

Семинар «Интегрированная система прогноза метеорологических параметров, качества воздуха, оценки распространения выбросов в атмосферу мегаполисов, транспортных узлов и других объектов инфраструктуры», 16 октября 2008 г., Новосибирск

Вихреразрешающее моделирование геофизической турбулентности и переноса примеси

А.В. Глазунов^{1,2}, В.Н. Лыкосов^{1,2}

¹Институт вычислительной математики РАН

²Московский государственный университет

им. М.В. Ломоносова

E-mail: glazunov@inm.ras.ru, lykosov@inm.ras.ru

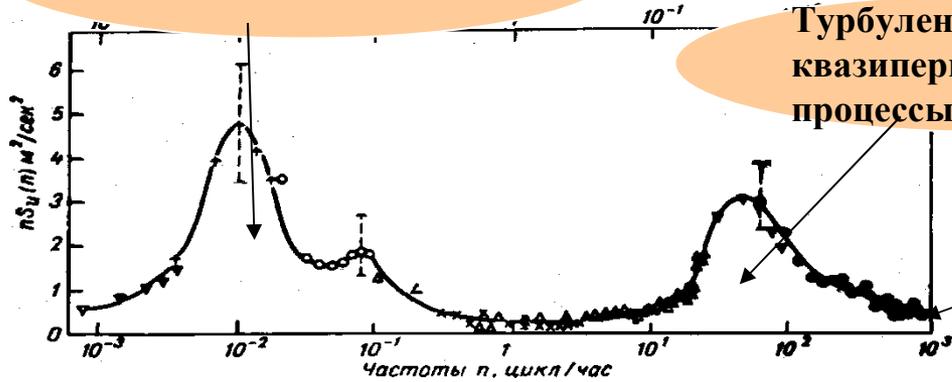


Три подхода к численному моделированию турбулентности

- **Прямое численное моделирование** (в англоязычной литературе – direct numerical simulation, **DNS**). В рамках этого подхода численно решаются системы алгебраических уравнений, с высокой точностью аппроксимирующие исходную систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса. DNS (безусловно самый обоснованный и самый точный 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. 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**. Если турбулентность происходит на фоне какого либо медленного квазипериодического процесса, то возможно построение нестационарной модели RANS (unsteady RANS – **URANS**).
 - 3. Вихреразрешающее моделирование или моделирование методом крупных вихрей** (Large Eddy Simulation, **LES**). Впервые этот подход был использован в 1970 году Дирдорфом (Deardorff, 1970) для моделирования турбулентного течения в канале, а затем для моделирования конвективного атмосферного пограничного слоя (Deardorff, 1973). 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). При этом вычислительные затраты необходимые для реализации такой модели не должны зависеть от числа Рейнольдса, поскольку нет необходимости явно и точно рассчитывать все мелкие вихри. **Влияние мелкомасштабной (“подсеточной/подфильтровой”) турбулентности учитывается при помощи турбулентных замыканий** («подсеточных моделей», **subgrid scale (SGS) model**)

Синоптическая изменчивость

$$L \sim 10^3 \text{ м}, U \sim 10^1 \text{ м/с}, (\nu/\rho_0) \sim 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$



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

Турбулентные и квазипериодические процессы в ПСА

$$\tilde{\eta} = \eta/L$$

$$\tilde{\eta} = O(Re^{-3/4})$$

$$Re = \frac{UL}{(\nu/\rho_0)}$$

$$Re \sim 10^9$$

$$\tilde{\eta} \sim 10^{-7}$$

Требования к DNS

$$N = \tilde{\eta}^{-3} \sim 10^{21}$$

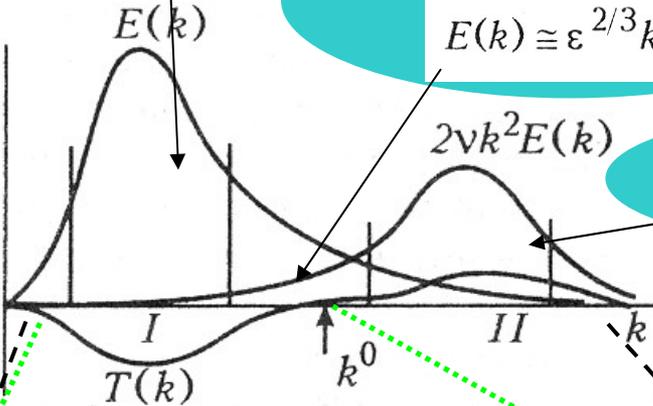
Интервал генерации

Инерционный интервал

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

$$2\nu k^2 E(k)$$

Интервал диссипации



Современные компьютеры не способны выполнять такие вычисления!

Принципиальная невозможность корректно задать граничные условия.

В DNS необходимо явно описать все особенности подстилающей поверхности.

LES - наиболее перспективный подход для решения практических задач по моделированию турбулентных процессов в геофизических ПС.

три подхода к моделированию турбулентности

DNS (Direct Numerical Simulation)

LES (Large Eddy Simulation)

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Математическая формулировка

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

Navier-Stokes equations.

Approximate form of the momentum and mass conservation laws in viscous incompressible fluid.

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

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

Spatial filtering

It's usually assumed that filter commutes with operator of differentiation.

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

It's not always the case near the boundary and/or after discretization

LES

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

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

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

Re-independent statistics of large-scale motions in turbulent flows (*observation and high-Re DNS data*) gives us hope of possibility:

1. To neglect the viscous term.

2. To find closure:
 $\tau_{ij} \approx T_{ij}(\bar{u}_k, \bar{u}_l, \bar{u}_m)$

Central problem of LES modeling. Universal approach isn't known.

***The most difficult in anisotropic wall-bounded flows
 (if the energy production range isn't strongly separated from dissipation range
 and/or inertial range can't be resolved by the numerical model)***

Декомпозиция тензора турбулентных напряжений (Leonard, 1974)

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = L_{ij} + C_{ij} + R_{ij}$$

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i \quad \text{турбулентные пульсации «подфильтрового» масштаба}$$

$$L_{ij} = \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad \text{Слагаемое Леонарда – описывает взаимодействия крупномасштабных (разрешаемых явно) гармоник, приводящие к возмущениям подфильтрового масштаба. В случае спектрального фильтра представляет собой ошибки наложения (aliasing errors)}$$

$$C_{ij} = \overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{u'_j \bar{u}_i} \quad \text{«Перекрестное» слагаемое – взаимодействие «подфильтровых» и разрешаемых явно гармоник}$$

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \quad \text{Рейнольдсовское слагаемое – взаимодействие «подфильтровых» гармоник, приводящее к изменениям в разрешаемом явно диапазоне; аналог молекулярной вязкости.}$$

Представленная декомпозиция чаще используется для анализа данных и редко служит основой для построения замыканий.

Иногда считается, что модели турбулентной вязкости и диффузии параметризуют исключительно рейнольдсовские слагаемые. Это не совсем так, поскольку и L и C также могут приводить к передаче возмущений в сторону мелких масштабов, а этот процесс (по крайней мере с энергетической точки зрения) можно параметризовать, вводя дополнительную вязкость.

Модели, основанные на введении турбулентной вязкости

$$\tau_{ij}^a = \tau_{ij} - 1/3\delta_{ij}\tau_{kk} = -2\nu_{sgs}\bar{S}_{ij} \quad \bar{S}_{ij} = (\partial\bar{u}_i/\partial x_j + \partial\bar{u}_j/\partial x_i)/2$$

Девиатор тензора турбулентных напряжений пропорционален тензору деформаций.

Тензор скоростей деформаций, построенный на основе фильтрованной скорости

След тензора включают в новое модифицированное давление $\bar{p}^* = \bar{p} + 1/3\tau_{kk}$

Модель Смагоринского
$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk} \approx \tau_{ij}^{smag} = -2C\Delta_g^2|\bar{S}|\bar{S}_{ij}$$

Neumann and Richtmyer, 1950 (1-мерное ур-е Бюргера);

Smagorinsky, 1963 (2-мерные вихри в океане)

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

+Имеет ясный физический смысл – локальный баланс сдвиговой генерации и диссипации подсеточной турбулентной кинетической энергии

+ Математически обоснована (существует теорема существования и единственности решения регуляризованной системы уравнений Навье-Стокса, Ладыженская, 1967)

+ Для инерционного интервала спектра существует теоретическая оценка параметра

$$C_s \sim 0,17 \quad (\text{Lilly, 1967})$$

+Дает довольно высокую корреляцию (~0.7) наблюдаемой и моделируемой диссипации

-Корреляция наблюдаемого и моделируемого тензоров турбулентных напряжений незначительна ~0.2

-Не учитывает эффекты стратификации

-Константа C не универсальна и требует подбора.

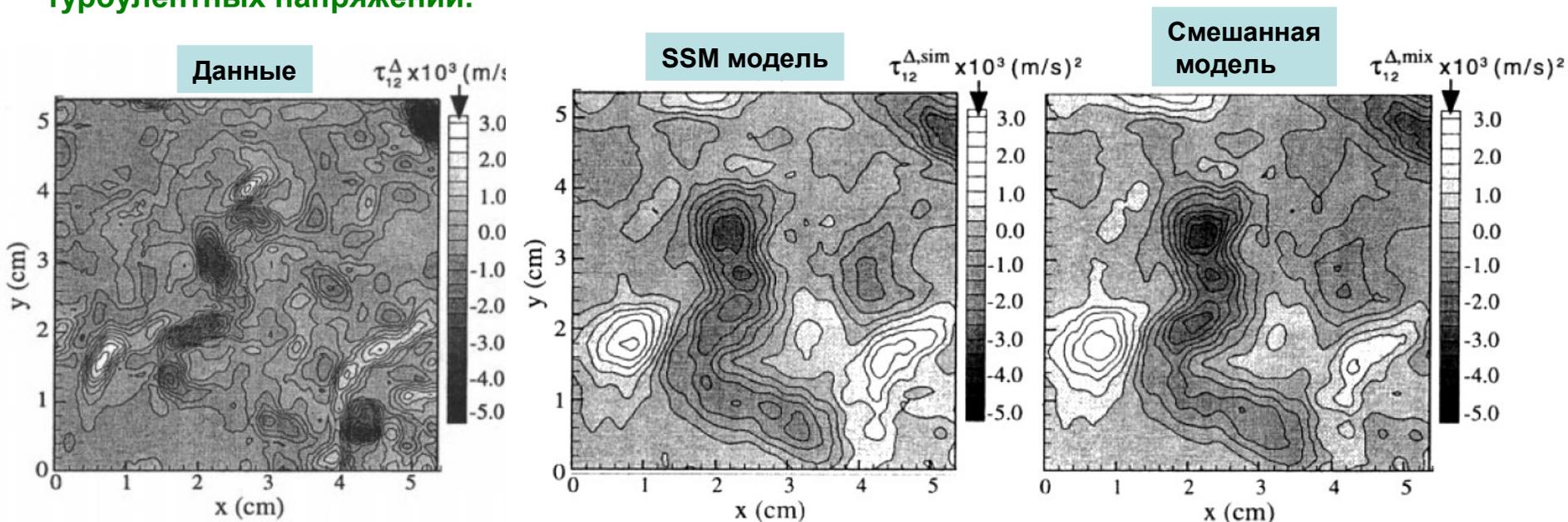
SSM - scale-similarity model (Bardina , et al., 1983), (Sagaut, 1998), (Layton and Lewandowski 2002):

$$\tau_{ij} \approx \tau_{ij}^{ssm} = \overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}}$$

MM - mixed model (Bardina , et al., 1983), (Zang , et al., 1993), (Esau,2004):

$$\tau_{ij}^{mix} = \tau_{ij}^{smag} + \tau_{ij}^{ssm} = -2(C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij} + (\overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}})$$

Смешанная модель сочетает достоинства модели Смагоринского (диссипативность) и модели подобия масштабов - высокую корреляцию наблюдаемых и моделируемых турбулентных напряжений.



