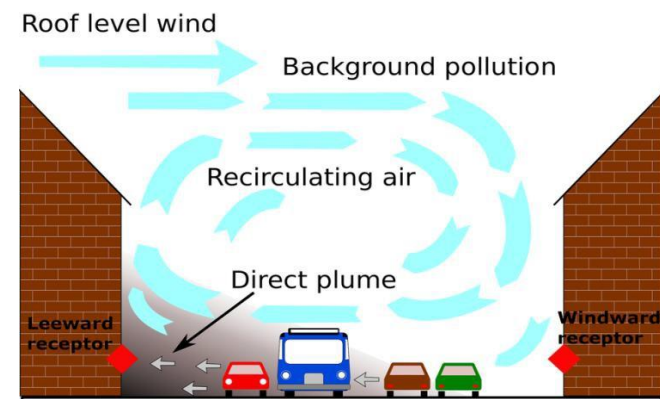
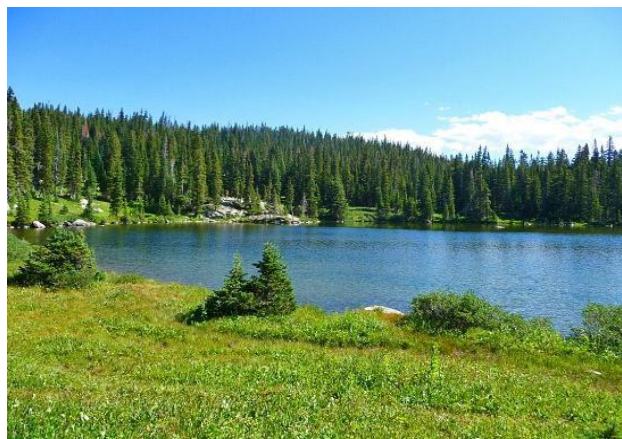
- турбулентной динамики и структуры атмосферного пограничного слоя над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью;
- взаимодействия турбулентности и взвешенных частиц (в частности, снежных) в атмосферном пограничном слое (образование двухфазных стратифицированных турбулентных течений);
- термического режима, динамики парниковых газов и энергомассообмена в системе «пограничный слой атмосферы – деятельной слой суши/водоём».

Неоднородные ландшафты



Границы “лес-поле”,
побережья – **одна прямая**
или обратная ступенька

Водоёмы, окружённые
лесами, лесные поляны –
замкнутые открытые
пространства



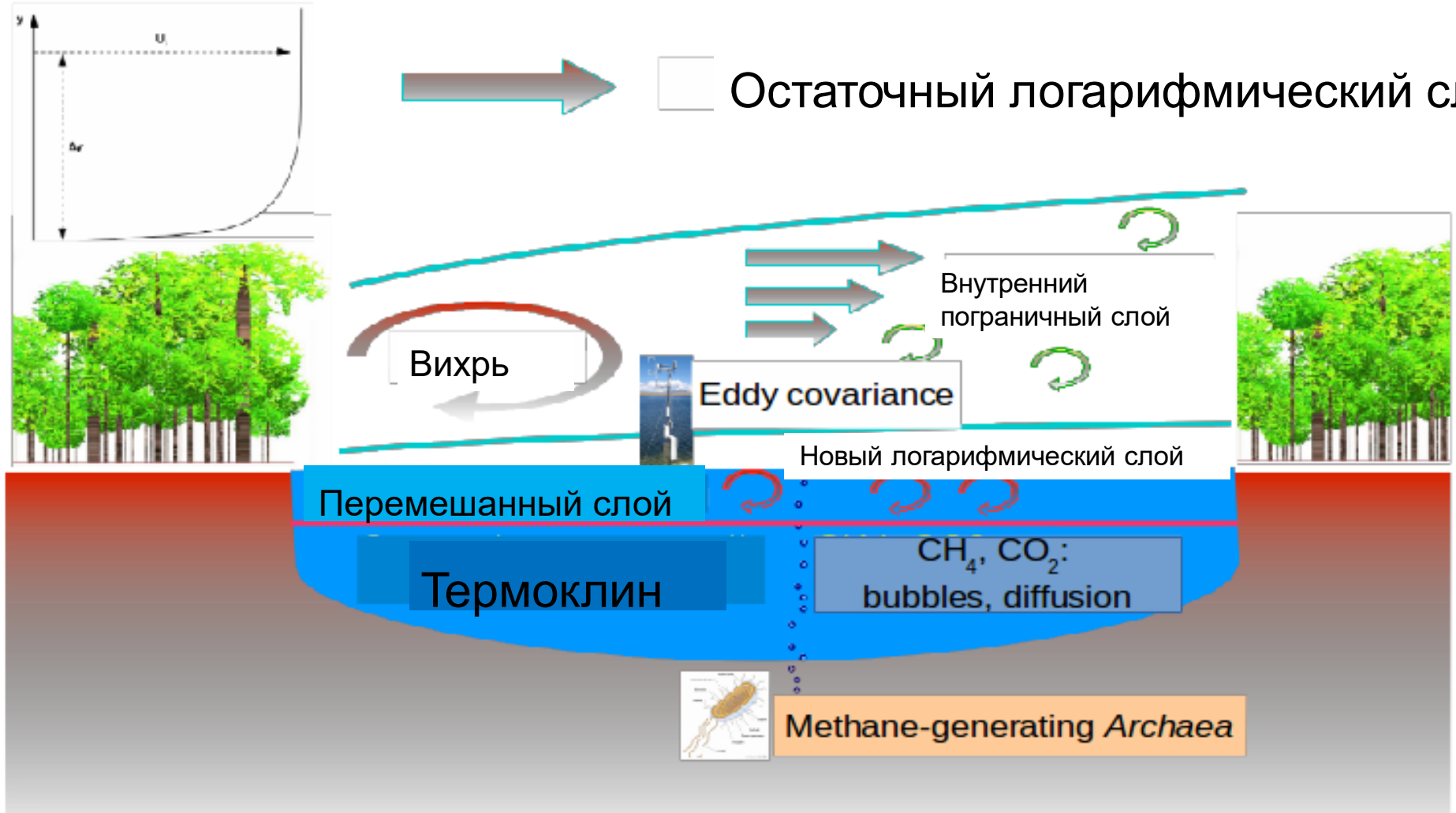
Городские улицы –
каньоны

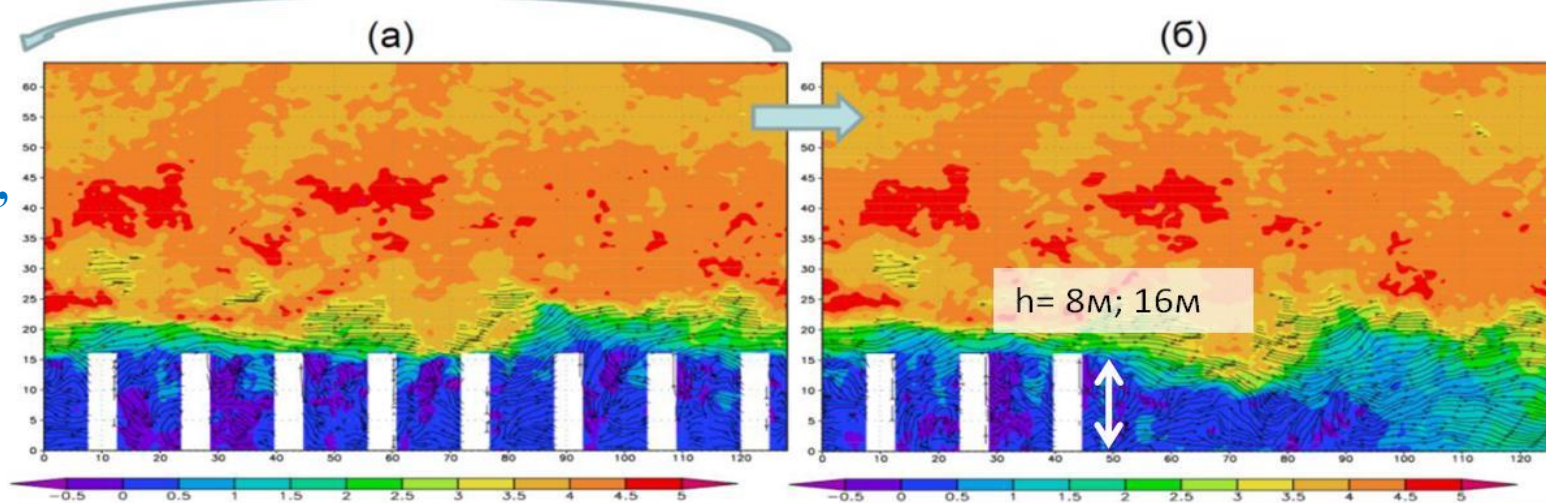
- Условия применимости теории подобия Монина – Обухова не выполнены
- Аналитические футпринт-модели для метода турбулентных пульсаций не разработаны
- Метод теплового баланса даёт только локальный поток тепла, не репрезентативный для ландшафта в целом

Пограничный слой над озером

Логарифмический слой

Остаточный логарифмический слой

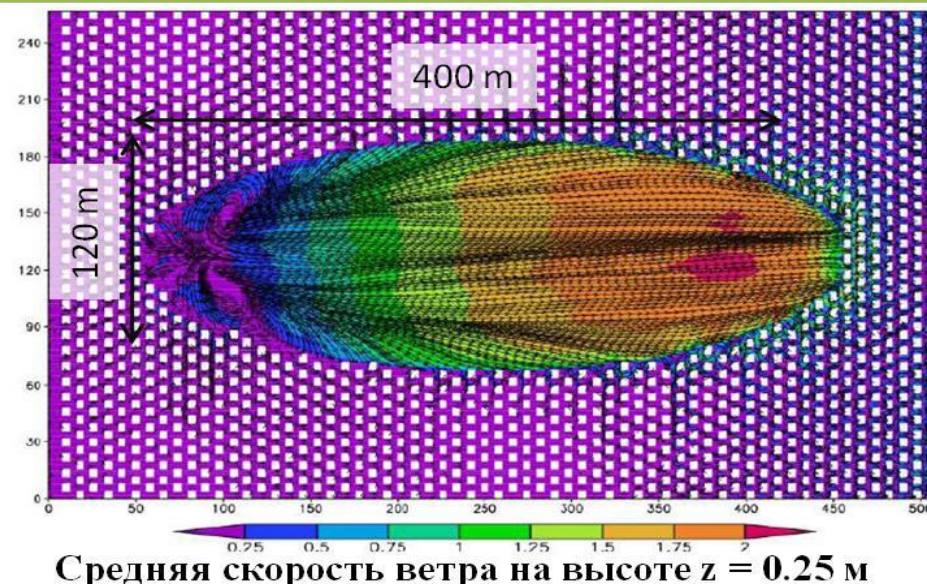
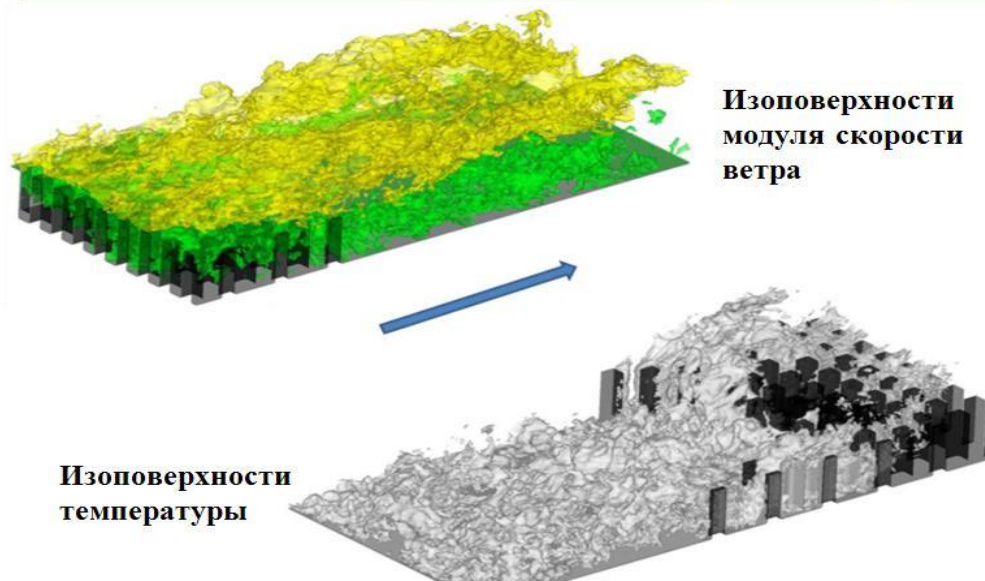