Измеренная и вычисленная при помощи SSM модели и смешанной модели компонента тензора напряжений в турбулентной струе (Liu, 1994)

Динамический метод определения констант, входящих в замыкания (Германо, 1991):

$$\widehat{\tau}_{ij} = \widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j} \quad T_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (\widehat{\quad}) \text{ - Тестовый фильтр}$$

Тождество Германо:

$$T_{ij} - \widehat{\tau}_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$$

Не содержит нефильтрованных компонент скорости

В динамических подсеточных и подсеточных/подфильтровых моделях турбулентности используется предположение об инвариантности констант, входящих в замыкание, относительно эффективной ширины фильтрации. Иными словами, **предполагается, что одна и та же подсеточная модель без какого либо изменения может применяться как при более грубом, так и при более мелком пространственном разрешении.**

Имея решение на мелкой сетке всегда можно получить решение на грубой сетке с помощью дополнительной «тестовой» фильтрации по пространству и получить для него оценку турбулентных напряжений.

На практике это приводит к задачам минимизации невязок переопределенных систем линейных уравнений, решение которых обеспечивает **оптимальное (с точки зрения инвариантности модели относительно пространственного разрешения) распределение параметрических констант в пространстве и времени.**

Применяя тождество Германо к смешанной модели получаем:

Переопределенная система уравнений для параметра C

$$\left((C_{\Delta} \widehat{\Delta})^2 M_{ij}^{\tau} \right) - (C_{\widehat{\Delta}} \widehat{\Delta})^2 M_{ij}^T = L_{ij} - H_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Находим решение, минимизируя норму невязки

$$M_{ij}^T = |\widehat{S}| \widehat{S}_{ij}, \quad M_{ij}^{\tau} = |\overline{S}| \overline{S}_{ij}, \quad L_{ij} = (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}), \quad H_{ij} = \left(\left(\widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j} \right) - \left(\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \right) \right)$$

Динамическая процедура может быть построена не только для модели Смагоринского, но и для других замыканий.

$$AX = R + \varepsilon, \quad R = L - H$$

$$X = 2C\overline{\Delta}^2$$

Искомая переменная

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$$

$$A = F_z F_y F_x M^T - \alpha^2 M^T; \quad A^* = M^T F_x^* F_y^* F_z^* - \alpha^2 M^T$$

$$f(X) = \int_{\Omega} \varepsilon^2 = \int_{\Omega} (AX - R, AX - R)$$

$$\widehat{\Delta} = \alpha \overline{\Delta}$$

$$\nabla f = 0$$

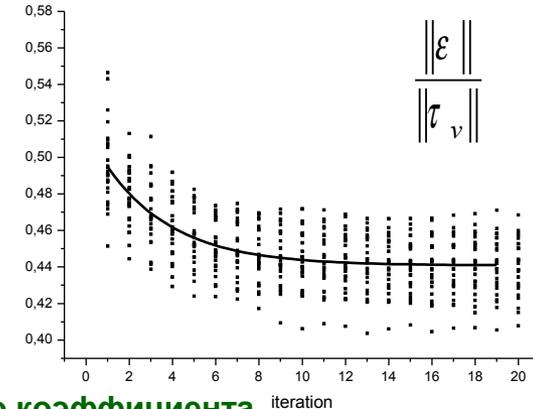
$$A^* AX = A^* R$$

$$DA^* AX = DA^* R,$$

$$D_{kk} = 1 / \langle M_{ij} M_{ij} \rangle_{xy}$$

Система уравнений с симметричной положительно-определенной матрицей решается итерационно

(например, методом сопряженных градиентов)



(+) пространственная локальность замыкания

(+) меньшее количество отрицательных и нефизично больших значений искомого коэффициента

(+) достигается минимум невязки ε исходной задачи, вытекающей из тождества Германо

(+) применимость для задач, не имеющих статистически однородных пространственных направлений

(-) требует в 4-5 раз больше вычислительных ресурсов, чем стандартная динамическая модель с осреднением.

Jiménez J. On why dynamic subgrid-scale models work. //Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ. Annual Research Briefs 1995.

Наиболее распространенные способы приближенного решения задачи минимизации

$$\left(X \widehat{M}_{ij}^{\tau} \right) = X \left(\widehat{M}_{ij}^{\tau} \right)$$

$$M_{ij} = \widehat{M}_{ij}^{\tau} - \alpha^2 M_{ij}^T$$

$$X_{local}(\mathbf{x}) = \frac{(L_{ij} - H_{ij}) M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}}$$

$$X_{avr}(x_k) = \frac{\langle (L_{ij} - H_{ij}) M_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle}$$

Локальная минимизация по независимым компонентам тензора (используется предположение о слабой зависимости искомого коэффициента от координат)

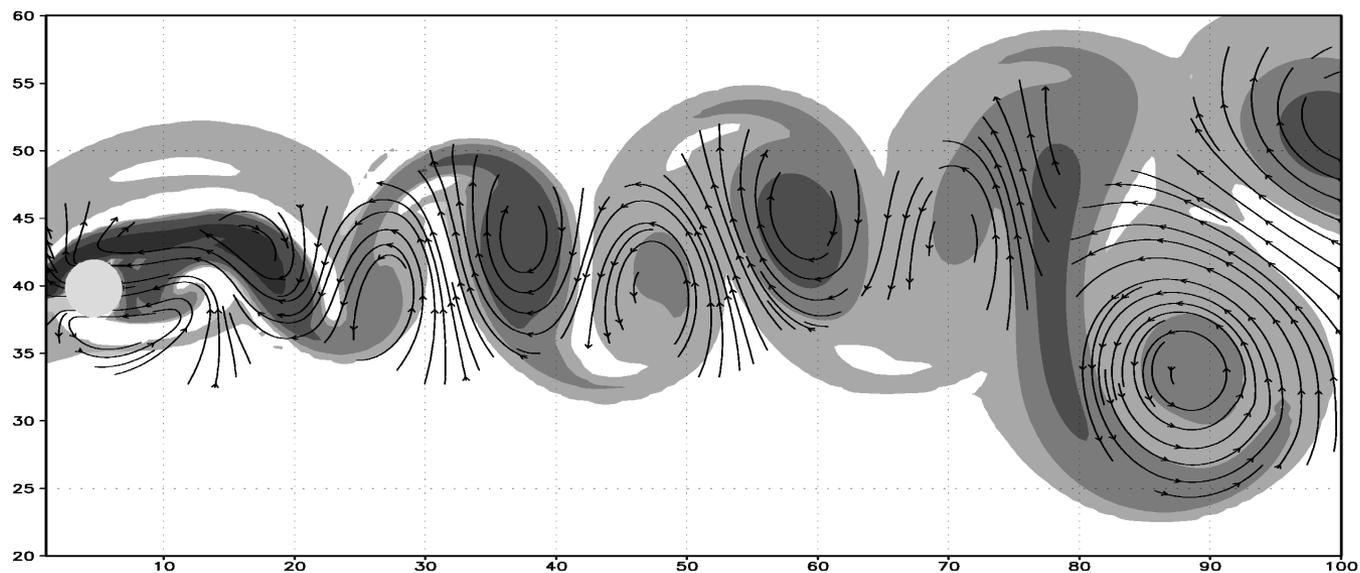
Дополнительная минимизация (осреднение) вдоль статистически-однородных направлений.

Осреднение вдоль выделенных пространственных направлений (например в горизонтальной плоскости)

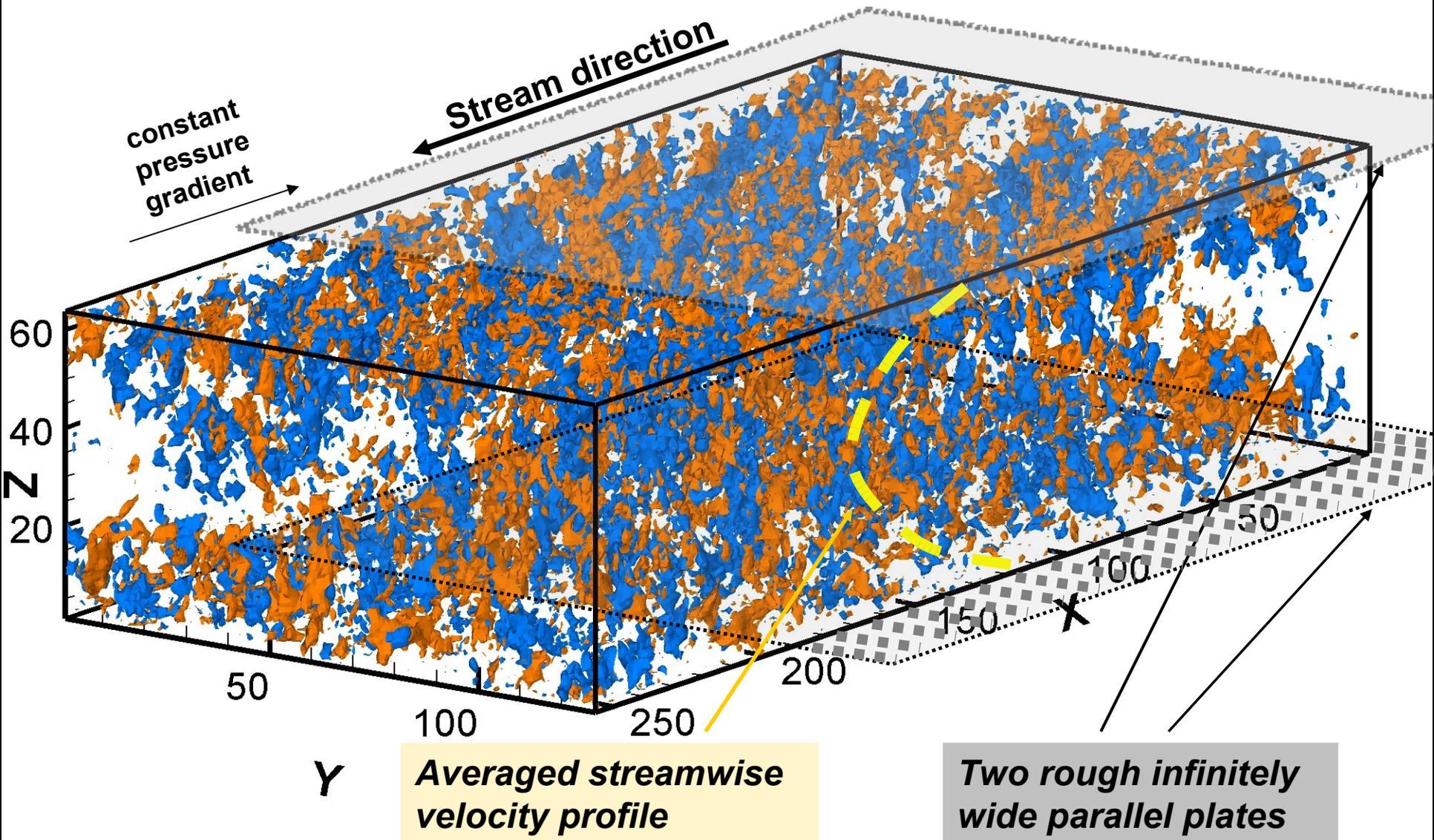
Осреднение вдоль Лагранжевых траекторий жидких частиц (Meneveau, et al. 1996). (Один из наиболее перспективных подходов для расчета турбулентных потоков сложной структуры)

Сравнение с данными лабораторных измерений и результатами прямого численного моделирования (DNS)

**Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром, $Re = 200$,
*Альбом течений жидкости и газа, Москва, Мир 1986***



Моделирование турбулентного потока в канале, ограниченном двумя шероховатыми пластинами.

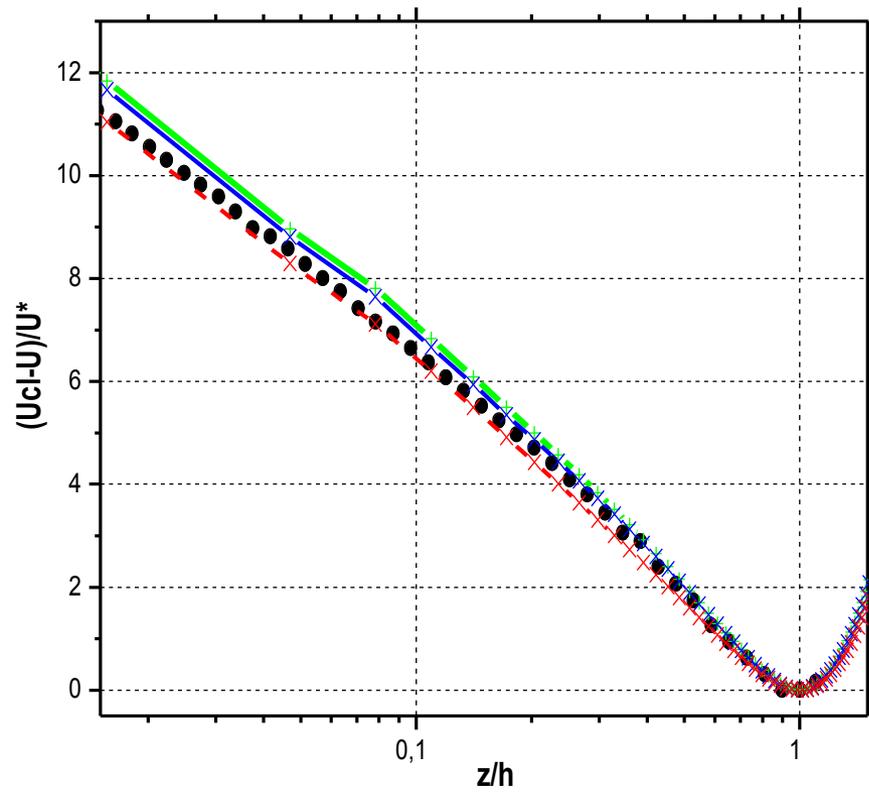
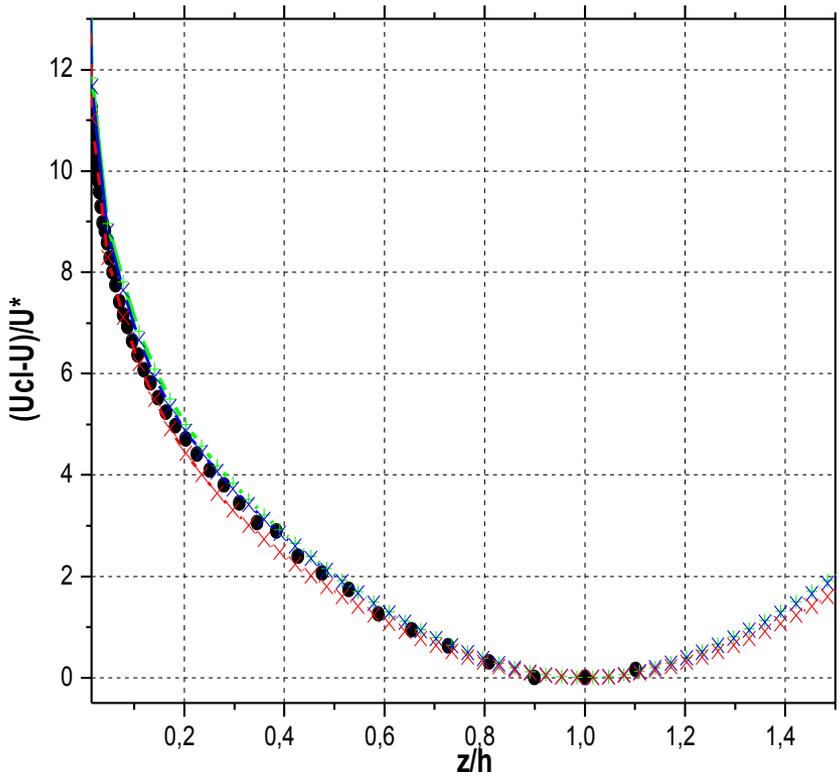


Defect of average streamwise velocity $(U_{cl}-U)/U^*$ (U_{cl} - velocity at the channel centerline)

Color lines – LES with different grid resolutions and domain sizes.

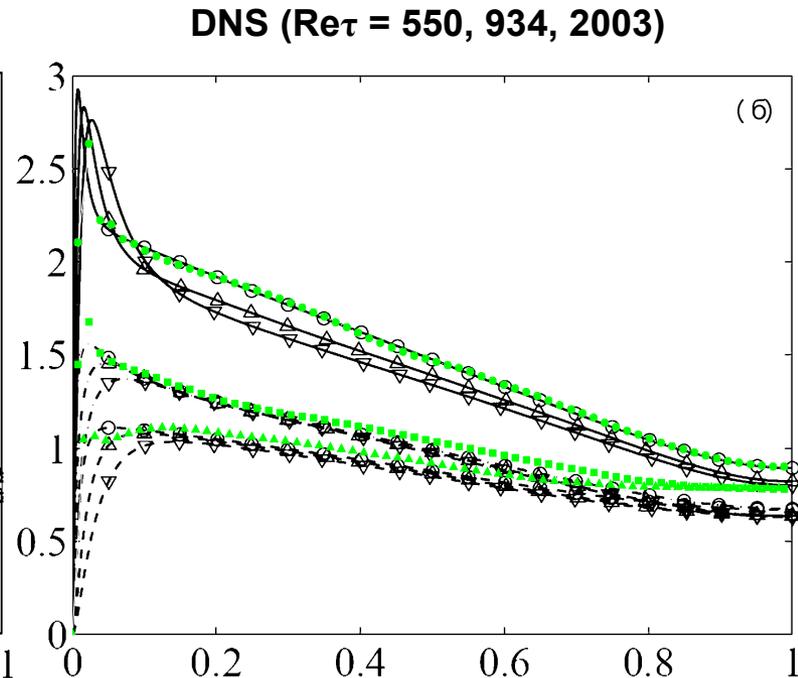
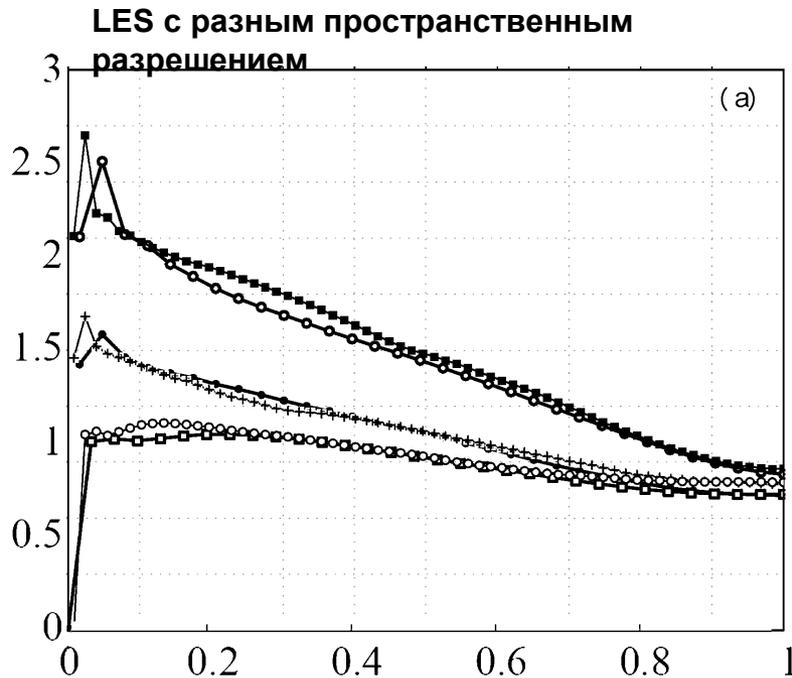
Dots - High Reynolds Princeton Superpipe data (Re = 3.5724E+07)

http://gasdyn.princeton.edu/data/e248/mckeon_data.html



- $L_x/h=18,28 \sim 5,8 \pi$, $L_y/h=4,57 \sim 1,45 \pi$, $(\Delta x: \Delta y: \Delta z) = (1 : 1 : 0.875)$, 512x128x64
- $L_x/h=27,42 \sim 8,7 \pi$, $L_y/h=9,14 \sim 2,9 \pi$, $(\Delta x: \Delta y: \Delta z) = (1 : 1 : 0.875)$ 768x256x64
- $L_x/h=18,28 \sim 5,8 \pi$, $L_y/h=9,14 \sim 2,9 \pi$, $(\Delta x: \Delta y: \Delta z) = (2 : 2 : 0.875)$, 256x128x64

Нормированные СКО трех компонент скорости



Видно, что LES со смешанным динамическим замыканием и консервативной численной схемой высокого порядка точности способна достаточно точно воспроизвести энергию пульсаций в сдвиговом пристеночном турбулентном потоке с очень большим Re .