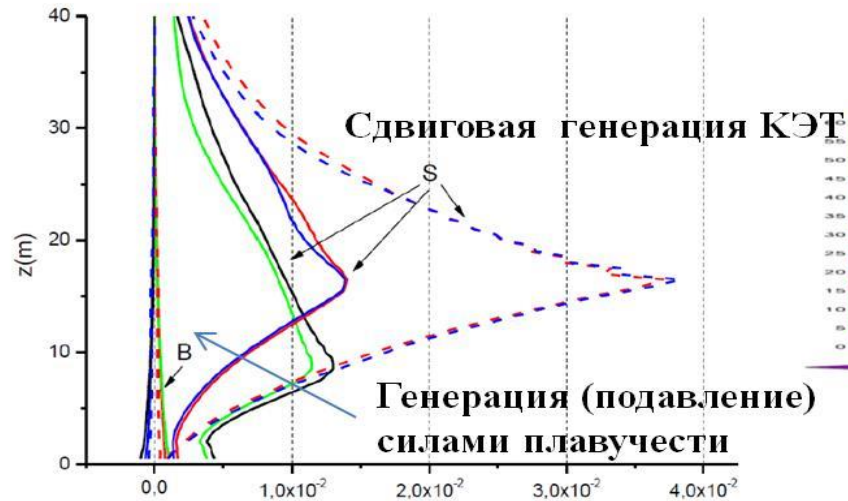
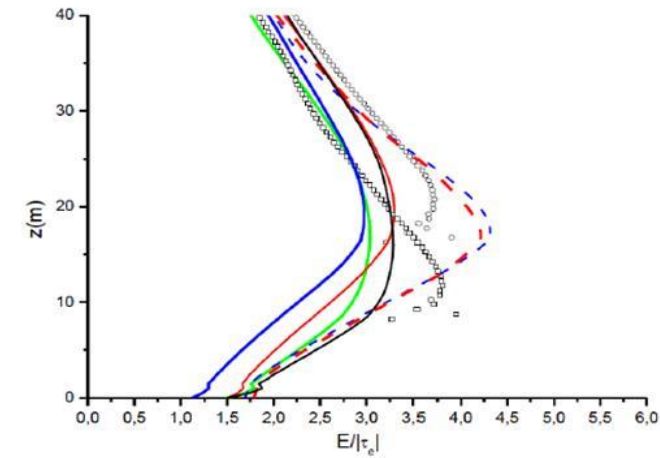
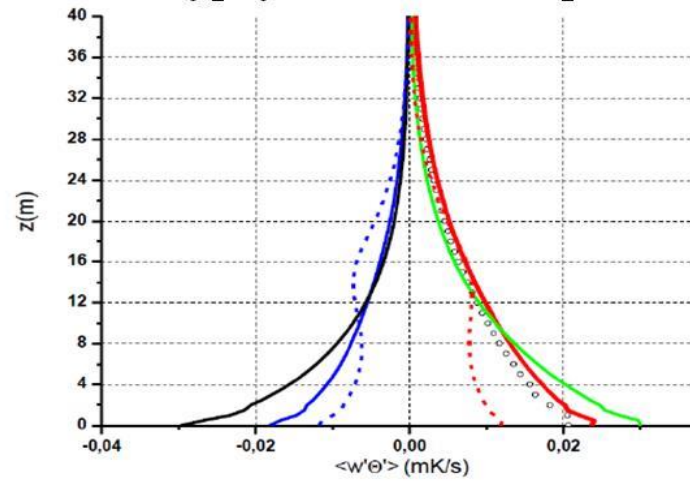
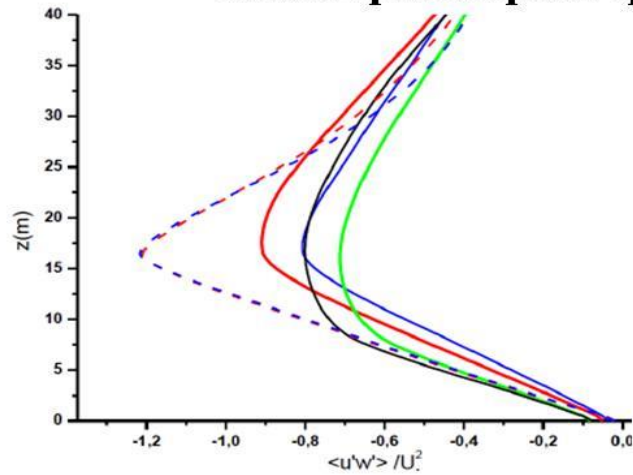
Турбулентный поток генерируется вспомогательной моделью (а) с двоякопериодическими граничными условиями и с заданным массивом объектов на поверхности. Значения z_{0w} и D соответствуют типичным значениям для лесной растительности.

Непериодическая расчетная область (б), включающая “озеро”: $z_{0l} = 10^{-4}$ м,
 $T_s^{\text{lake}} = T^{\text{air}} \pm 5^\circ\text{C}$

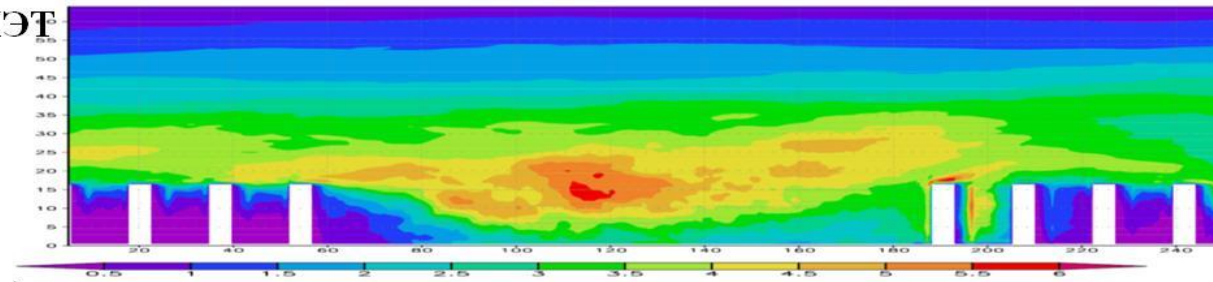
Шаг сетки $\Delta = 0.5$ м, $1024 \times 512 \times 128$ узлов, время интегрирования: 1 час, $\Delta t = 0.025$ секунд



Некоторые характеристики турбулентности, осредненные по всей площади «озера»



Кинетическая энергия турбулентности (КЭТ)



- Слой постоянных потоков отсутствует (существенная часть тепла и влаги переносится над озером в горизонтальном направлении).
- Очень слабая чувствительность к стратификации (теория подобия Монина – Обухова неприменима для вычисления турбулентных потоков над «озером»).

О ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД ПОВЕРХНОСТЯМИ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

К.В. Барсков^{*,**}, А.В. Глазунов^{***,**}, И.А. Репина^{*,**}, В.М. Степаненко^{**},
В.Н. Лыкосов^{***,**}, И. Маммарелла^{****}

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

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

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

*****Department of Physics, University of Helsinki, Finland*

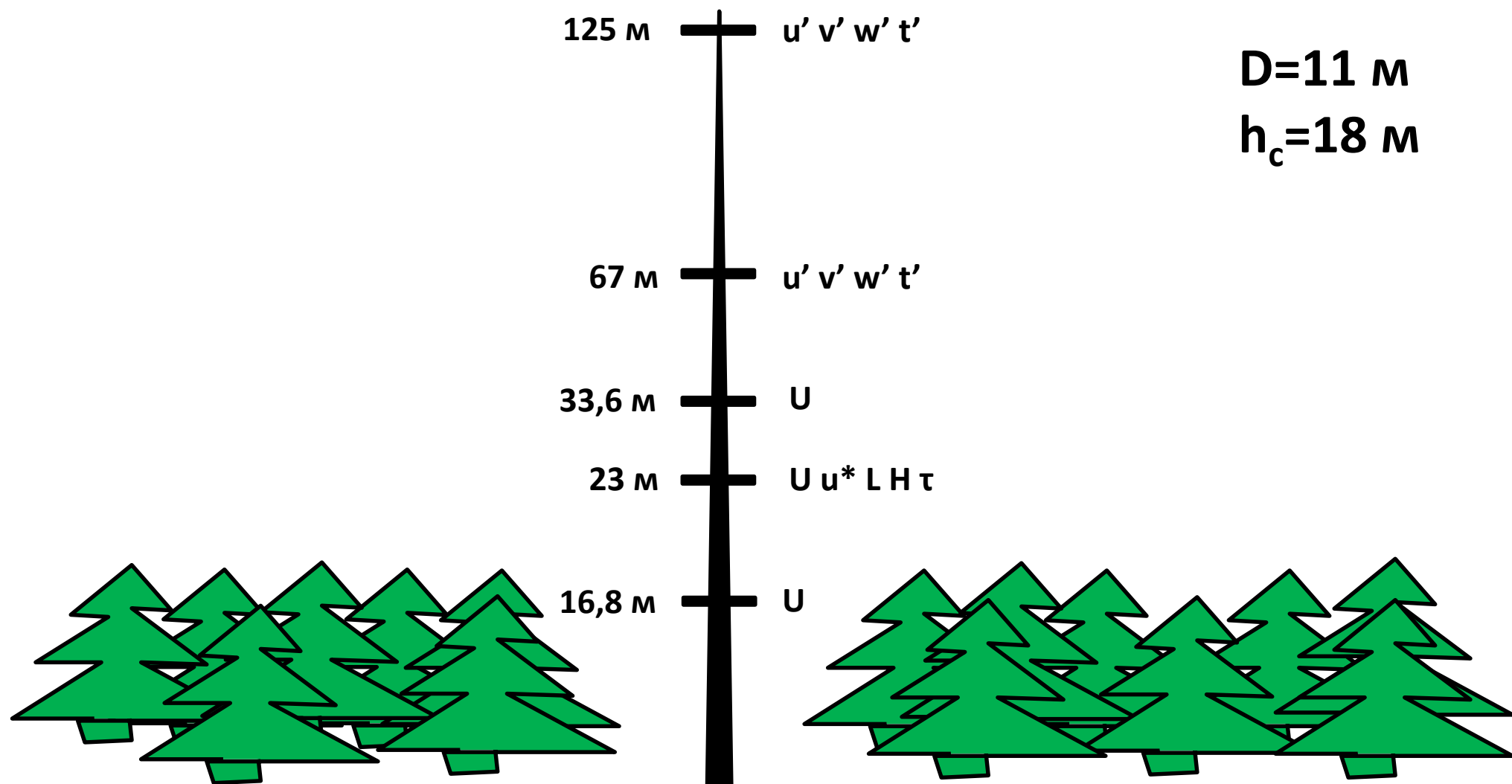
(Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2018, т. 54, № 5)



ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНУТРИ ЛЕСА И НАД ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

- Учет процессов в биосфере при моделировании глобальных изменений климата
- Расчет переноса аэрозолей и газовых примесей
- Прогноз неблагоприятных погодных явлений
- Разработка аналитических и численных моделей динамики атмосферного пограничного слоя
- Развитие ветроэнергетики

Измерения: Нууттала, 01.09.15-03.03.16



ПОТОКОВО-ГРАДИЕНТНОЕ СООТНОШЕНИЕ В УСТОЙЧИВОМ АПС НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ С КРУПНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ

$$\Phi_m(\xi) = \frac{d\langle U \rangle}{dz} \frac{\kappa(z - D)}{u_*} \approx a(\gamma) + C_m \xi$$