При этом затраты компьютерного времени в LES (~10 суток на 16-ти процессорах параллельно кластера ИВМ РАН (Intel Itanium2)) на несколько порядков меньше, чем при прямом численном моделировании.

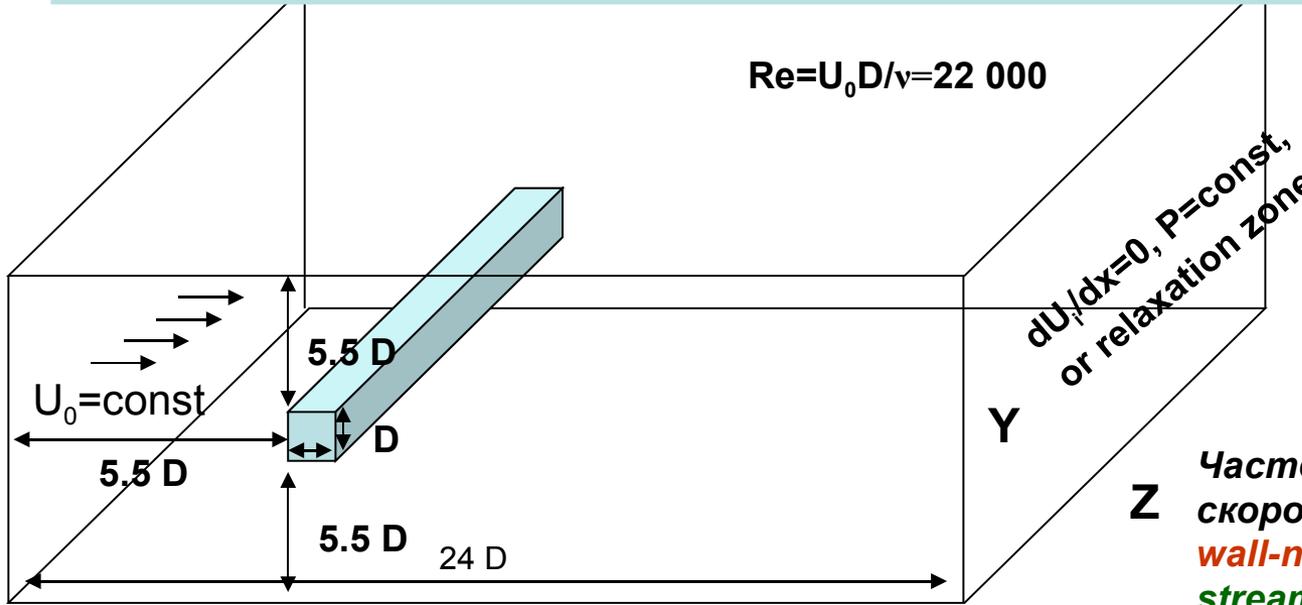
Например, один из наиболее дорогих (с точки зрения потребления компьютерных ресурсов) численных экспериментов по DNS моделированию турбулентного потока в канале (Hoyas, Jimenez, 2005) потребовал приблизительно 120-ти суток непрерывного счета на 2048 процессорах самого мощного в Европе массивно параллельного компьютера Marenostrum (Барселона). Для турбулентности в АПС такой DNS расчет соответствует моделированию в параллелепипеде $150 \times 50 \times 10$ см. сроком на 1.2 секунды.

Моделирование турбулентного обтекания параллелепипеда

$$Re = U_0 D / \nu = 22\ 000$$

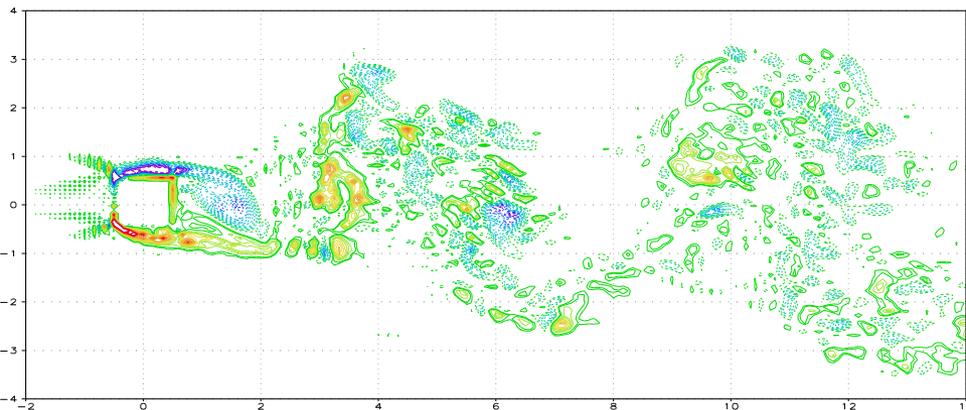
Также, как и при нестационарном ламинарном обтекании за цилиндром возникает периодическое отделение вихрей – дорожка Кармана.

Однако на фоне крупных, квазидвумерных вихрей развивается мелкомасштабная трехмерная турбулентность



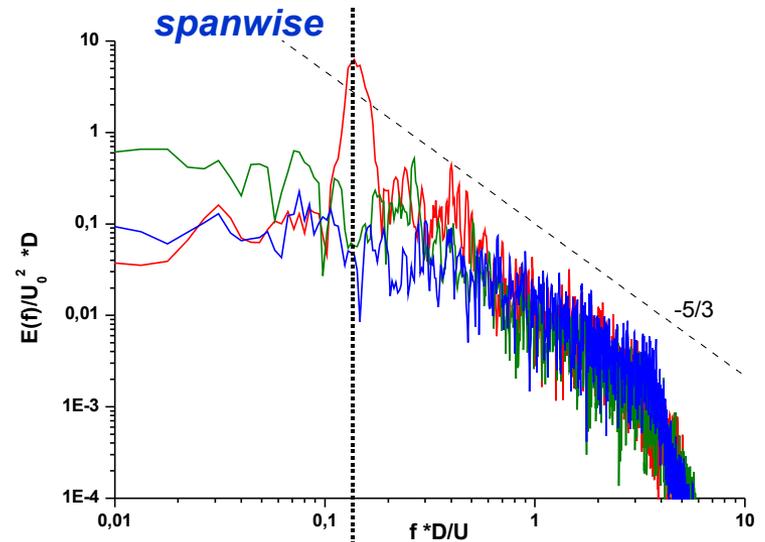
X

Мгновенные значения z – компоненты завихренности от $w_z D / U_0 = -10$ до $w_z D / U_0 = 10$

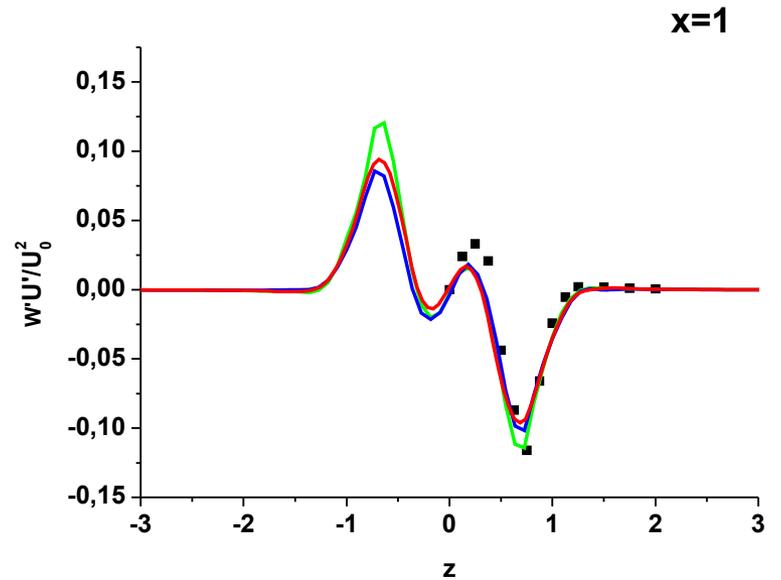
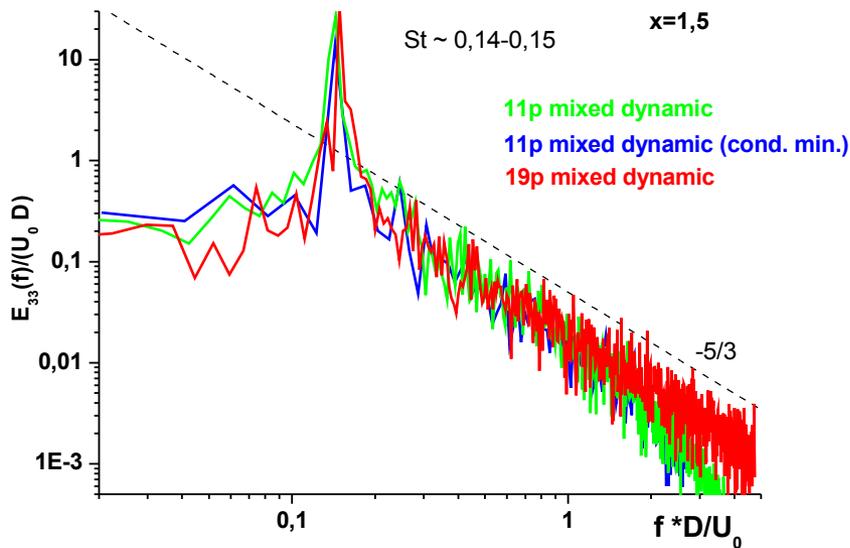
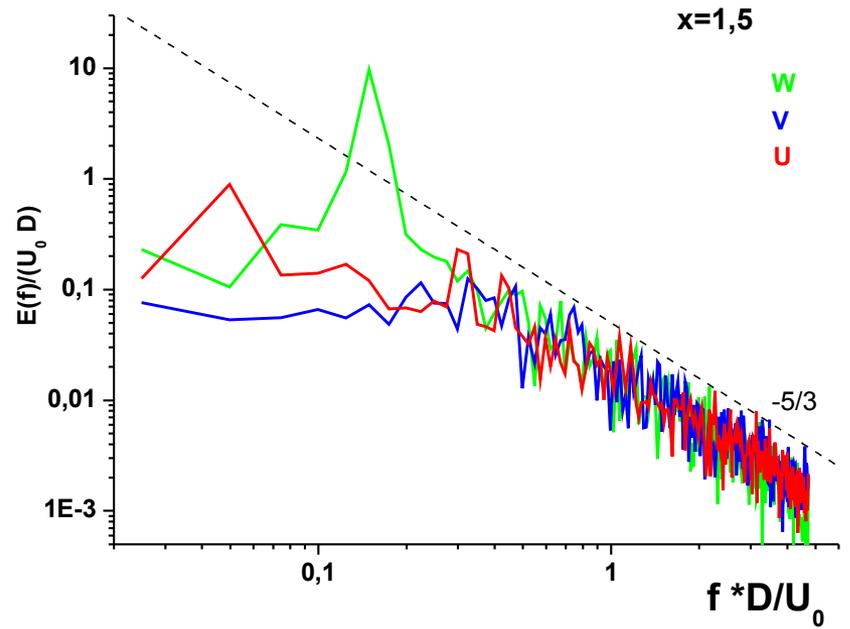
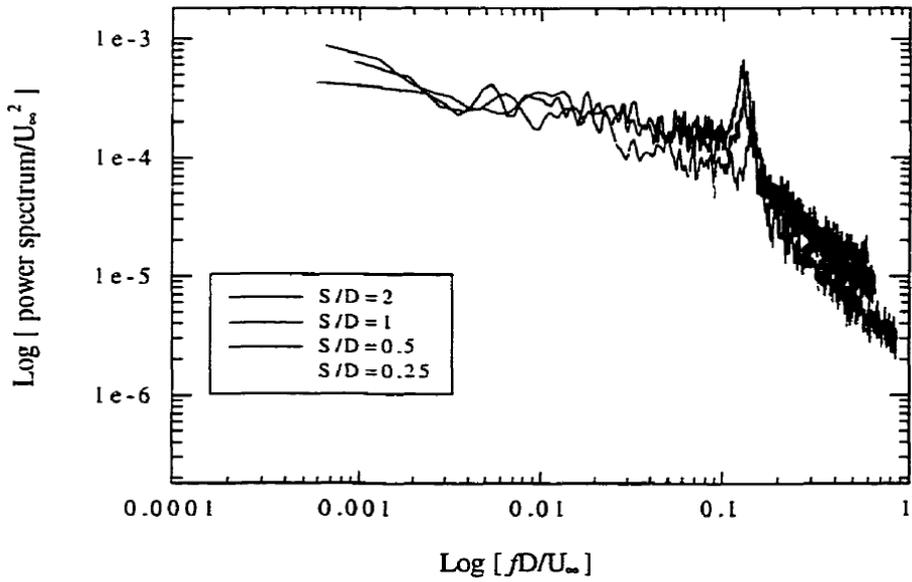


Z Частотный спектр компонент скорости за цилиндром ($x=2.5D$):

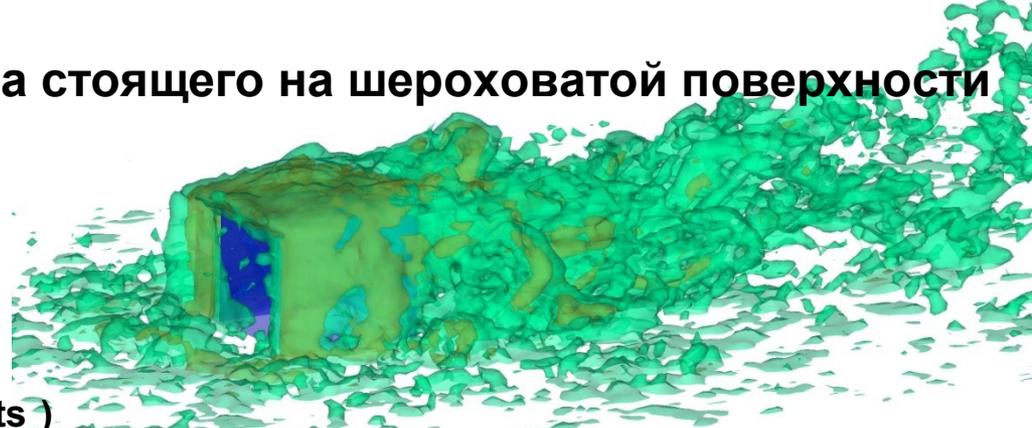
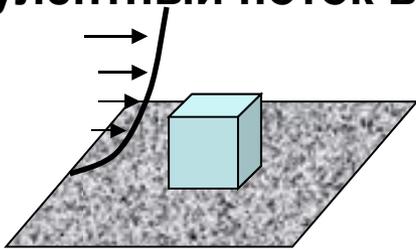
wall-normal;
streamwise;
spanwise



Частота
Струаля



Турбулентный поток вокруг куба стоящего на шероховатой поверхности

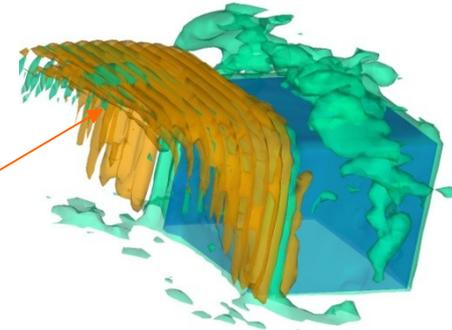
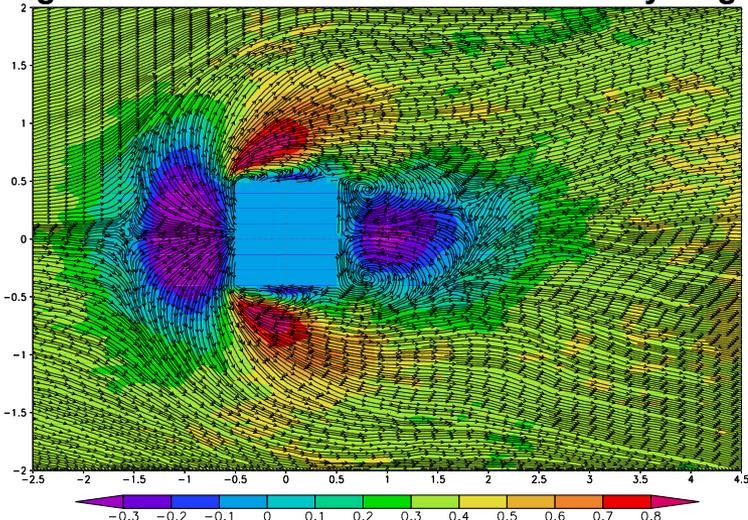


Instantaneous magnitude of vorticity $|w|*D/U_0$ (2, 4)

Hussein and Martinuzzi, 1996 (LDA measurements)

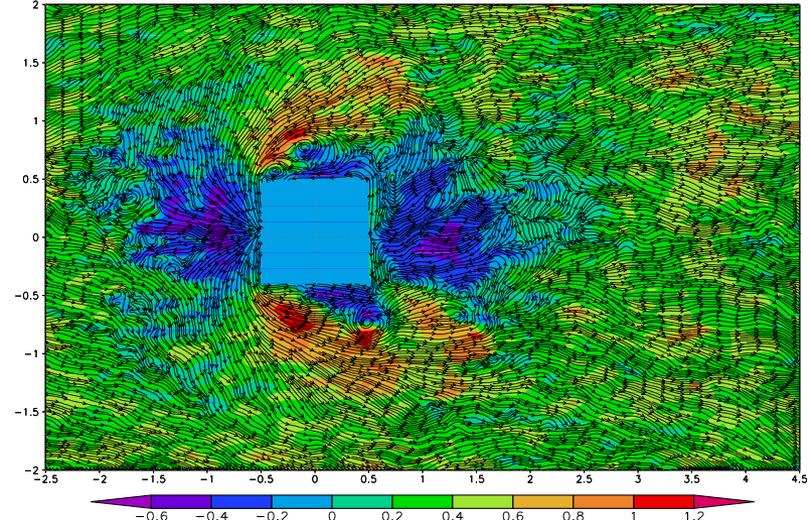


Averaged streamlines and streamwise velocity magnitude



C_s (0.4, 0.1)

Instantaneous streamlines and streamwise velocity magnitude



Возможное практическое приложение: расчет турбулентных потоков воздуха и переноса примеси между зданиями городской застройки

Модель позволит производить диагностические расчеты, результатом которых являются подробные трехмерные модельные данные о силе ветра, его изменчивости, величине максимальных порывов, ветровой нагрузке на здания, а также сведения об обмене теплом на боковых стенках и крышах зданий.

Кроме того, модель позволит предсказывать распределение концентрации безынерционной и инерционной пассивной примеси, поступающей в городскую среду из локальных или распределенных источников.

Предполагается, что с помощью данной модели будет возможно проводить расчеты в областях с горизонтальным размером до 1-2 км. и вертикальным размером несколько сотен метров при пространственным разрешении 1 - 5 метров, что позволит подробно описать реальную конфигурацию застройки и получать статистически достоверные результаты моделирования.

Модели, основанные на введении турбулентной вязкости и турбулентной диффузии

Е-ε модель (широко распространена в геофизических RANS)

Уравнение для турбулентной кинетической энергии движений подсеточного масштаба:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_j E}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{K_m}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial x_j} + K_m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)^2 - \delta_{i3} \frac{1}{\rho_0} K_h \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} - \epsilon$$

Уравнение для скорости диссипации ТКЭ:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{K_m}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + c_1 S \epsilon / E + c_2 B \epsilon / E - c_3 \epsilon^2 / E$$

Ограничение максимального размера подсеточных вихрей:

$$l = \frac{c_\epsilon E^{3/2}}{\epsilon}, \quad \epsilon > \epsilon_{min} = \frac{c_\epsilon E^{3/2}}{l_{max}}$$

$$K_m = \frac{c_\mu E^2}{\epsilon} \quad \tau_{ij} = -K_m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad F a_i = -K_h \frac{\partial \bar{a}}{\partial x_i}$$

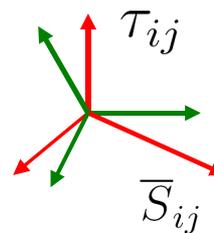
+ Учтены эффекты стратификации

+ Учтены эффекты переноса мелкомасштабной турбулентности основным потоком.

+/- Больше количество констант с одной стороны дает возможность лучше настроить модель на воспроизведение одного физического процесса, например конвективной циркуляции в АПС, но с другой стороны делает ее еще менее универсальной.

- Очень малая корреляция с реально наблюдаемым тензором турбулентных напряжений, свойственная всем моделям диффузионного типа

Основной недостаток моделей диффузионного типа – слабая корреляция моделируемых и наблюдаемых подсеточных сил вследствие несовпадения ориентации тензора напряжений и тензора скоростей деформации.