$\langle U \rangle$ - средняя скорость ветра в направлении течения

$\xi = \frac{\kappa(z-D)}{\Lambda}$ - параметр устойчивости

Λ - масштаб длины Обухова на высоте измерений z

$u_* = |\tau|^{1/2}$ - динамическая скорость на высоте измерений z

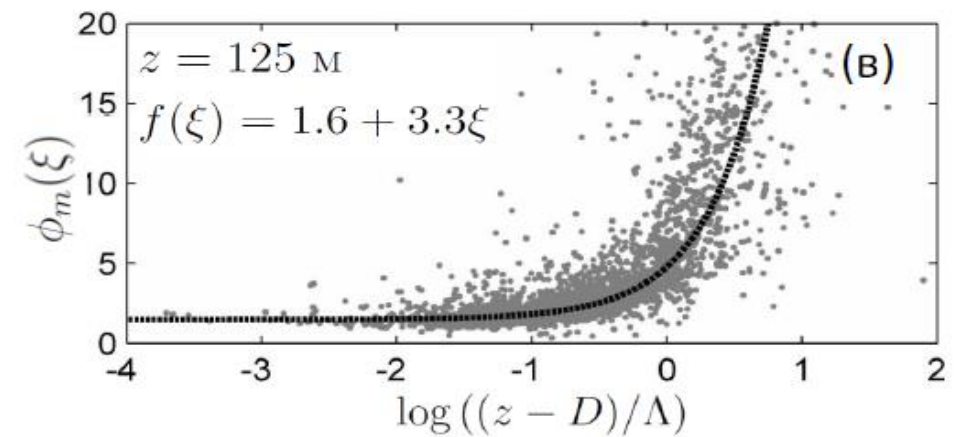
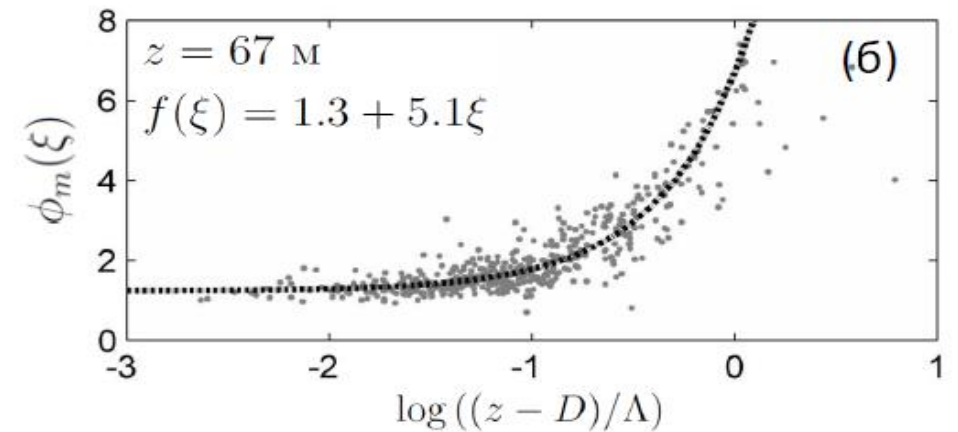
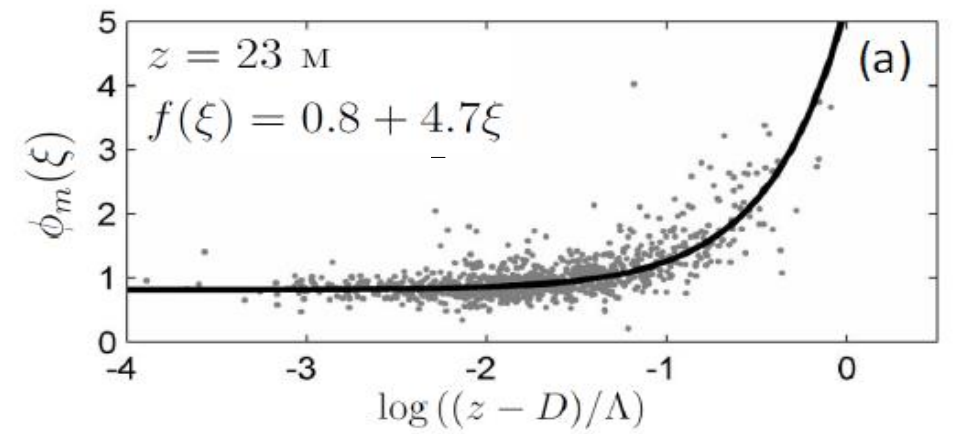
H - высота АПС

D - высота вытеснения

$\gamma = (z - D)/H$

$a(\gamma) = \text{const} \approx 1$

$C_m \approx 5$ - коэффициент, определяемый эмпирически



ГИПОТЕЗА

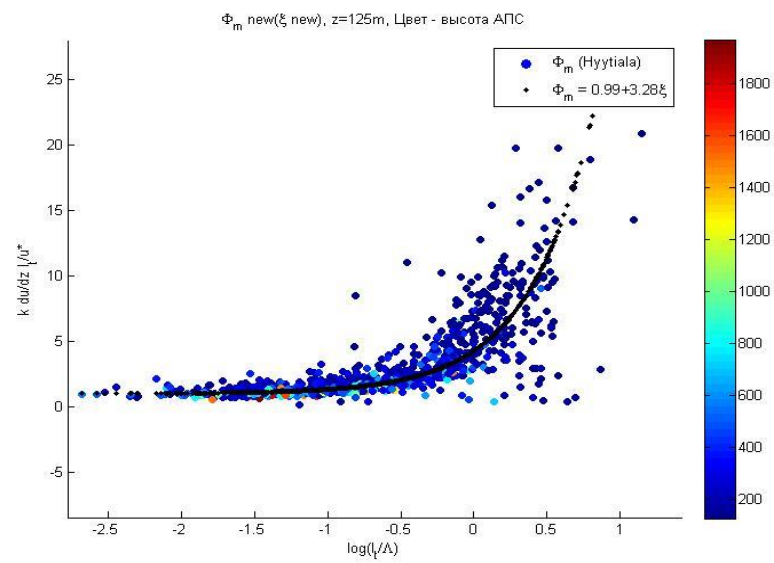
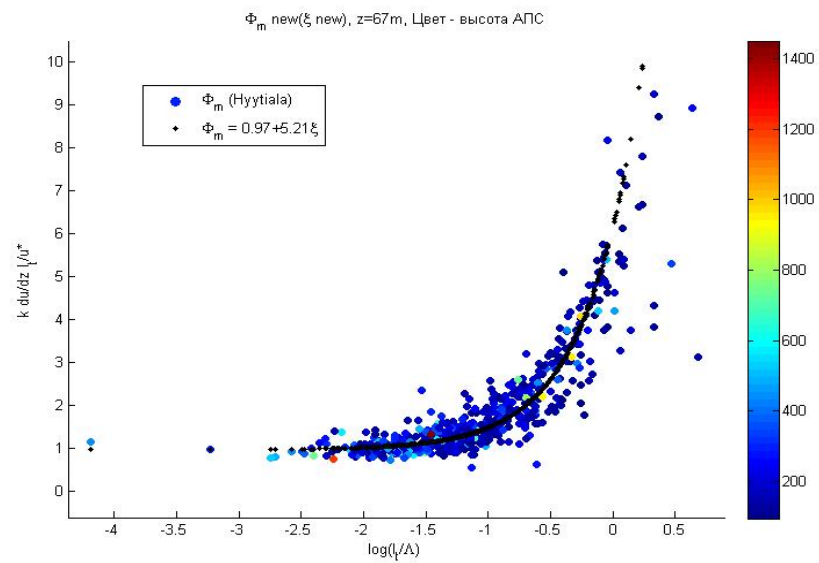
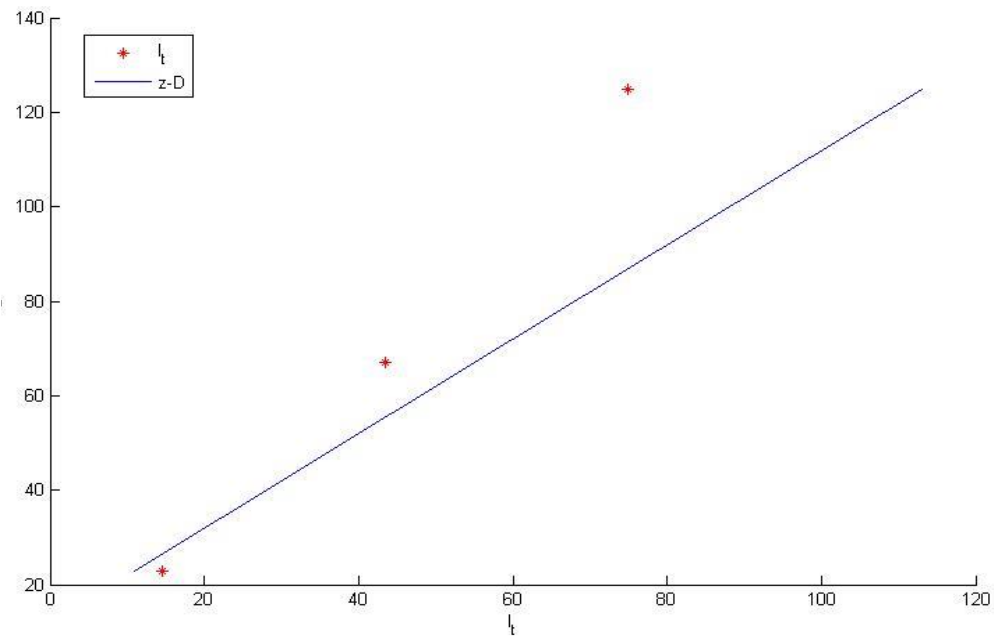
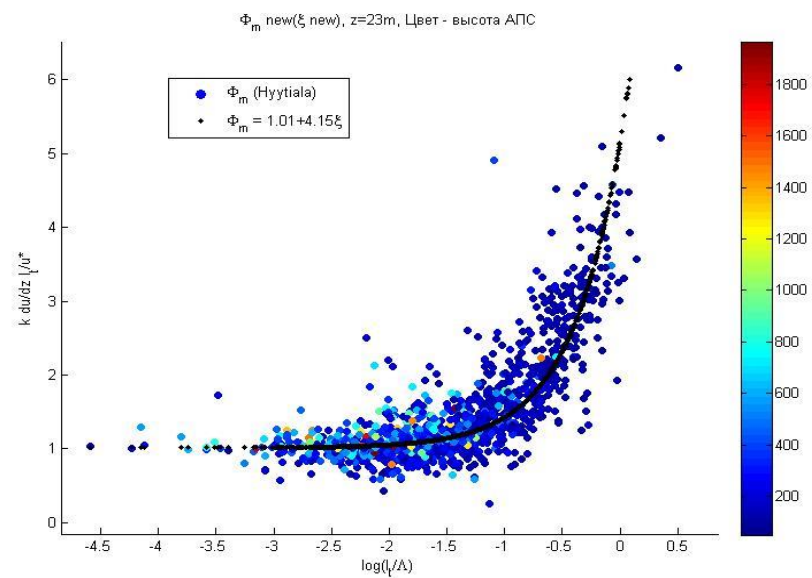
Новый масштаб турбулентности при нейтральной стратификации, определяемый рельефом:

$$\kappa(z - D) \rightarrow l_t^b = \kappa(z - D) / a(\gamma)$$

$$\phi'_m(\xi') = \frac{d\langle U \rangle}{dz} \frac{l_t^b}{u_*}$$

$$\phi'_m(\xi') \approx 1 + C'_m \xi'$$

Гипотеза: C'_m для турбулентных течений над разными типами поверхностей не является функцией параметров, определяющих аэродинамические свойства этих поверхностей, и в пределах нижней части устойчивого АПС сохраняет постоянное значение.



КОРРЕКЦИЯ ГРАДИЕНТА СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ВБЛИЗИ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ АПС

$$|\tau(z)|/U_*^2 \approx (1 - z/H)^{3/2}, \quad F_b(z)/F_b|_{z=0} \approx (1 - z/H)$$

$$l_t^B = \langle U_* / \frac{d\langle U \rangle}{dz} \rangle$$

$$l_t^{nb} \approx l_t^B |\tau|^{1/2} / U_*$$

$l_t^g = \frac{l_t^{nb}}{1 + C_m l_t^B / L}$ - связан с потоками на поверхности, отвечает за крупные вихри с размерами, сравнимыми с высотой z .

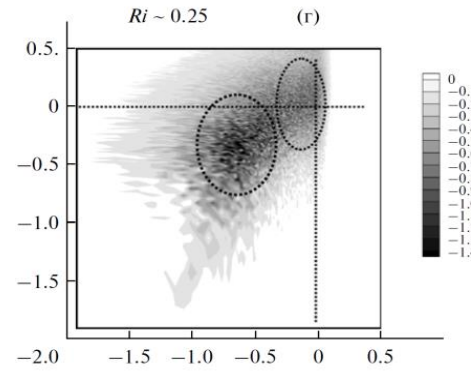
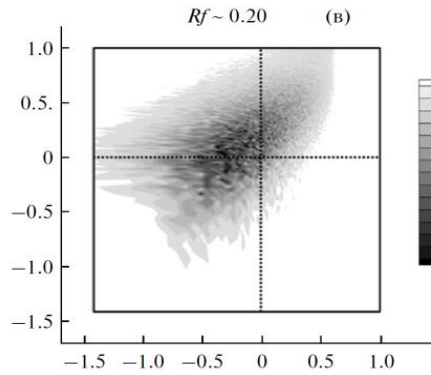
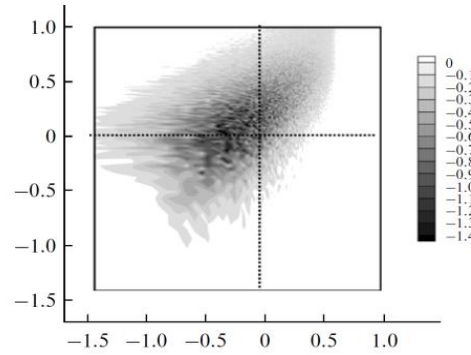
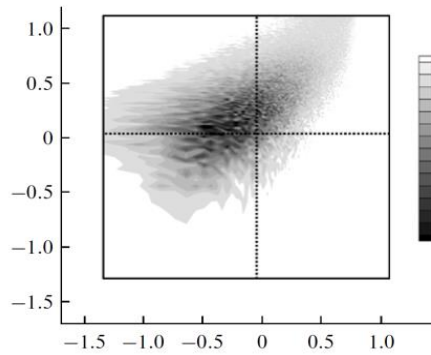
$l_t^s = \frac{l_t^{nb}}{1 + C_m l_t^{nb} / \Lambda}$ - учитывает локальные значения потоков плавучести и импульса, связан с мелкомасштабной сдвиговой турбулентностью, сгенерированной на высоте измерений.

$$l_t^{mix} = \left(C_1 \frac{1}{l_t^g} + C_2 \frac{1}{l_t^s} \right)^{-1} = \frac{C l_t^g l_t^s}{l_t^g + (C - 1) l_t^s}$$

$$1) \quad \frac{1}{l_t} \approx \frac{1}{\kappa(z-D)} + \frac{C_m}{\Lambda} \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{l_t} \approx \frac{1}{l_t^b} + \frac{C'_m}{\Lambda}$$

$$l_t^B = \left\langle U_* / \left/ \frac{d\langle U \rangle}{dz} \right/ \right\rangle$$

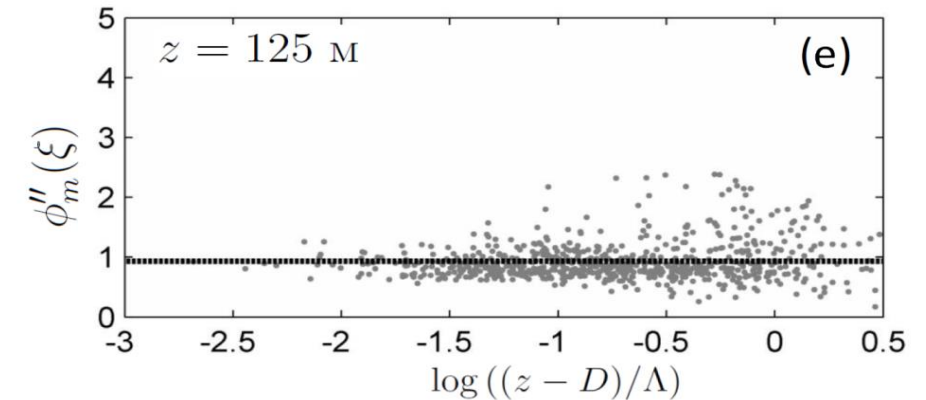
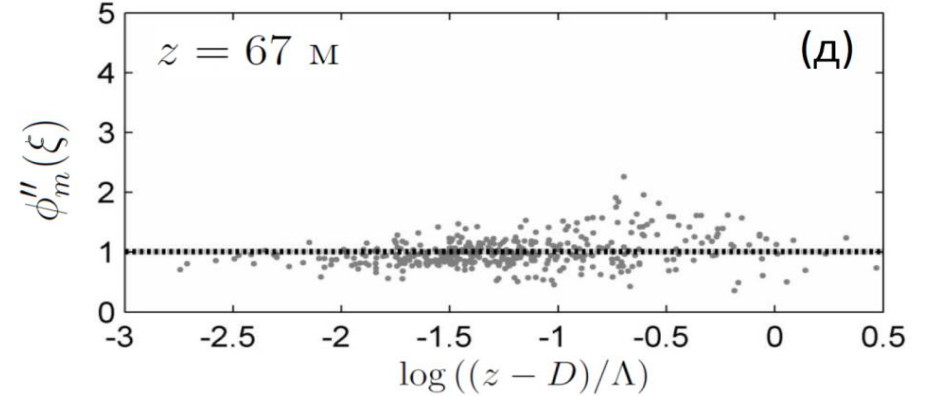
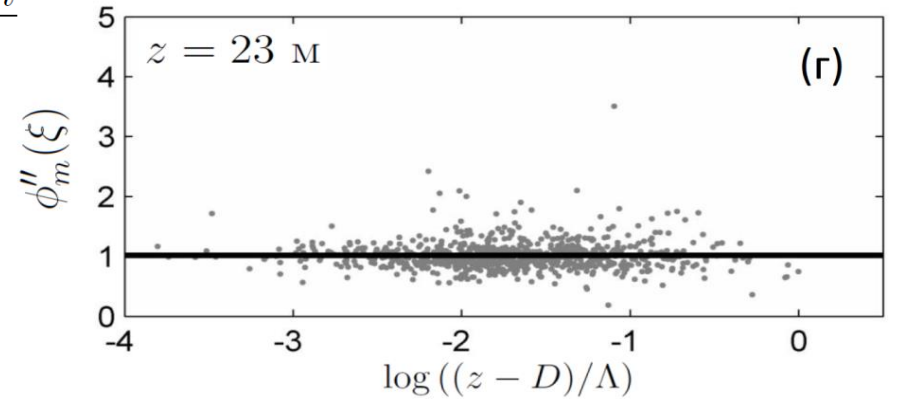
Осреднение по выборке
данных с нейтральной
стратификацией



$$2) \quad l_t^{mix} = \left(C_1 \frac{1}{l_t^g} + C_2 \frac{1}{l_t^s} \right)^{-1} = \frac{C l_t^g l_t^s}{l_t^g + (C - 1) l_t^s}$$

Масштаб, связанный с
потоками импульса и
плавучести на поверхности.

Масштаб, связанный с
потоками на высоте измерений



$$\phi_m'' = (d\langle u \rangle / dz) l_t^{mix} / u_*$$

Диагноз и численное моделирование динамики пограничного слоя атмосферы и состояния наземных экосистем Арктики в условиях антропогенной нагрузки (грант РФФИ № 18-05-60126; июнь 2018 г. – май 2021 г.)

Основные задачи проекта:

- создание новых вычислительных технологий многомасштабного моделирования турбулентных течений и переноса газовых и мелкодисперсных примесей в городской среде и в пограничном слое атмосферы над городом и его окрестностями;**
- диагноз накопления примесей, содержащих тяжелые металлы, в растительном покрове территорий, прилегающих к городу, на основе данных наблюдений (Надым, Норильск) и численного моделирования;**
- на основе данных дистанционного зондирования, натурных наблюдений и результатов численного моделирования оценка влияния урбанизации на эволюцию снежно-ледяного покрова окружающих территорий, ледовый и биогеохимический режим термокарстовых озёр;**
- разработка новых физически обоснованных параметризаций тепло- и влагообмена в моховом покрове, динамической и термической шероховатости и теплового баланса различных типов подстилающей поверхности, включая городскую среду.**

(Баренблатт, Голицын, 1974)

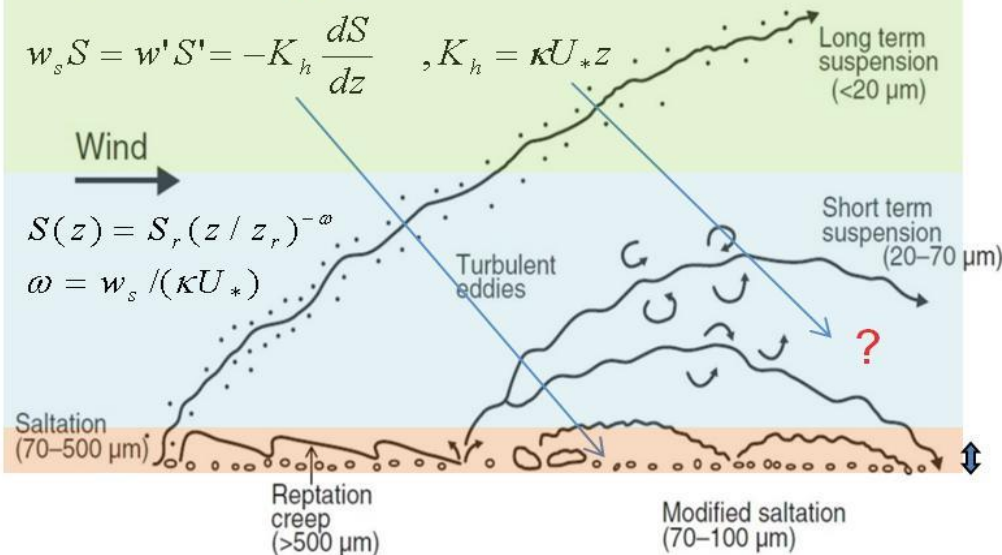
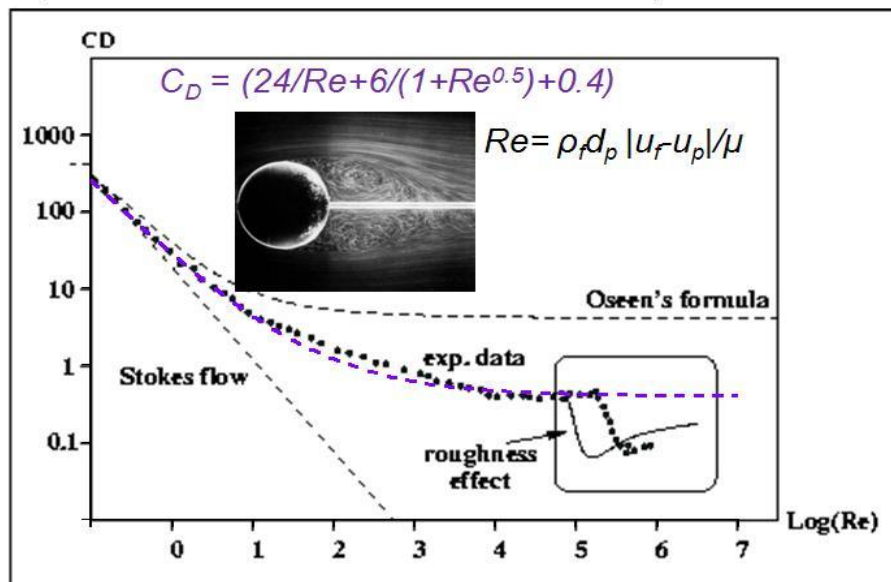


Figure 1.1. Schematic of the different modes of aeolian transport. Reprinted from Nickling and McKenna Neuman (2009), with kind permission from Springer Science+Business Media B.V.

$$du_i^p = \left(\frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} \frac{\rho_f}{\rho_p} |\vec{u}_f - \vec{u}_p| (u_{fi} - u_{pi}) - \delta_{i3} g \right) dt, \quad u_{fi} = \bar{u}_{fi} + u'_i$$



Слой $\sim 10^1 - 10^3$ м. Перенос и турбулентная диффузия мелкодисперсных примесей. Применимы подходы для пассивных трассеров.