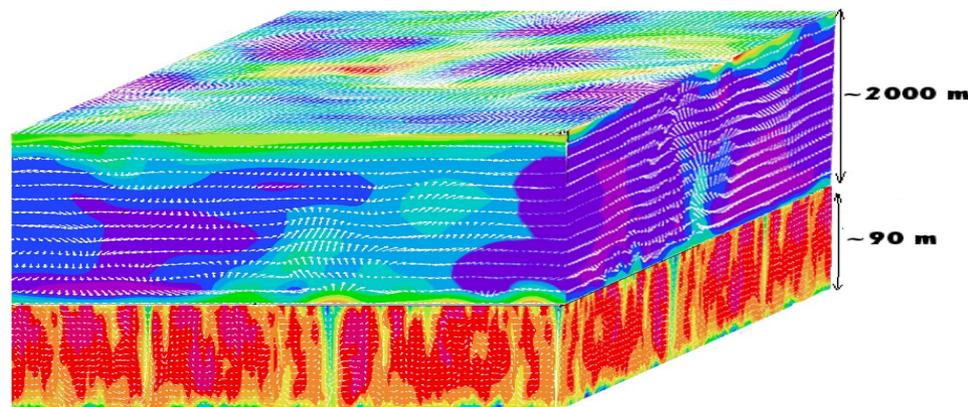
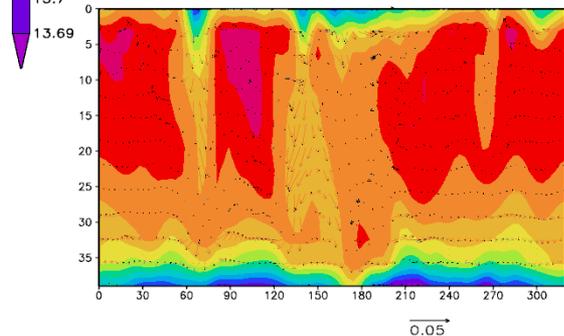
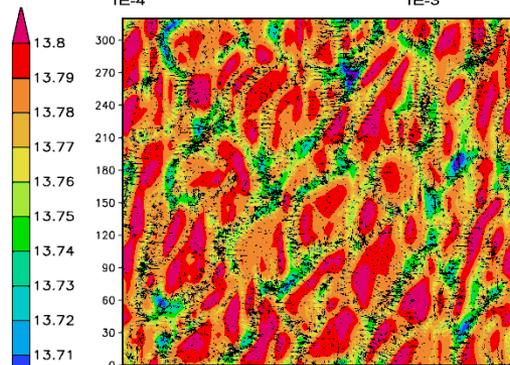
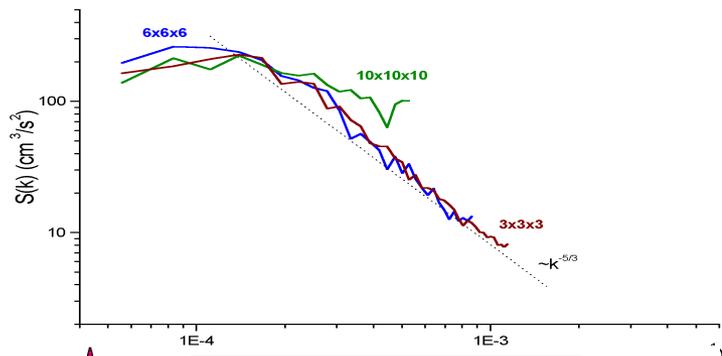


собственные векторы тензоров

Основное достоинство – способность правильно описывать прямой каскад энергии от разрешаемых явно вихрей к подсеточным.

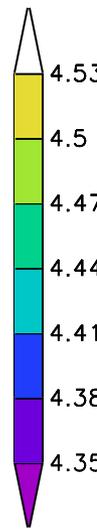
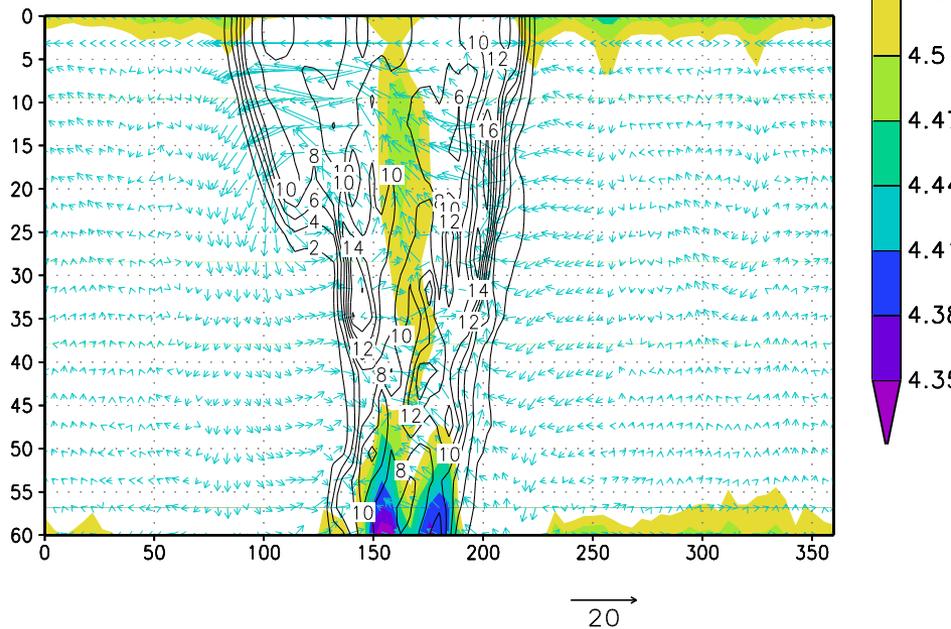
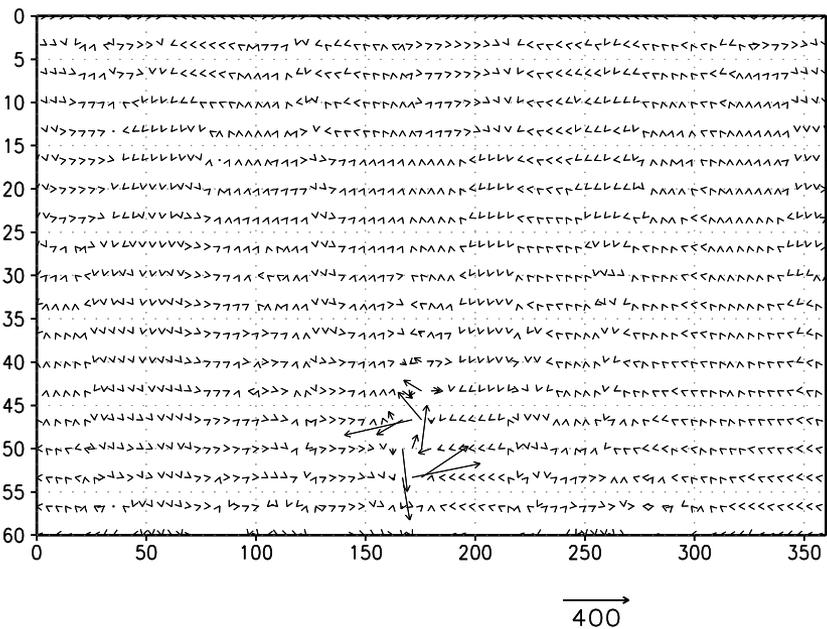
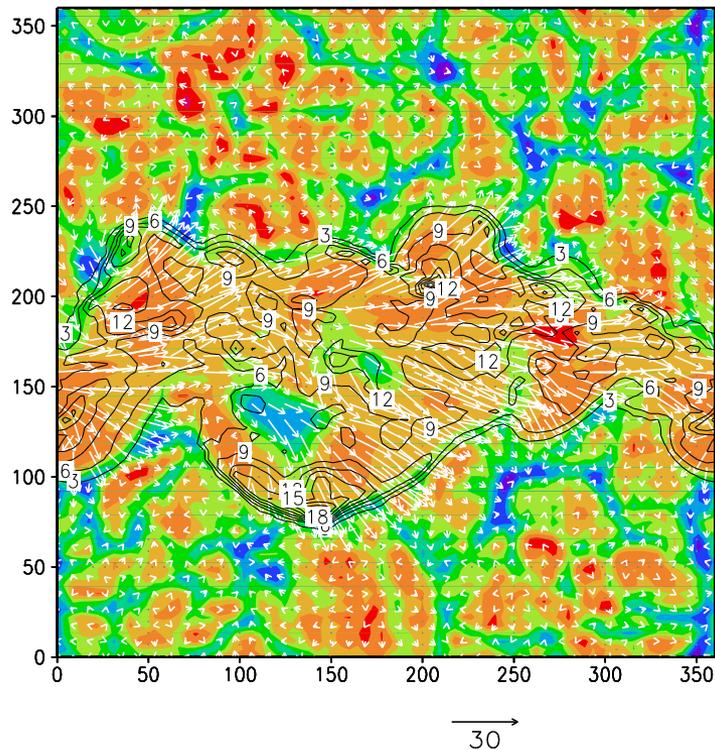
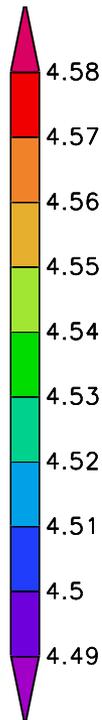
При наличии сильной анизотропии (струйные, пристеночные течения) такие модели не могут одновременно воспроизвести и диссипацию энергии и подсеточный поток импульса, вносящий существенный вклад в средний суммарный поток импульса.

Область применения диффузионных моделей - квазиоднородные турбулентные течения поддерживаемые за счет крупномасштабного внешнего воздействия (например, неустойчиво стратифицированные пограничные слои атмосферы и океана)



Моделирование конвективных ВСО и ПСА при помощи модели с E-ε замыканием

Моделирование процесса распространения глубинного возмущения



Перенос мелкодисперсной примеси: Лагранжев подход

Одновременно с расчетом динамики турбулентного потока рассчитываются траектории отдельных частиц примеси.

Частицы могут быть рассортированы по группам, согласно их размеру и массе.

На параллельных вычислительных системах Лагранжев подход позволяет одновременно с расчетом ветра вычислить траектории десятков миллионов частиц.

Компьютерные затраты необходимые для этого обычно меньше чем затраты на расчет динамики.

При достаточно большом количестве трассеров в любой момент времени может быть рассчитано пространственное распределение концентрации примеси.

Уравнение движения частицы примеси в потоке воздуха

$$m\ddot{x}_i = f_i + \delta_{iz}mg$$

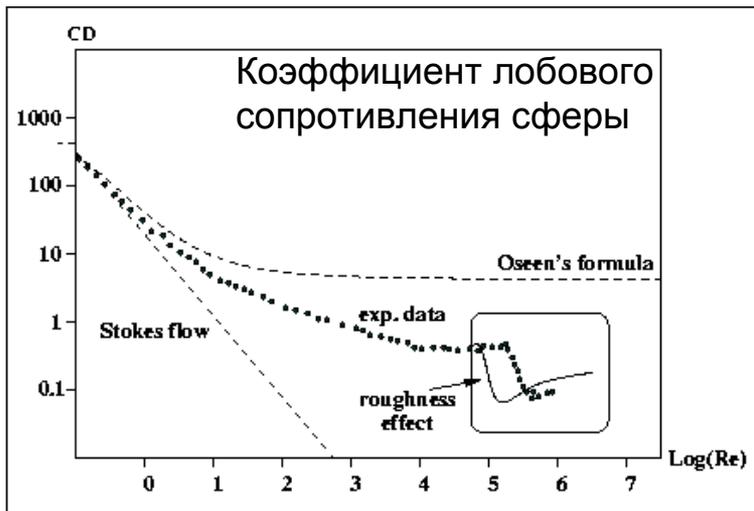
← Сила сопротивления

Для малых чисел Рейнольдса справедлива формула Стокса:

$$f_i = 6\pi r\mu(u_i - \dot{x}_i)$$

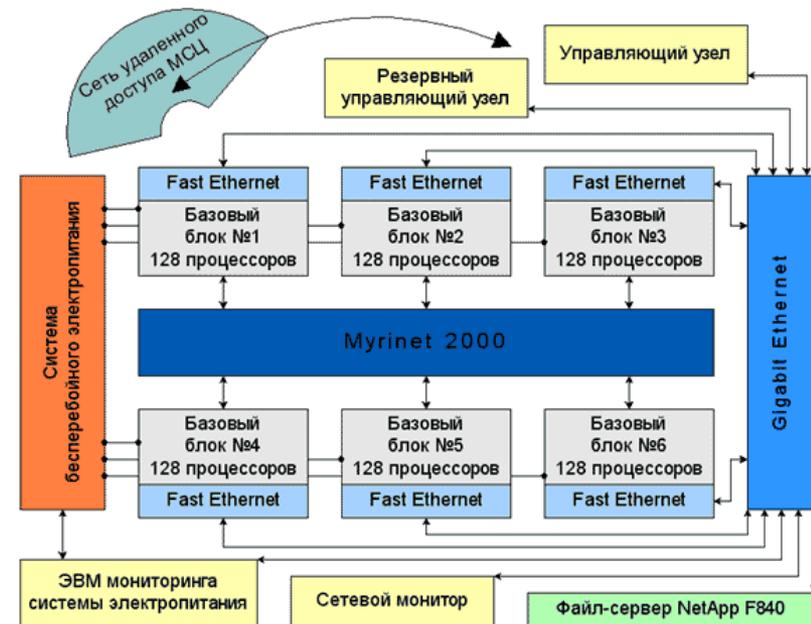
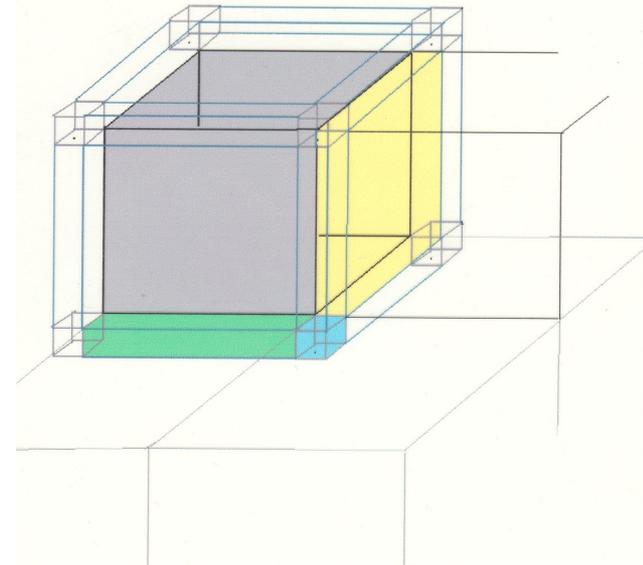
$$Re_p = 2r(u_i - \dot{x}_i)/\mu \quad \text{- число Рейнольдса для частицы}$$

Уже для чисел $Re_p \sim 10$ формула Стокса занижает аэродинамическое сопротивление и требуется коррекция



Методика распараллеливания

- Параллельные версии моделей ориентированы на использование на суперкомпьютерах с распределенной памятью.
- Межпроцессорные обмены выполнены с использованием стандарта **MPI**
- неблокирующие функции приема-передачи
- **2-D** и **3-D** декомпозиции расчетной области
- на каждом модельном шаге процессы обмениваются между собой только данными, относящимися к граничным узлам подобластей декомпозиции.
- Оперативная память динамически распределяется между процессами (используются возможности FORTRAN-90)
- Отладка и тестирование параллельных версий моделей производилась на суперкомпьютере МСЦ МВС1000-М (768 процессоров, пиковая производительность - 1Tflops)

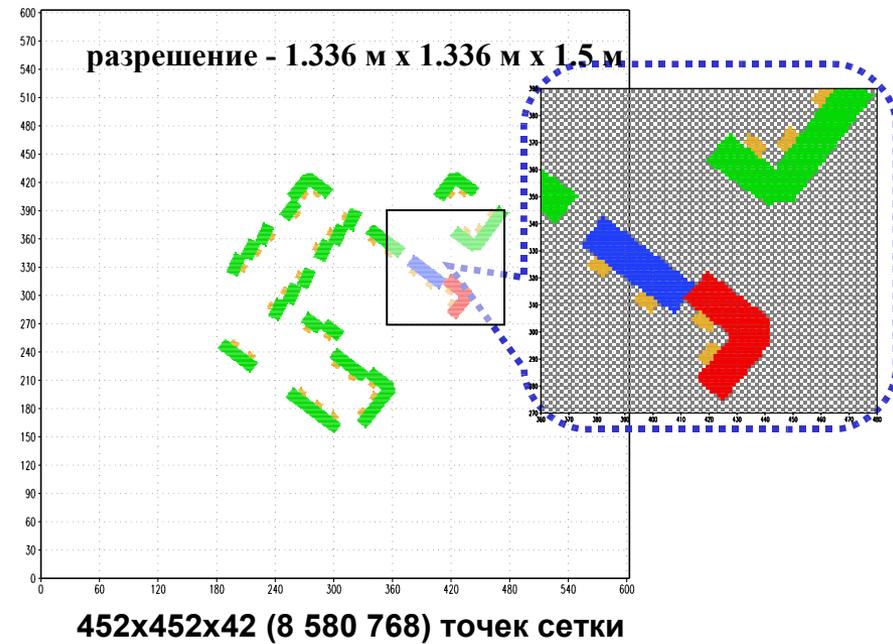


Моделирование обтекания городской застройки турбулентным потоком воздуха



Средний модуль скорости ветра (м/с) у земли (1,5 м), независимо от направления.

Величина максимальных порывов ветра в экспериментах (независимо от направления).



452x452x42 (8 580 768) точек сетки

Необходимо подробное пространственное разрешение.

Задача может быть успешно решена только при использовании современных параллельных вычислительных систем.

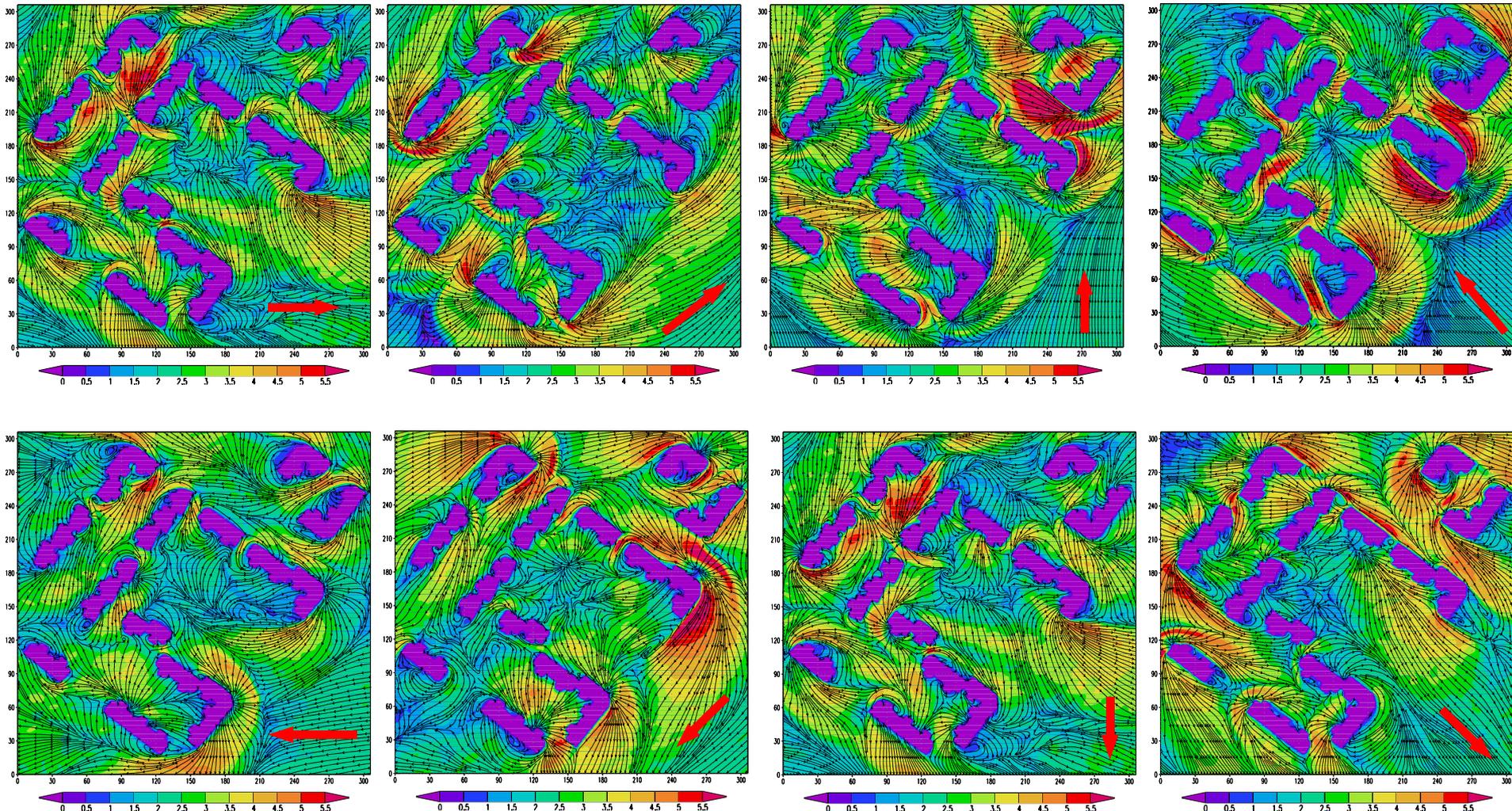
1973 Deardorff J.W. The use of subgrid transport equations in a three-dimensional model of atmospheric turbulence // Journal of Fluids Engineering.



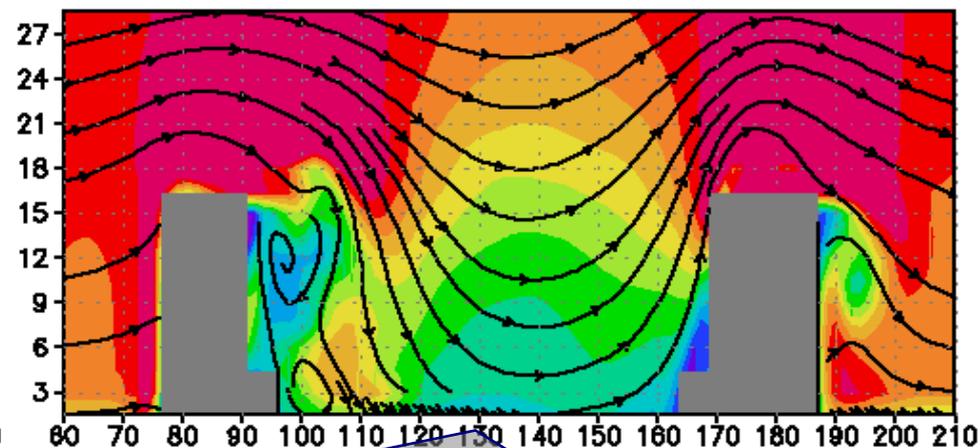
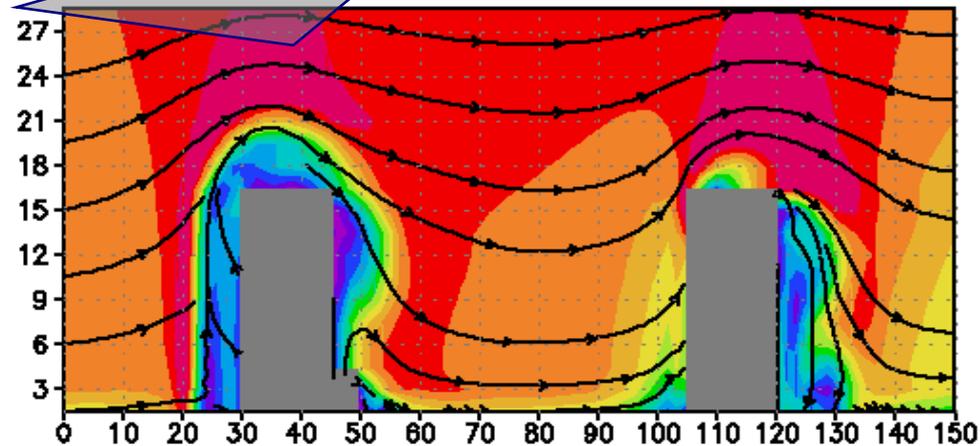
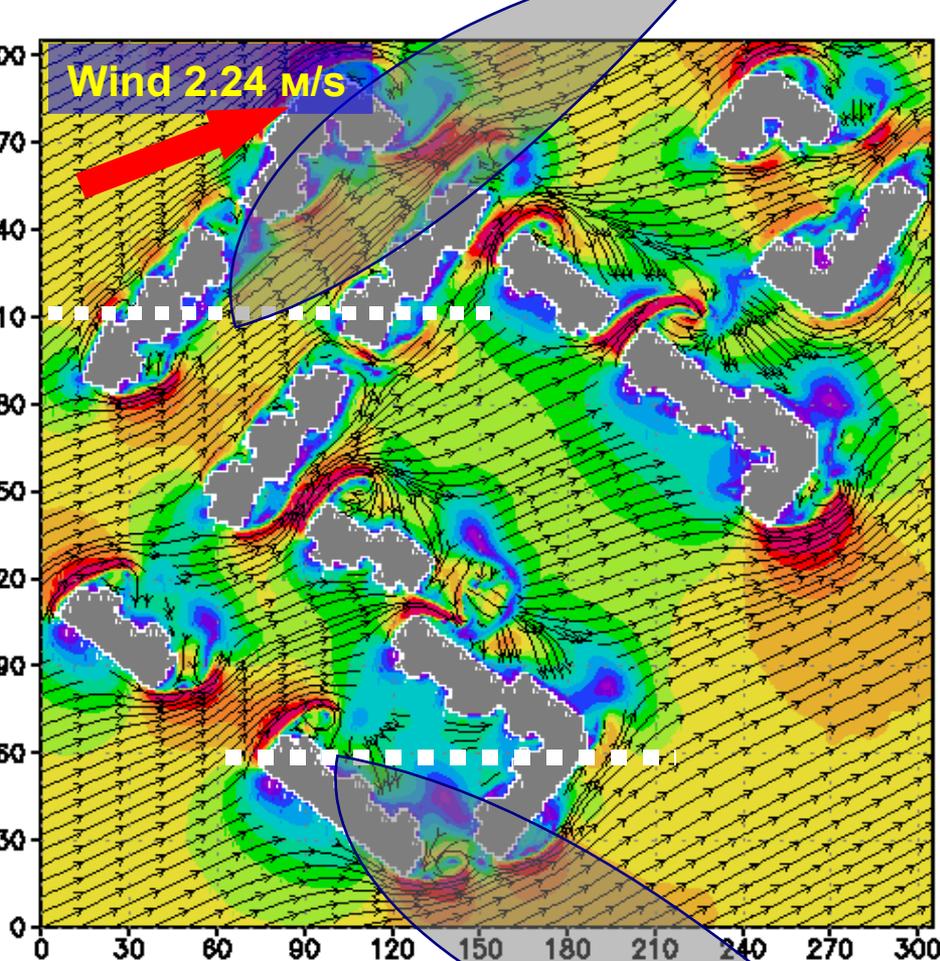
~ 30 лет

2002 Walton et al. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street Canyon... Atmos. Environ. 36, 3601-3613.

**Средний модуль скорости ветра (м/с) и направление среднего ветра
(линии тока) на высоте 1,5 м над поверхностью земли.
Направление фонового ветра указано красной стрелкой .
Скорость ветра на высоте 50 м равна 6 м/с.**

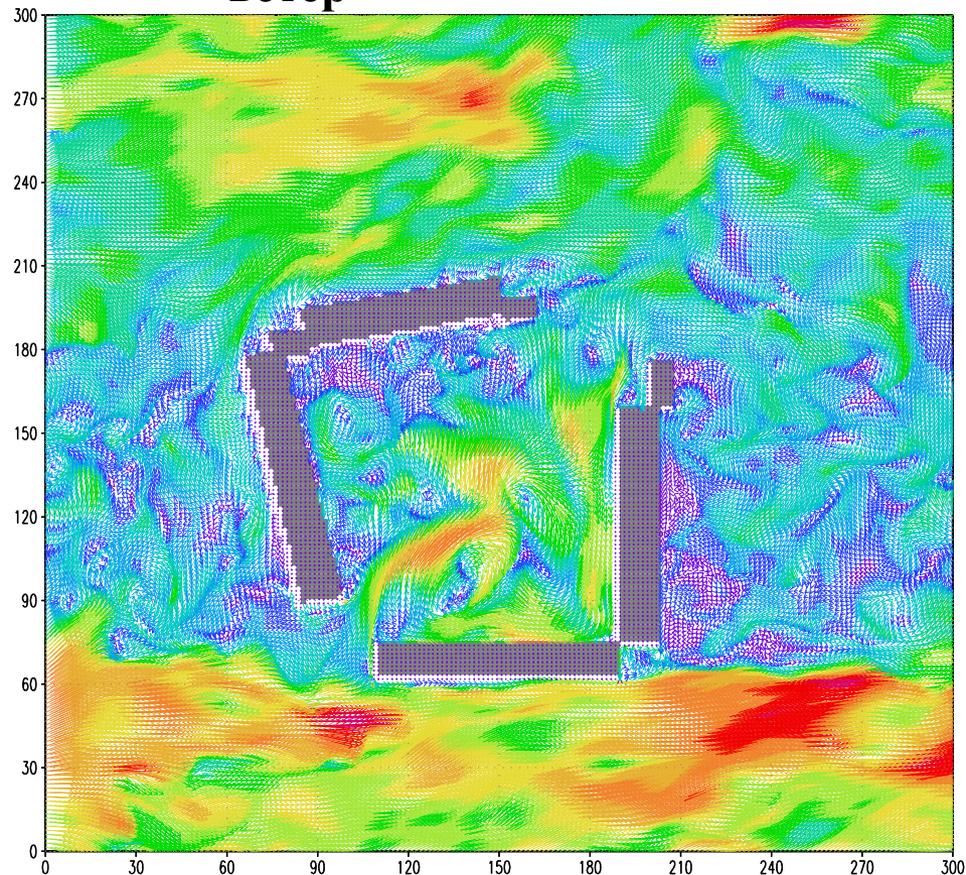


Турбулентное течение между зданиями



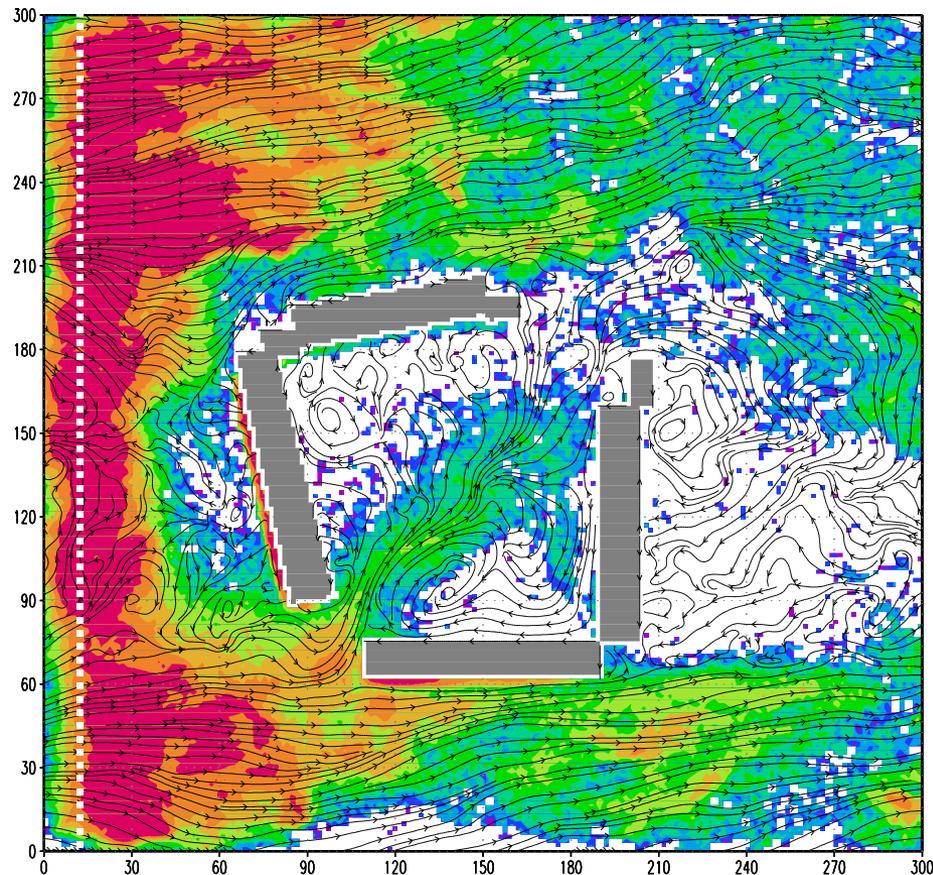
Пример расчета переноса мелкодисперсной примеси турбулентным потоком воздуха между зданиями

ветер



→
6

Концентрация примеси



**Частицы выбрасывались возле поверхности земли (вдоль пунктирной линии).
Максимальное количество частиц во время расчета ~ 10 000 000.**

Спасибо за внимание!