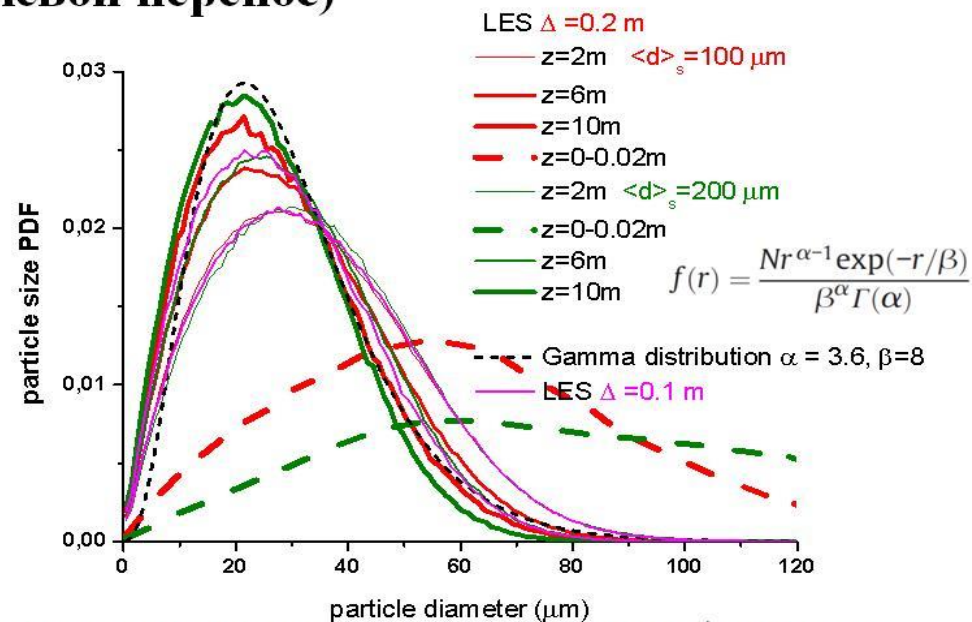
Слой равновесия между турбулентным перемешиванием и гравитационным оседанием $\sim 1 - 10$ м. Взвесь воздействует на турбулентность в основном за счет изменения суммарной плотности двухфазной жидкости. Нужно ли учитывать турбофорез (миграцию инерционных частиц в неоднородном турбулентном поле), эффекты инерции частиц?

Параметризации для LES: 1) подсеточная стохастика с учетом инерции частиц, 2) обратное влияние ансамбля частиц на разрешаемую и подсеточную турбулентность (возможно осреднение на масштабах шага сетки).

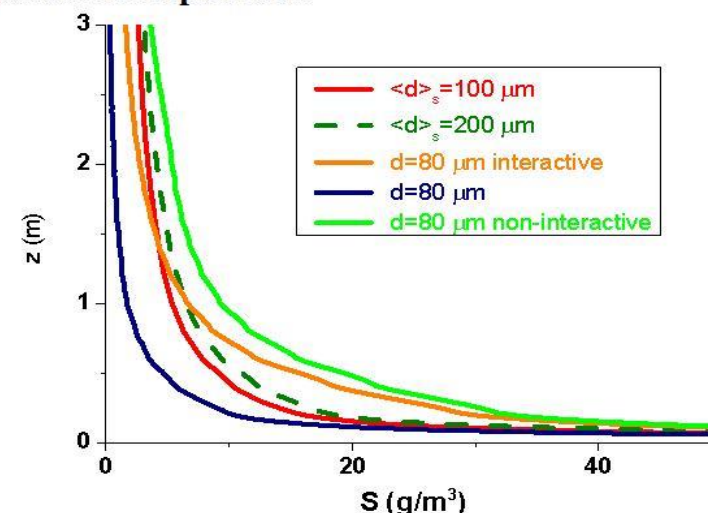
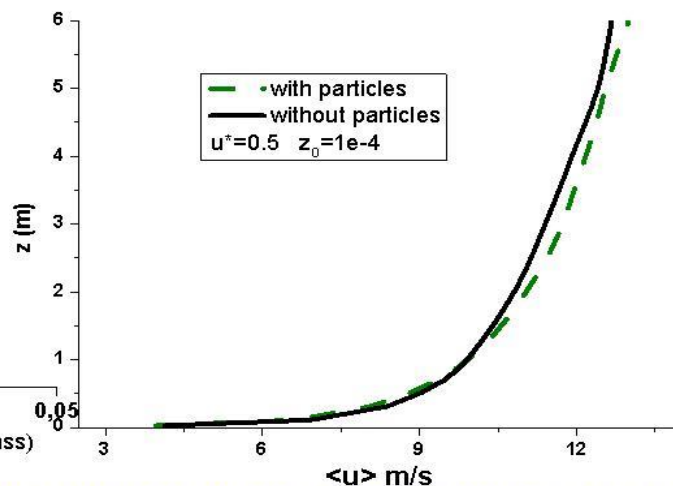
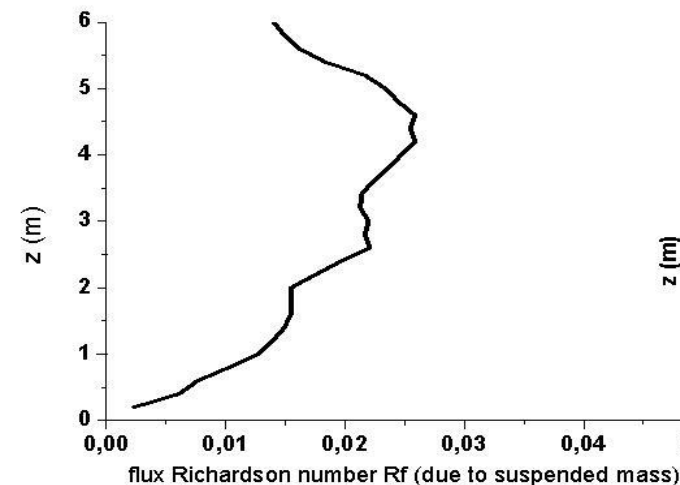
Слой сальтации $\sim 10^{-2}$ м. Непосредственное воздействие индивидуальной динамики частиц на турбулентность в энергонесущем интервале. Важная роль молекулярной вязкости. Столкновения частиц. Проблемы с представлением частицы как материальной точки (уравнение движения; силы, связанные с вращением и сдвигом скорости на масштабе размера частицы; ...)

Параметризации для LES: 1) обмен частицами на поверхности с учетом динамического вовлечения, многократных отражений, выбивания новых частиц старыми (эмпирические зависимости, случайные процессы с заданными функциями распределения); 2) воздействие слоя сальтации на внешний поток за счет изменения динамической и термической шероховатости поверхности ($z_0 = z_{0i} + a U_*^2 / g$?)

LES. Перенос взвесей тяжелых частиц в приземном слое (поземка, пылевой перенос)

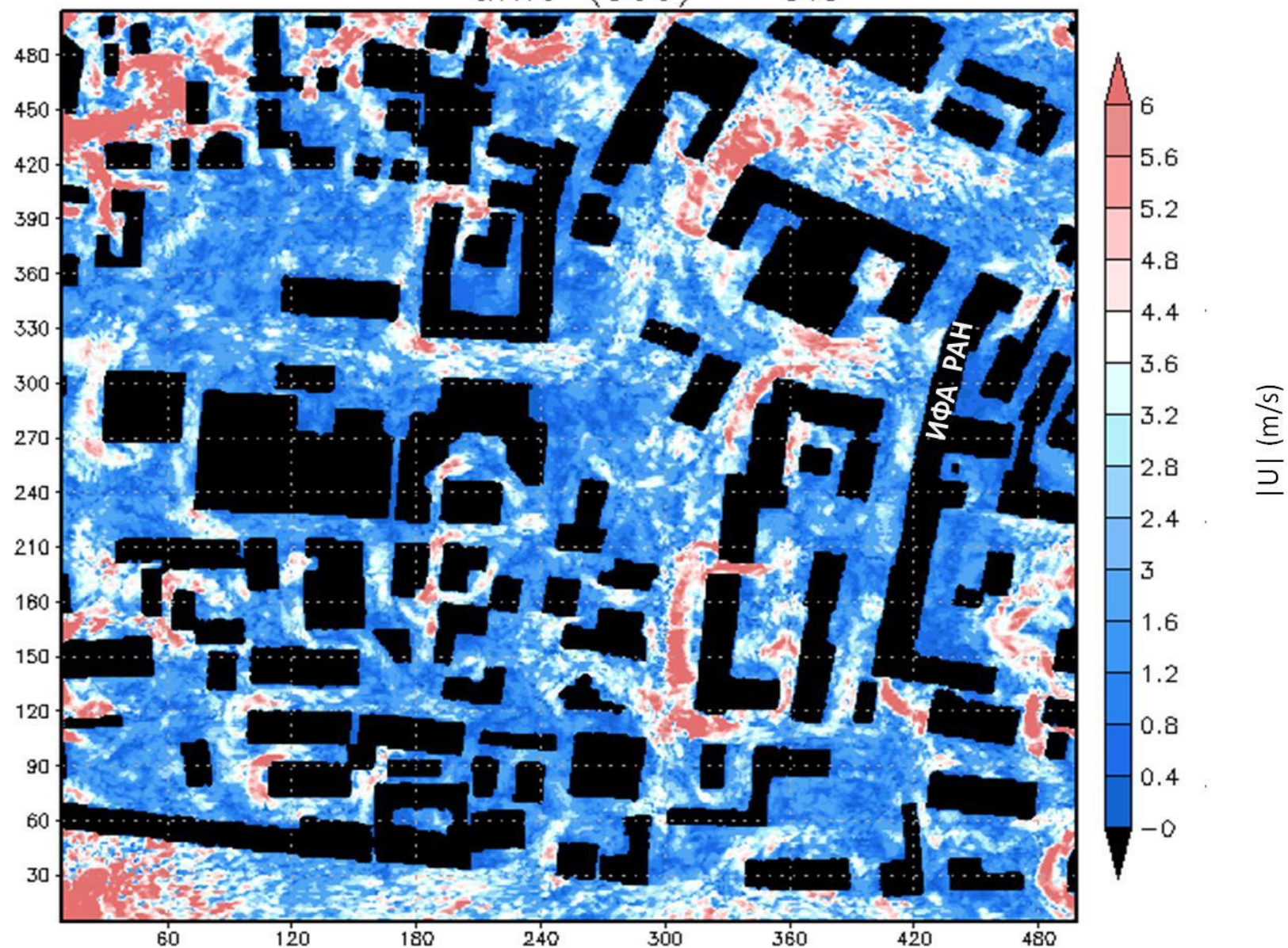


Распределение частиц взвеси по размерам слабо зависит от заданного распределения на поверхности

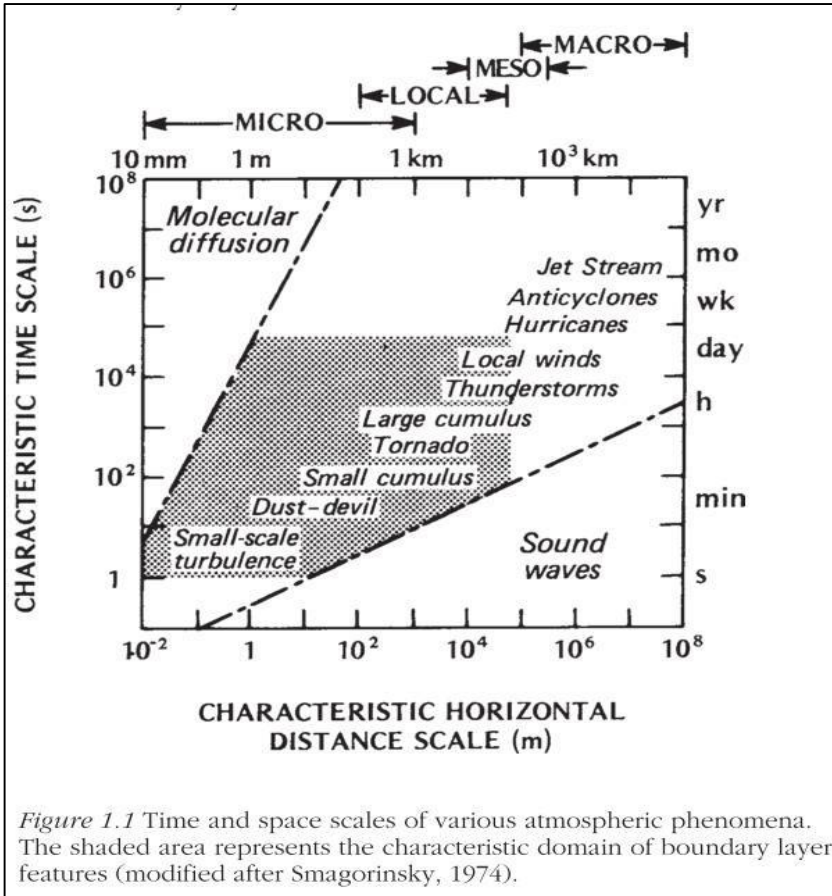


Обратное влияние взвеси на среднюю скорость ветра в приземном слое невелико, однако, тяжелые инерционные частицы имеют тенденцию к кластеризации и их локальным обратным воздействием на поток пренебречь нельзя.

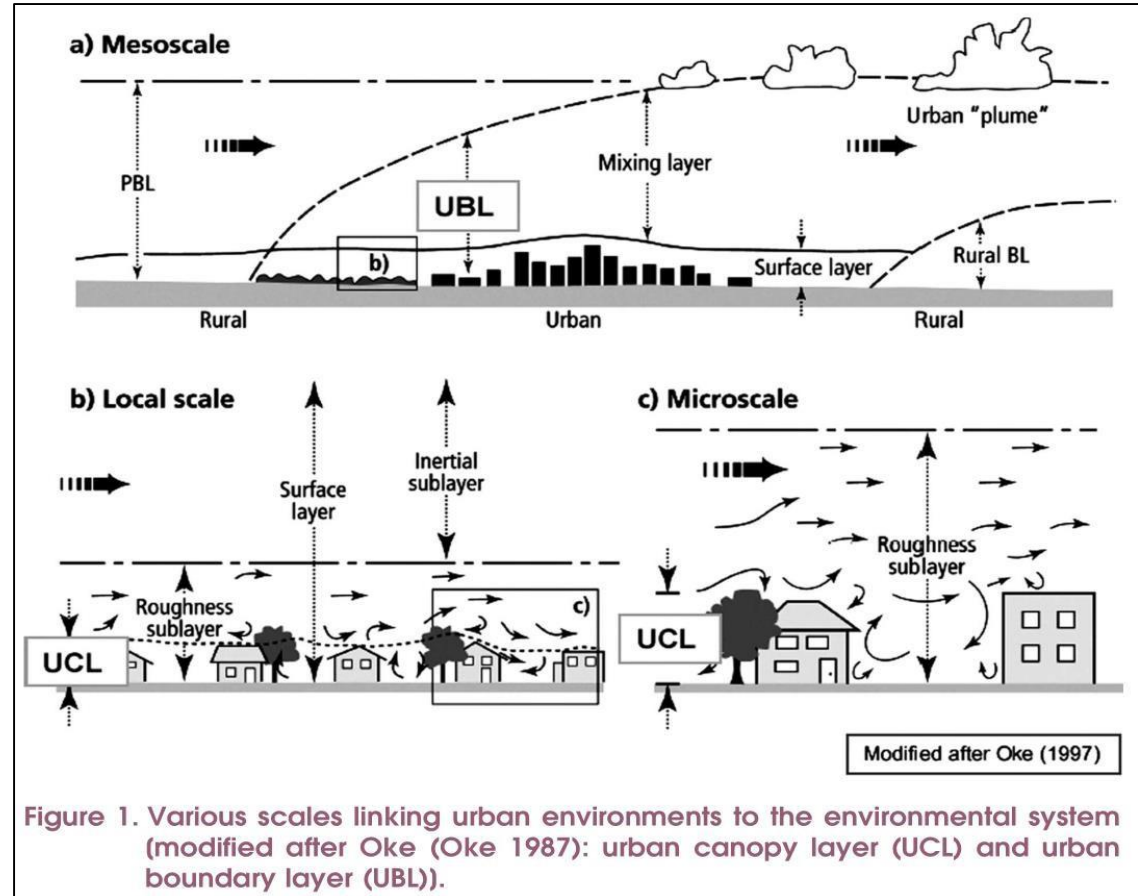
time (sec) = 0.5



Scales of urban climate studies



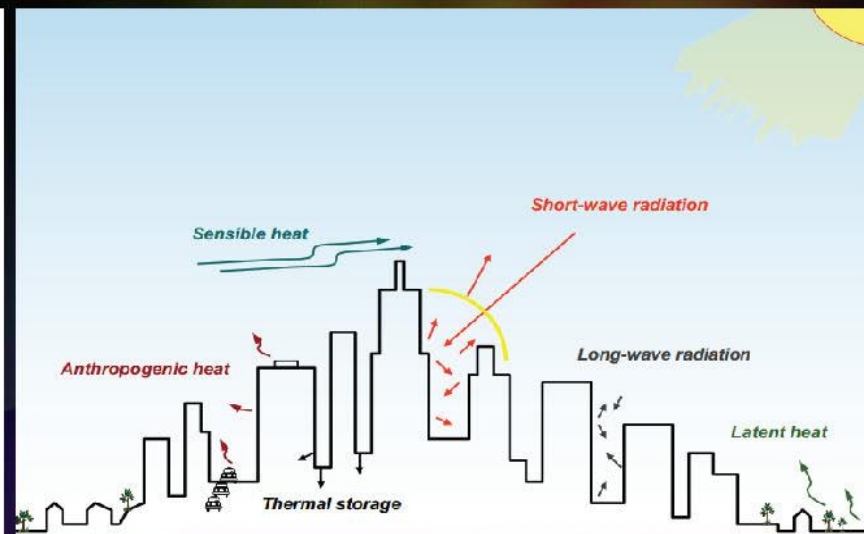
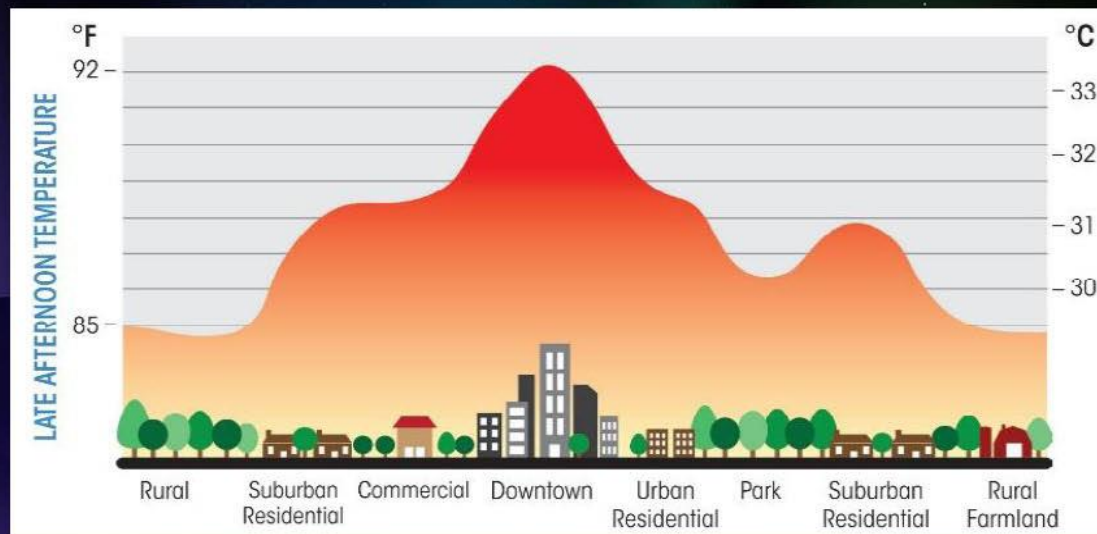
(Oke, 1987)



(Shepard, 2005)

Мотивация

Эффект **городского острова тепла** изучен для умеренных широт, но не для Арктики



Ключевые вопросы:

- 1) Существуют ли острова тепла в Арктике?
- 2) Какая их интенсивность (величина термической аномалии)?
- 3) Каково их влияние на общество и экосистемы?

Перенос примесей в городской среде

M. Pavageau, M. Schatzmann / Atmospheric Environment 33 (1999) 3961–3971

Re ~ 18 000

Wind tunnel ceiling

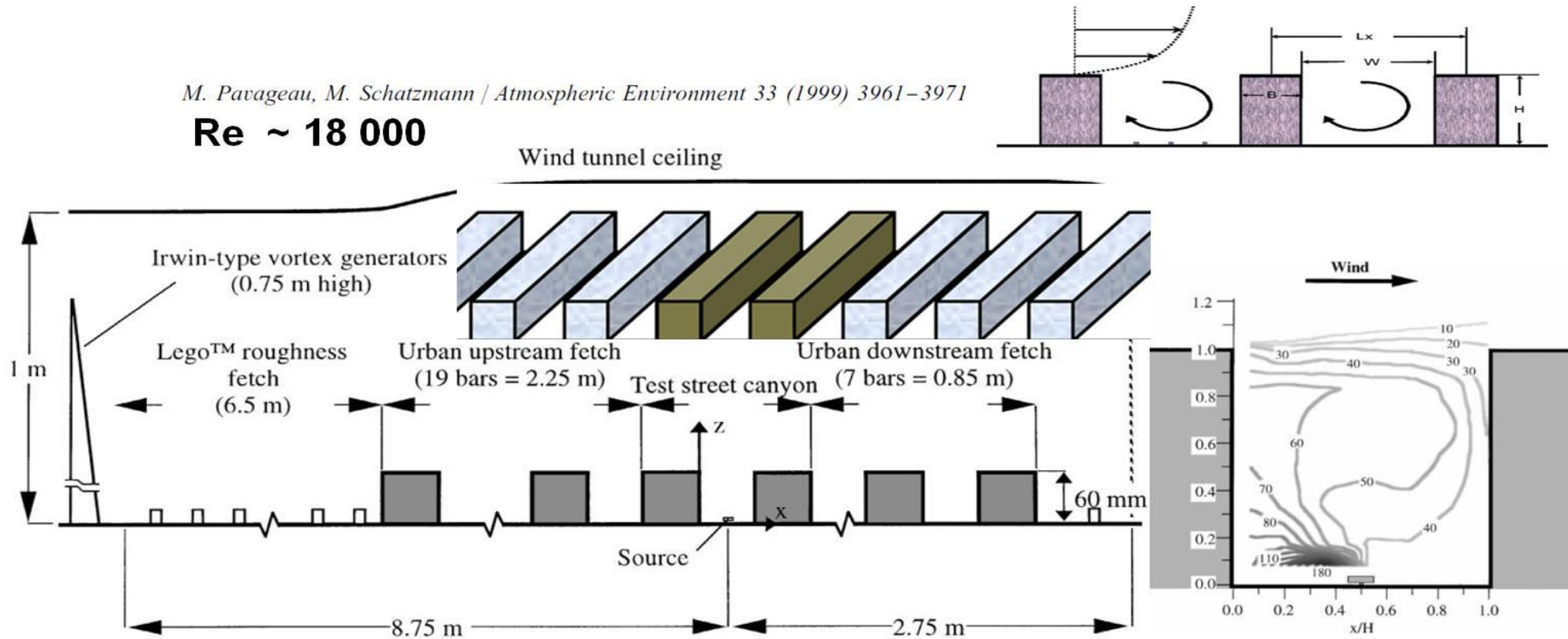
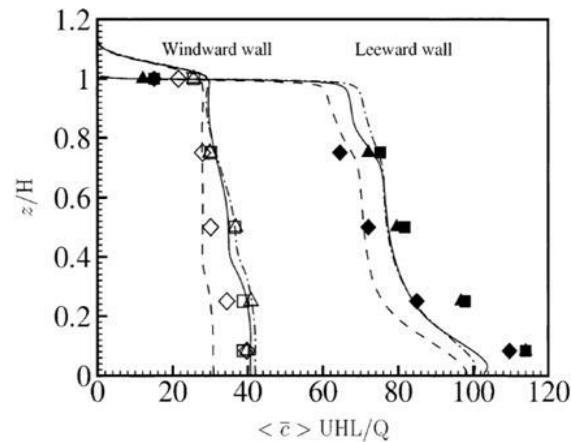
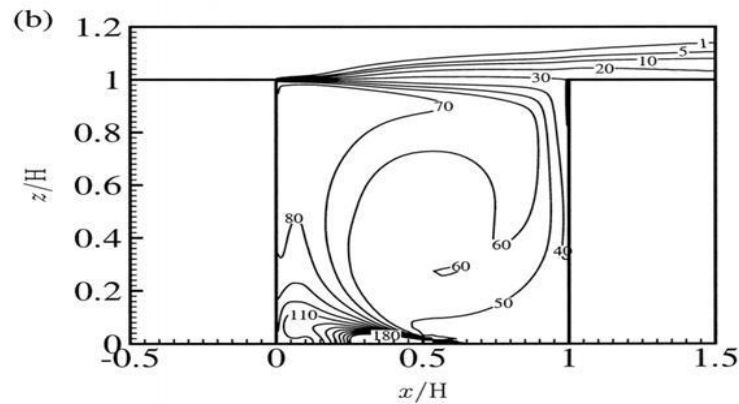


Fig. 1. Side view of the two-dimensional urban model (flow direction from left to right).



LES (Liu & Barth, 2002)

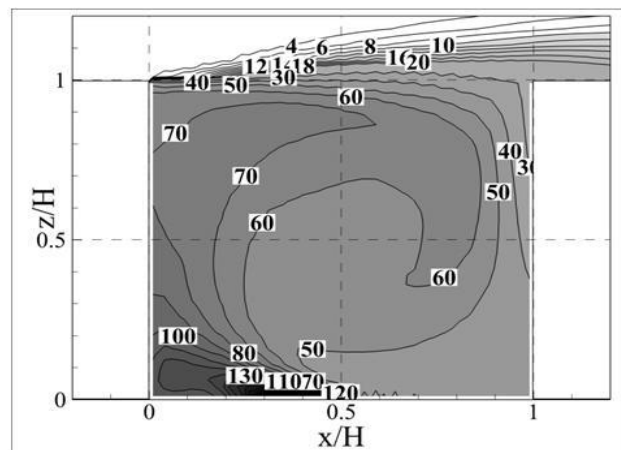
64 × 32 × 64

80 × 40 × 80

96 × 48 × 96

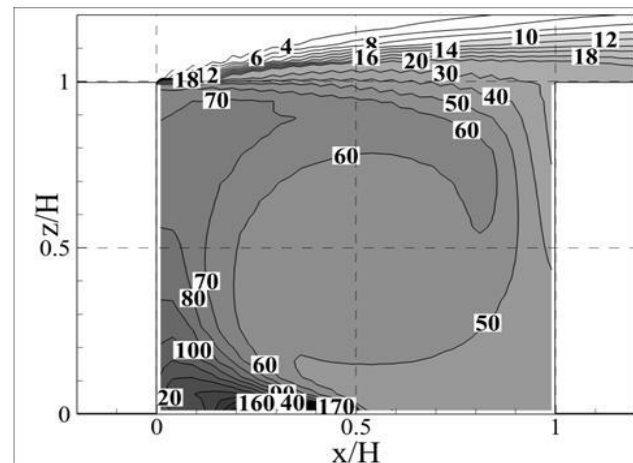
W × L_y × H

$Re \sim 2 \cdot 10^7$, $z_0 = 0.025$ m $H = 30$ m



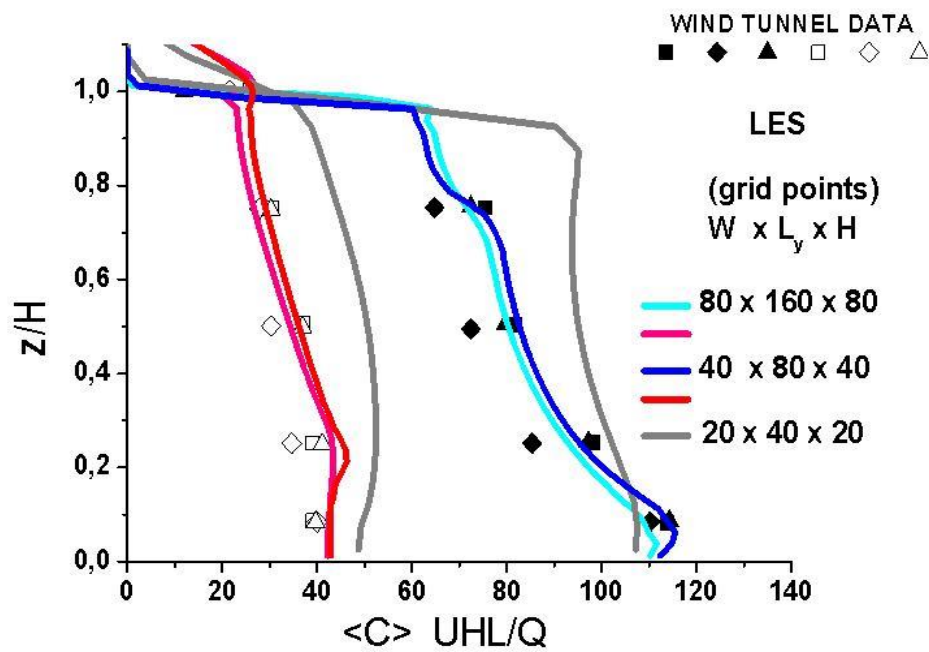
$\langle C \rangle$ UHL/Q

$Re = 18\,000$, условие прилипания на стенках, вязкий подслон

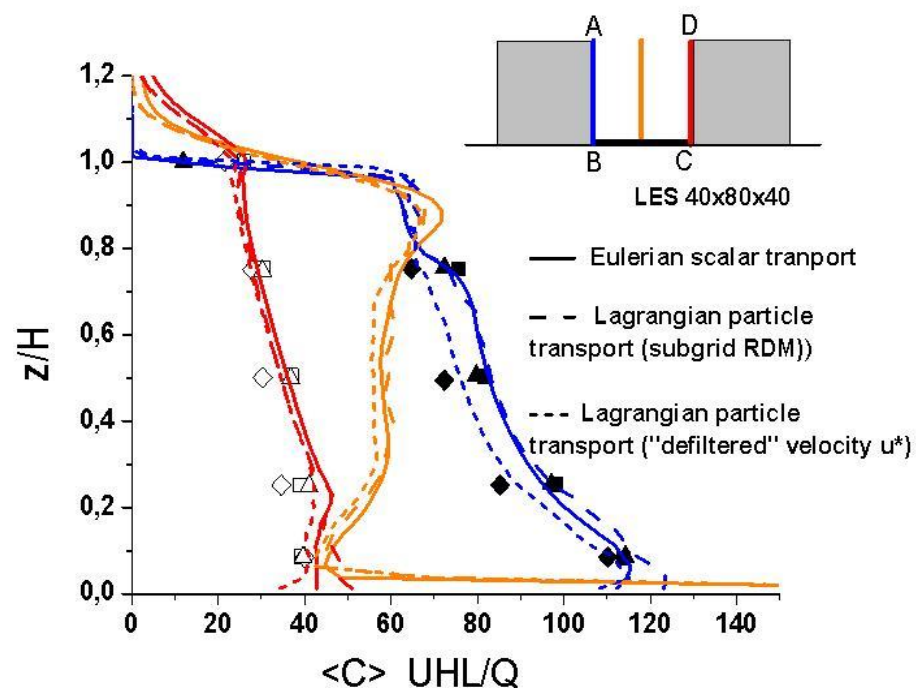


$\langle C \rangle$ UHL/Q

Проверка чувствительности модели к пространственному разрешению



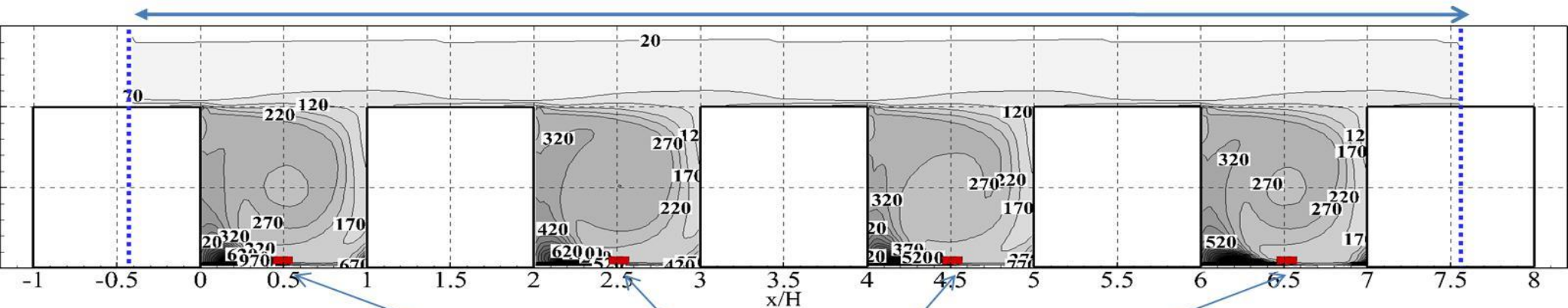
Сравнение лагранжева и эйлера подходов



Перенос тяжелых частиц в городском каньоне

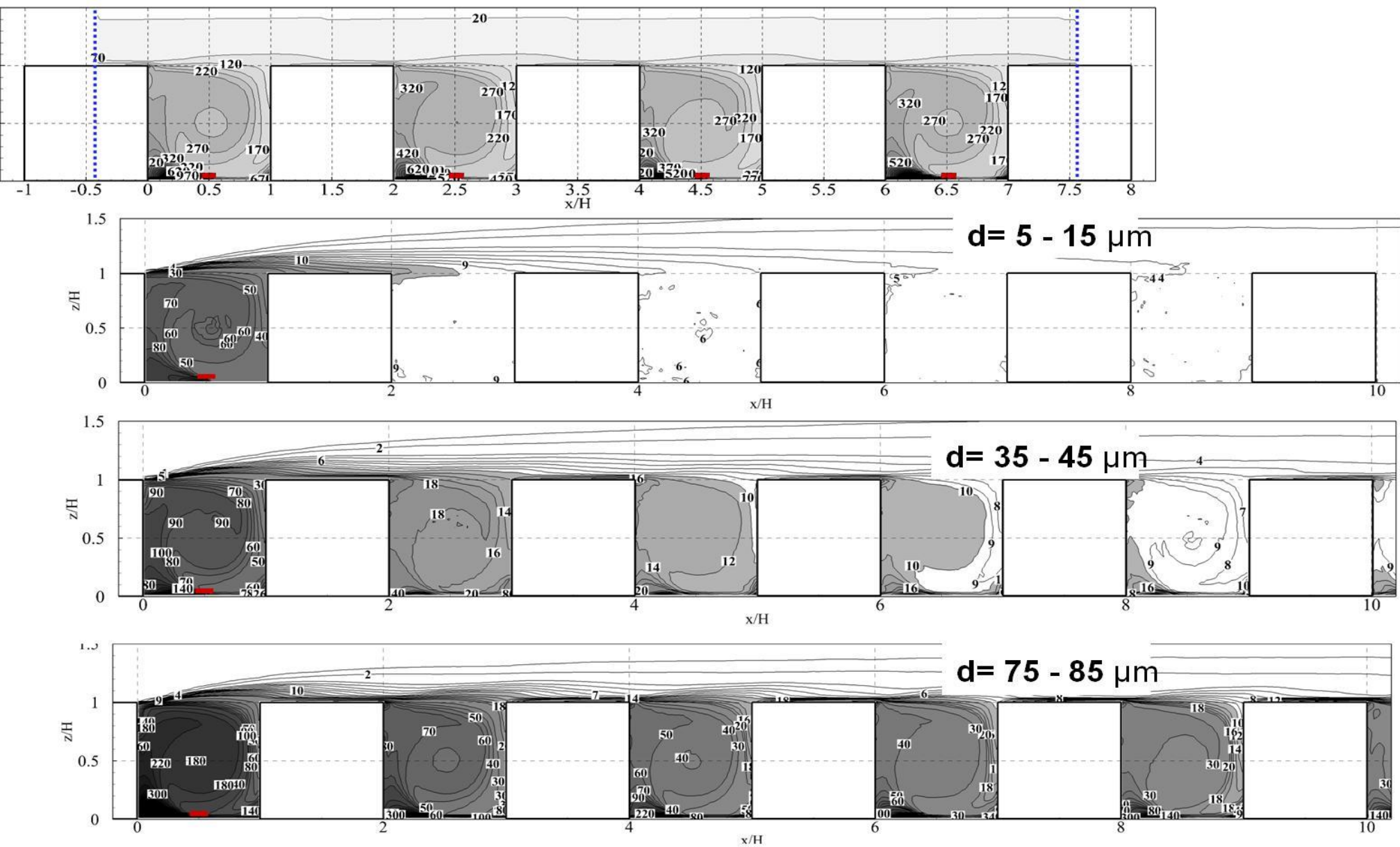
Carbon spherical particles ($\rho_p = 2000 \text{ kg/m}^3$, $d = 0 - 100 \text{ }\mu\text{m}$), $U = 0.5 \text{ m/s}$, $H = 30 \text{ m}$, $W = 30 \text{ m}$, $L = 30 \text{ m}$, air kinematic viscosity $= 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $Re_{\text{flow}} \sim 2 \cdot 10^7$, $Re_p < 100$, particle falling terminal velocity $U_t/U \leq 1$ (less than mean air velocity inside cavity) .

LES periodic domain



Источники примеси (частицы с размерами $d = 0 - 100 \text{ }\mu\text{m}$)

LES + лагранжева стохастическая подсеточная модель



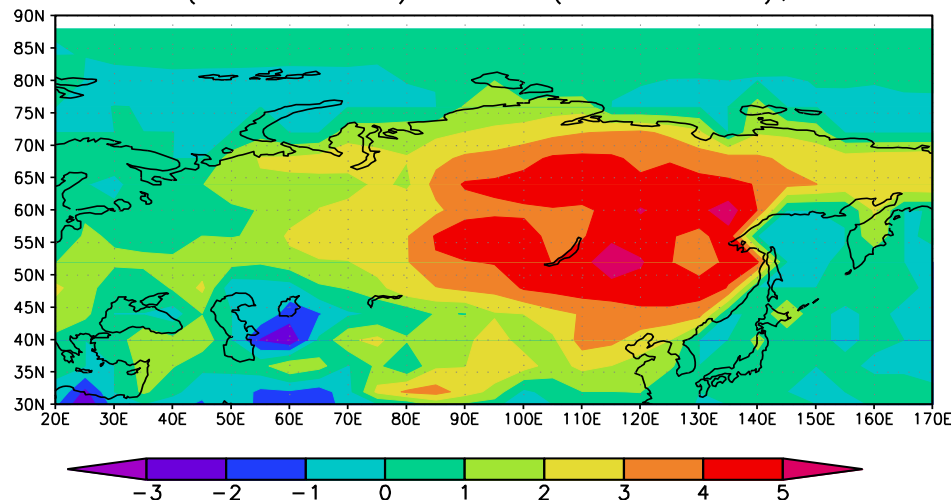
Перенос тяжелых частиц (пыли, сажи) в городской среде может быть очень эффективным.

Mosses

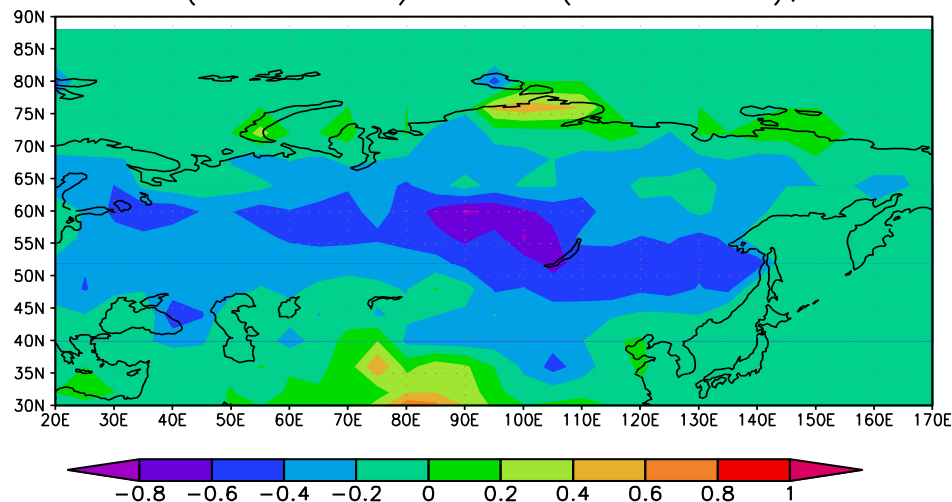
- "Mosses dominate the surface cover in high northern latitudes and have the potential to play a key role in modifying the thermal and hydrologic regime of Arctic soils. These modifications in turn feed back to influence surface energy exchanges and hence may affect regional climate. However, mosses are poorly represented in models of the land surface." (Beringer et al., J.Climate, 2001)
- Parameterizations of mosses are included in NCAR Land surface model (Beringer et al., 2001), MetOffice's JULES (Chadburn et al., 2015), ORCHIDEE (Drueel et al., 2017)
- All of them treat mosses as an additional soil layer of ~5 cm, with decreased heat and moisture transfer coefficients
- Species diversity of mosses is not taken into account

Многолетняя мерзлота в модели ОЦА ИВМ РАН

T2 (moss 8cm) – T2 (moss 1cm), JJA



WS (moss 8cm) – WS (moss 1cm), JJA



Laboratory studies of moss transfer properties

Energy and Buildings 158 (2018) 1417–1428

Contents lists available at ScienceDirect

Energy and Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enbuild



Effects of convection heat transfer on Sunagoke moss green roof A laboratory study

M. Amir A. K.^{a,1}, Yasuo Katoh^{a,*}, Hiroshi Katsurayama^a,
Makoto Koganei^b, Makoto Mizunuma^c

^a Yamaguchi University, Department of Systems Design and Engineering, Tokiwadai 2-18-1, Ube City, Yamaguchi, 755-8611, Japan

^b Yamaguchi University, Department of Architectural Design and Engineering, Tokiwadai 2-18-1, Ube City, Yamaguchi, 755-8611, Japan

^c Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute, Promotion of Industry-Academia-Government, Asutopia 4-1-1, Ube City, Yamaguchi, 755-8611, Japan

Heat transfer coefficient in the moss layer increases 5 times with increase of the wind speed. The same magnitude, but of decrease, is observed in Bowen ratio.

1422

M.A.A. K. et al. / Energy and Buildings 158 (2018) 1417–1428

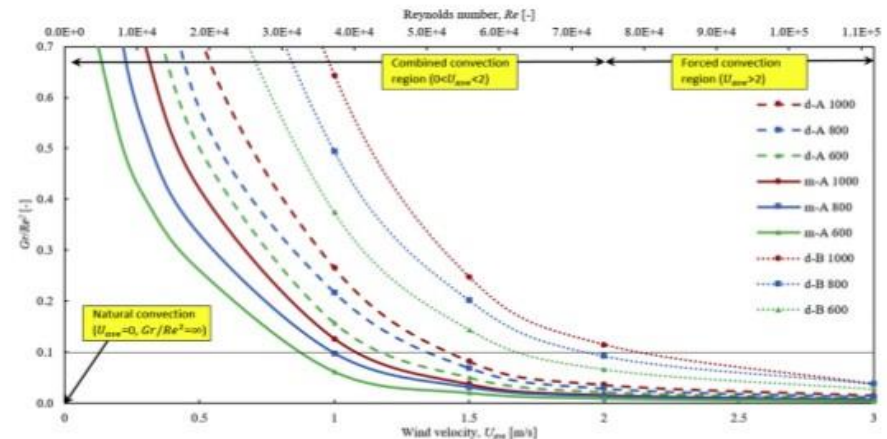


Fig. 5. Ratio of Grashof number and square of Reynolds number. Irradiance strength is denoted by color; the moss-free house is dotted, the moss covered house dashed if dry, solid if moist.

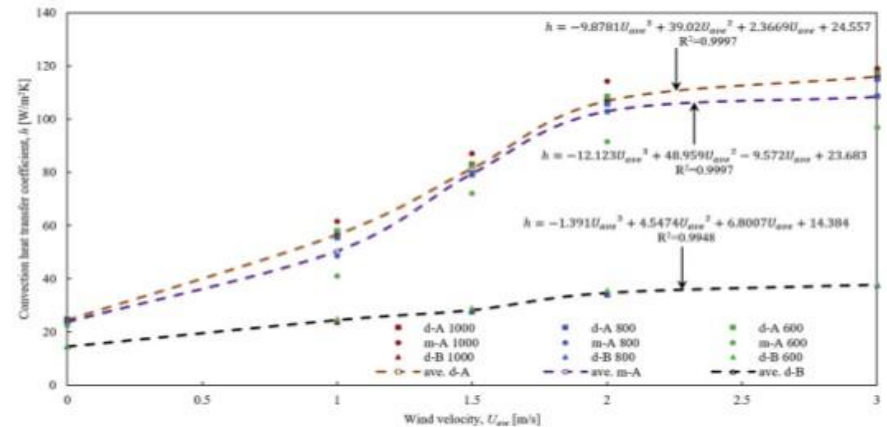


Fig. 6. Convection heat transfer coefficient for each model house in different wind velocity and irradiance. Irradiance strength is denoted by color; the moss-free house is marked by triangle, the moss covered house is marked by square if dry, circle if moist. Average data are presented with dashed lines according to wind velocity for each model house.

Fluid dynamics in porous media?

Convection in Porous Media Third Edition

Donald A. Nield
*University of Auckland
Auckland, New Zealand*

and

Adrian Bejan
*Duke University
Durham, North Carolina, USA*

 Springer

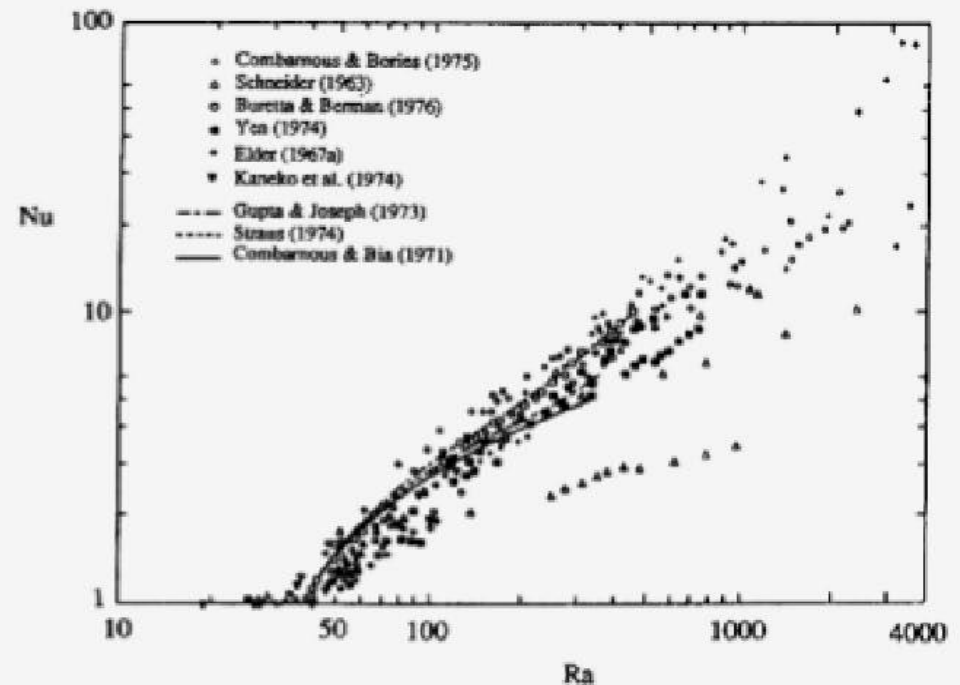


Figure 6.9. Compilation of experimental, analytical, and numerical results of Nusselt number versus Rayleigh number for convective heat transfer in a horizontal layer heated from below (Cheng, 1978, with permission from Academic Press).

Numerous analytical and experimental results for free and forced convection in porous media from literature are available.

A plan for targeted experiments

Nadym neighbourhood



Objective: validation of new models
for roughness and heat transfer
in mosses

Tentative plan of measurements:

- Temperature, humidity, wind speed at ≥ 2 levels in surface air layer
- eddy covariance measurements of heat and moisture fluxes
- radiation fluxes
- surface temperature and soil temperature at different depths
- heat flux and temperature measurements inside moss layer

A scenic landscape photograph featuring a calm, deep blue lake in the foreground. A small white boat with a blue stripe is visible on the water. The shoreline is lined with lush green trees and vegetation. In the background, a large, forested mountain rises, its slopes covered in dense green trees. The sky is a pale blue with some light clouds. The text "БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !" is overlaid in the center of the image in a white, serif font.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !