

# Численное моделирование радиационной подледной конвекции при наличии продольного градиента давления

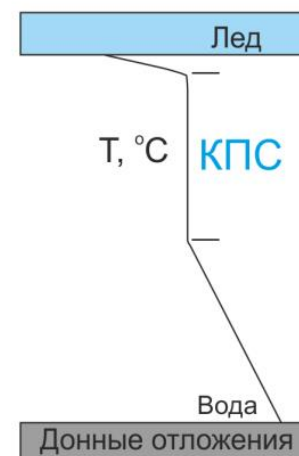
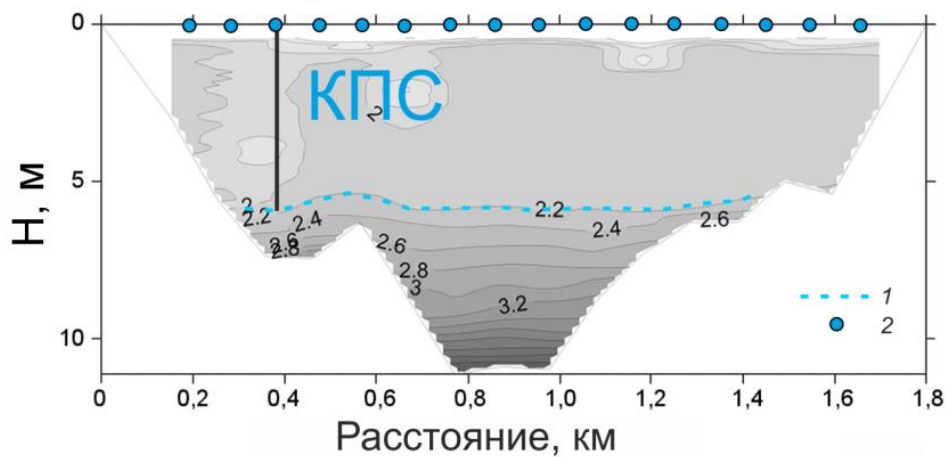
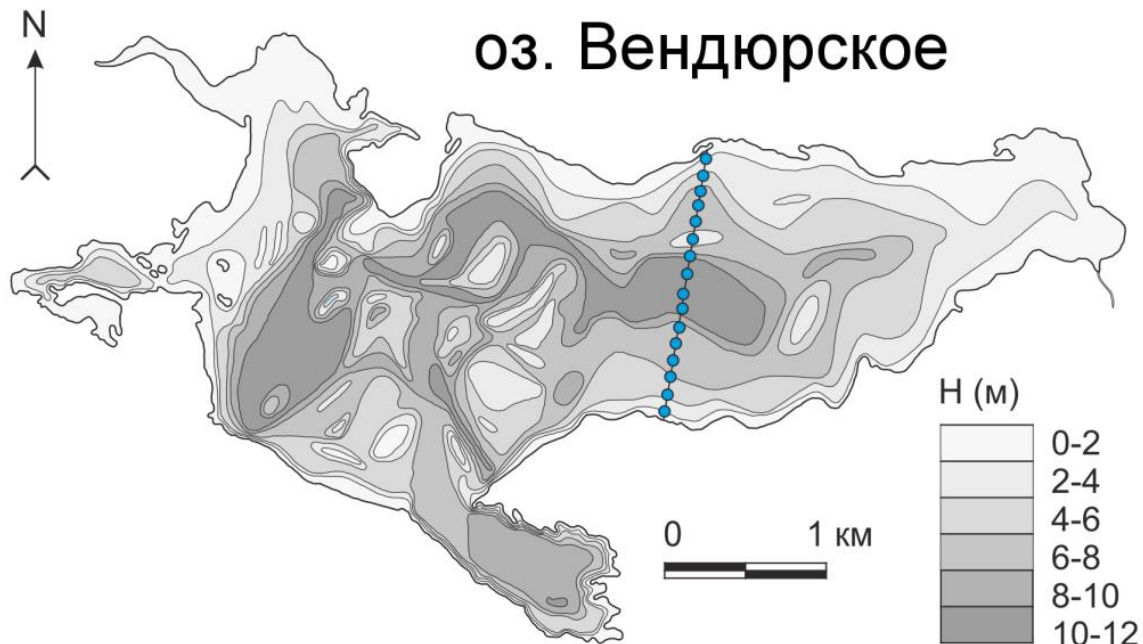
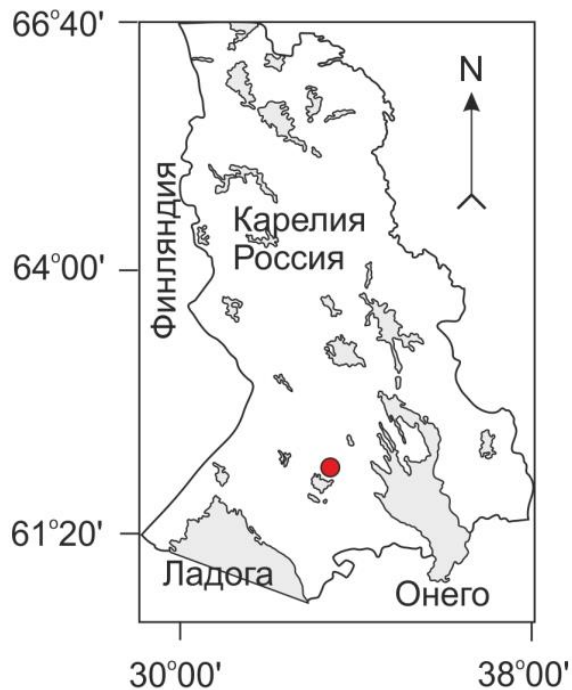
*Смирнов С.И.<sup>1</sup>, Смирновский А.А.<sup>1,2</sup>, Богданов С.Р.<sup>1</sup>,  
Здоровеннов Р.Э.<sup>1</sup>, Пальшин Н.И.<sup>1</sup>, Здоровеннова Г.Э.<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,  
Петрозаводск

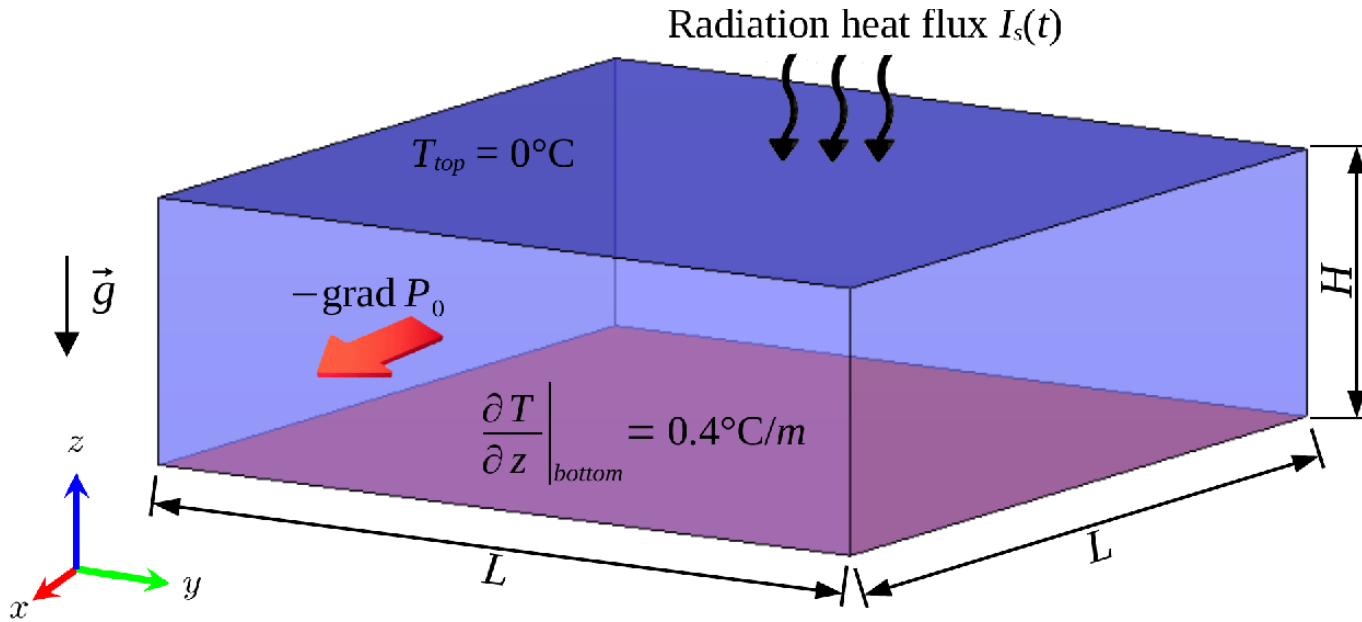
<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург

7 сентября 2023 г.

# Введение



# Постановка задачи (1)



- Геометрия расчетной области:  $9.6 \times 9.6 \times 6.4 \text{ м}^3$
- Уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости с учётом плавучести в приближении Буссинеска
- Теплофизические параметры жидкости: чистая вода при  $2^\circ\text{C}$ , коэффициент температурного расширения задаётся как линейная функция температуры
- Начальные поля соответствуют состоянию равновесия: скорость равна нулю, для температуры задан линейный профиль
- На боковых поверхностях – условия периодичности

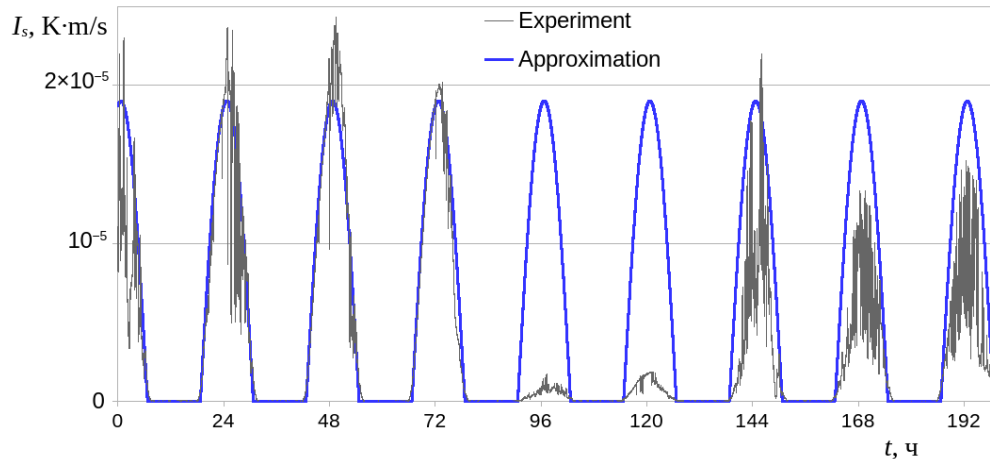
## Постановка задачи (2)

В расчетах используется двух-полосная модель объёмного поглощения радиации:

$$I(y, t) = I_s(t)[a_1 \exp(-\gamma_1 y) + a_2 \exp(-\gamma_2 y)]$$

Лучистый тепловой поток на границе «лёд-вода»  $I_s$  задаётся периодической функцией на основе экспериментальных данных:

$$I_s(t) = I_0 \max(\sin(2\pi t/T), 0)$$



$$T = 24 \text{ ч}$$

$$I_0 = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ K}\cdot\text{m/s}$$

$$\gamma_1 = 0.7 \text{ м}^{-1}$$

$$\gamma_2 = 2.7 \text{ м}^{-1}$$

$$a_1 = a_2 = 0.5$$

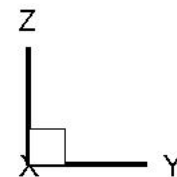
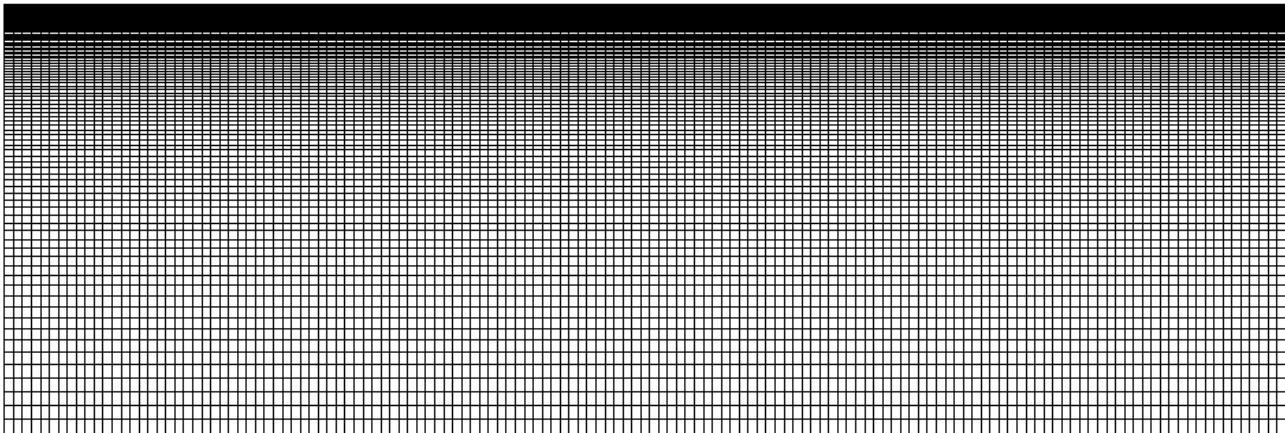
**Цель работы** – исследование влияние горизонтального движения на процессы образования и развития конвективно перемешанного слоя.

Для этого были также проведены расчёты с наложенным горизонтальным градиентом давления.

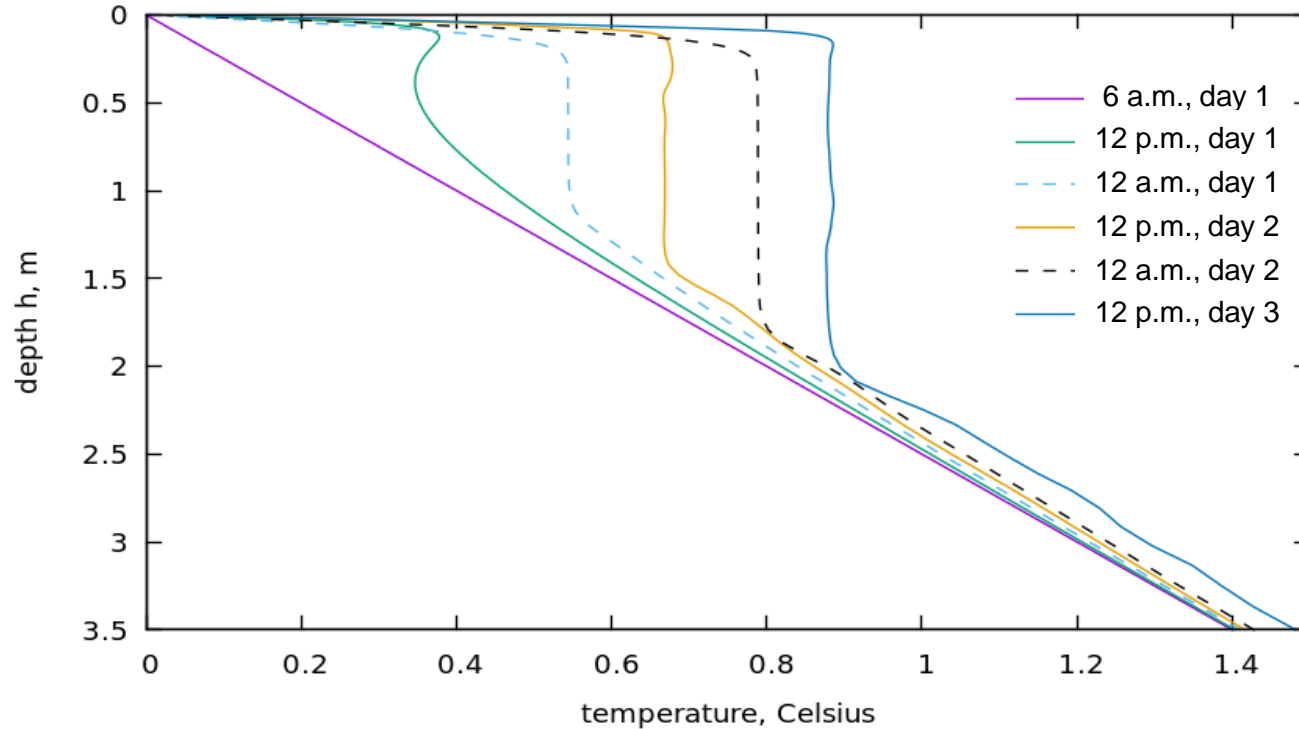
Градиент давления варьировался от  $3.3 \cdot 10^{-6}$  до  $3.3 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует скорости горизонтального движения от 1 мм/с до нескольких см/с.

# Вычислительные аспекты

- Конечно-объемный «неструктурированный» код SINF/Flag-S, разрабатываемый в ВШПМиВФ ФизМех СПбПУ
- Implicit LES подход
- Определяющие уравнения решаются с помощью алгоритма SIMPLEC
- Схема QUICK для конвективных слагаемых
- Структурированная расчётная сетка, сгущённая к поверхности льда
- Размер сетки – 27 млн ячеек
- Шаг по времени – 2.5 с
- Расчёты проводились с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический»

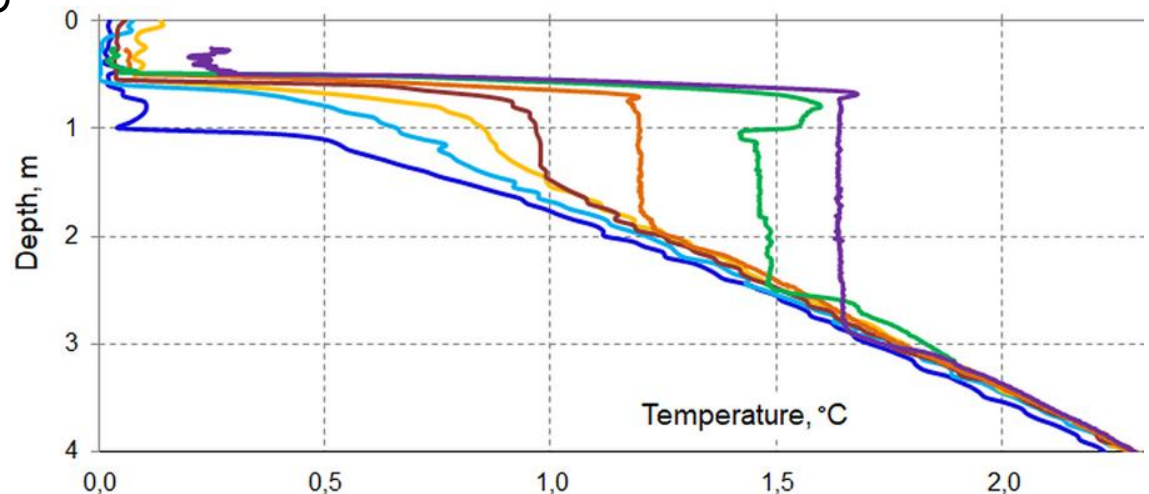


# Температурные профили в разные моменты времени



*Скорость роста конвективно-перемешанного слоя качественно и количественно согласуется с экспериментальными наблюдениями*

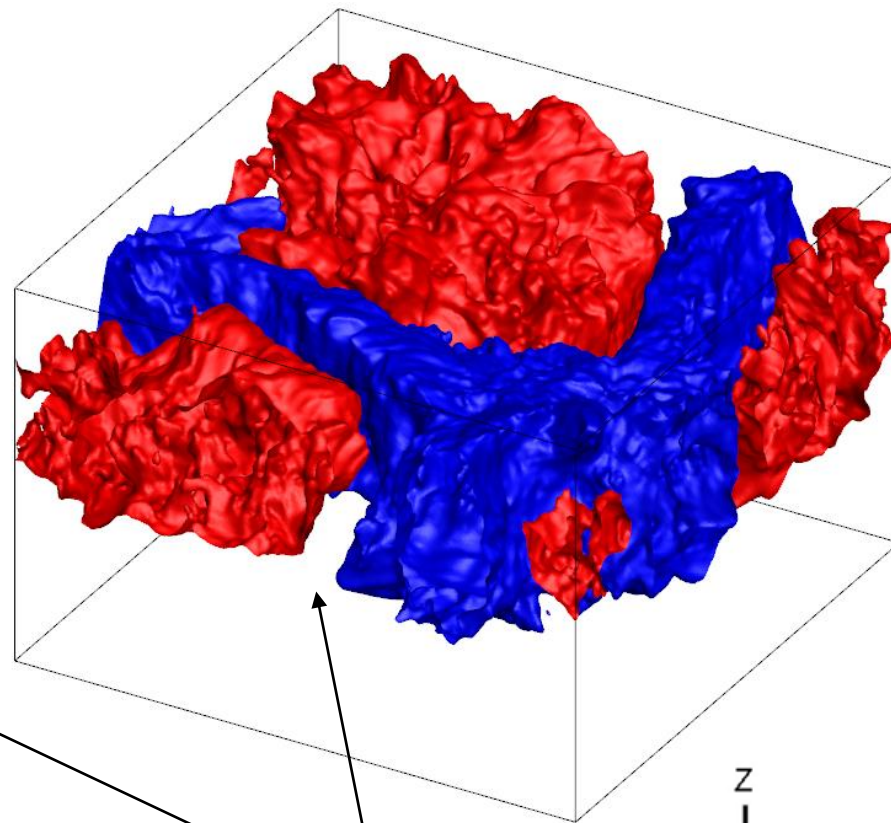
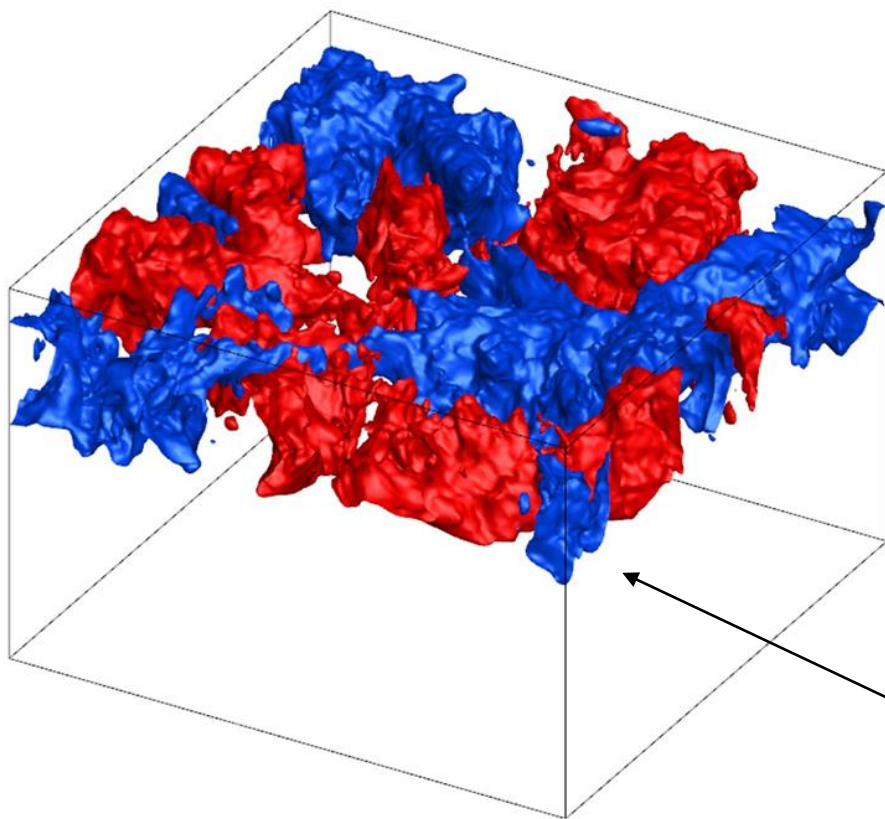
**Bogdanov S., et al** Deriving of Turbulent Stresses in a Convectively Mixed Layer in a Shallow Lake Under Ice by Coupling Two ADCPs // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 2, 17–28.



# Изоповерхности средней вертикальной составляющей скорости в исходном варианте

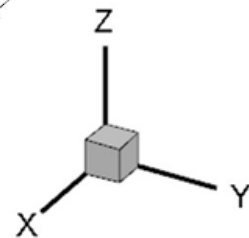
Осреднение проводилось с 14 до 15 часов четвертого дня

Осреднение проводилось с 14 до 15 часов девятого дня



$$|\langle V_z \rangle| = 0.7 \text{ мм/с}$$

*Конвективные ячейки*

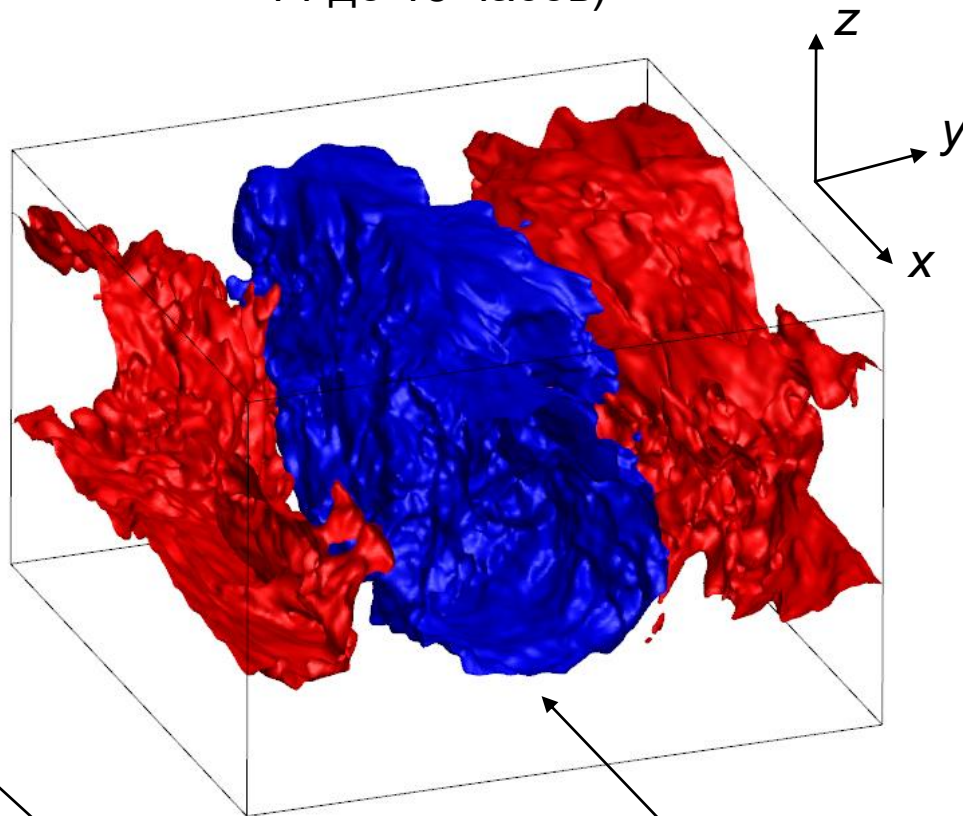
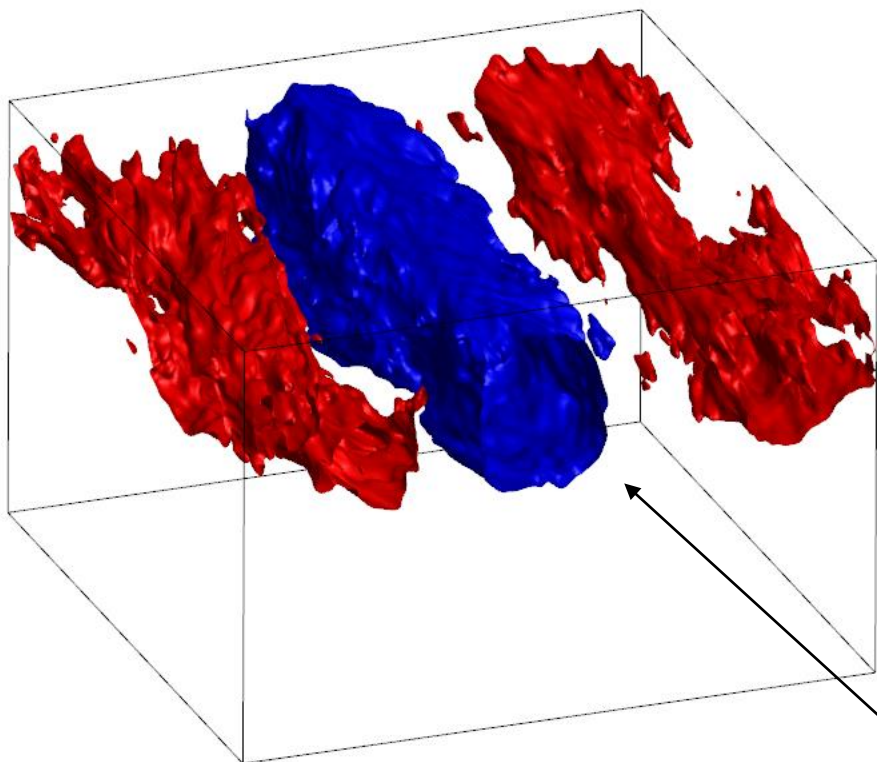




# Изоповерхности средней вертикальной составляющей скорости при задании градиента давления

$\partial p / \partial x = 3.3 \cdot 10^{-5}$  Па/м  
(второй день после задания градиента давления, осреднение с 14 до 15 часов)

$\partial p / \partial x = 3.3 \cdot 10^{-6}$  Па/м  
(девятый день после задания градиента давления, осреднение с 14 до 15 часов)



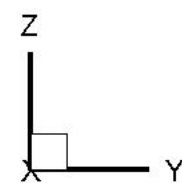
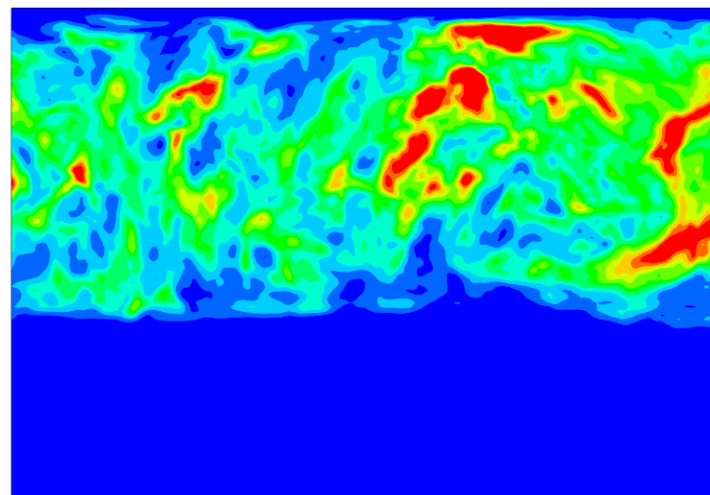
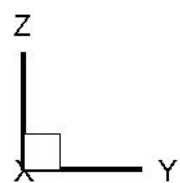
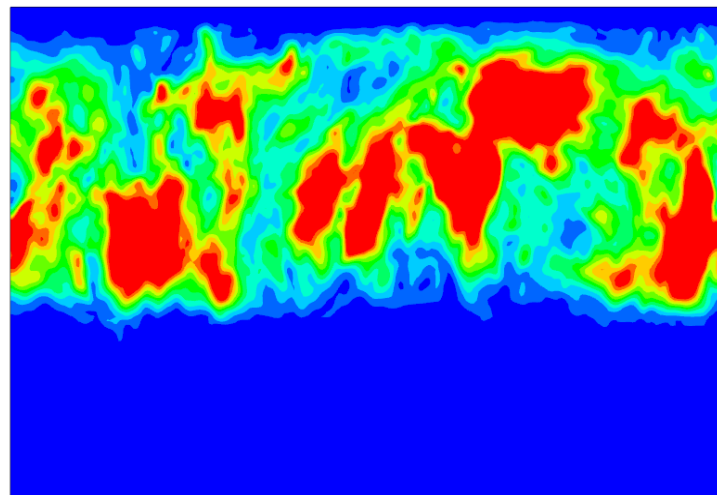
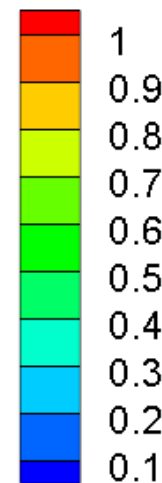
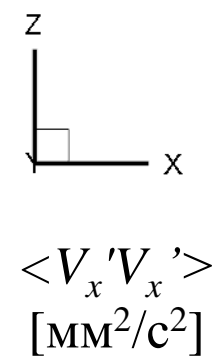
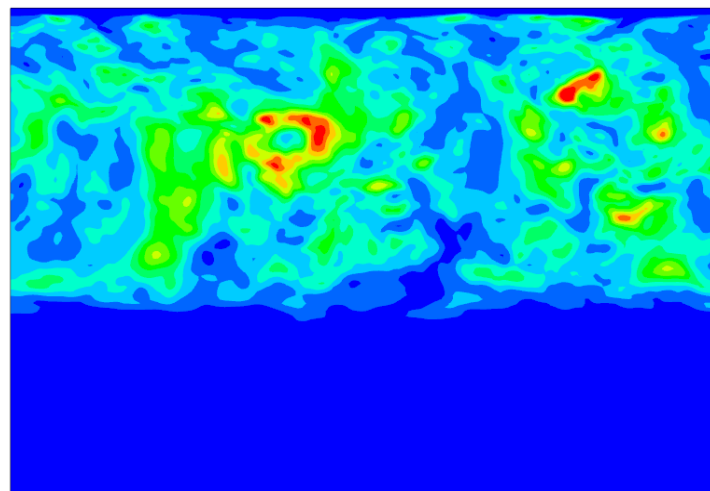
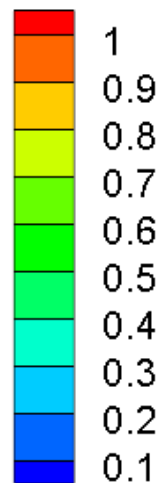
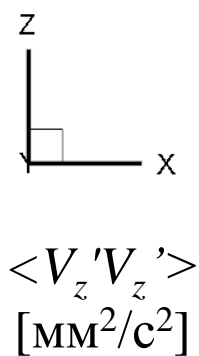
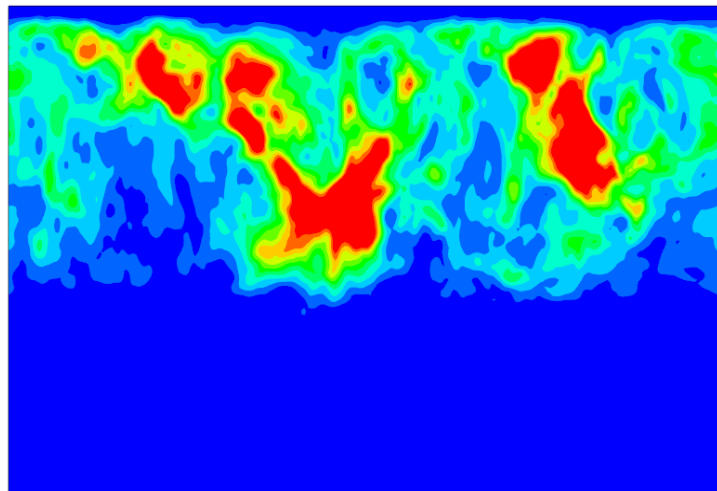
$|\langle V_z \rangle| = 0.4$  мм/с

**Формирование двумерных валов**

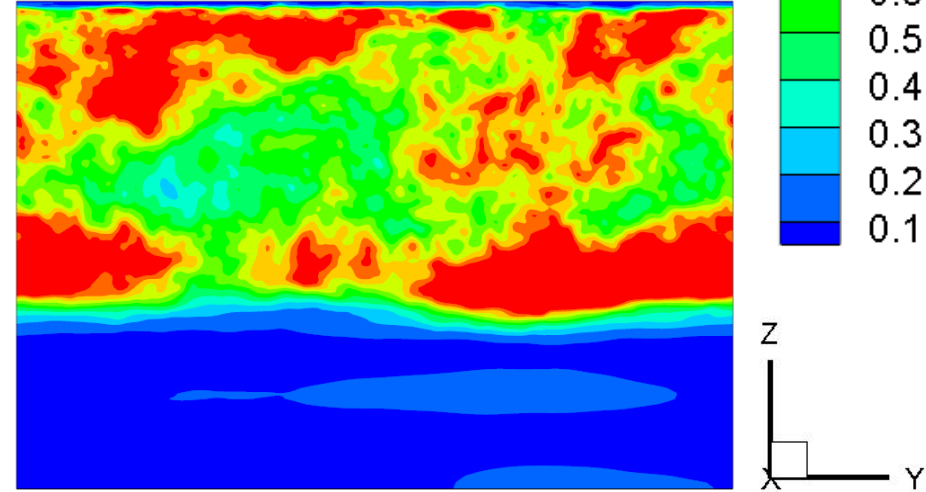
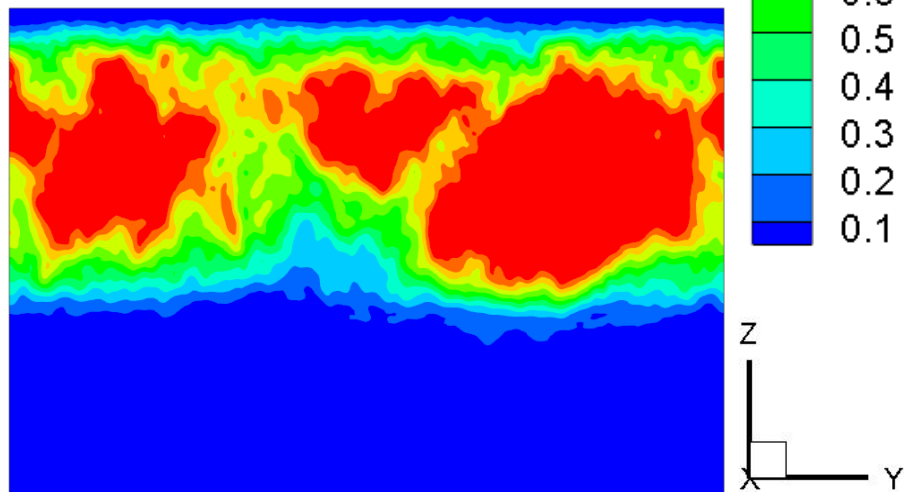
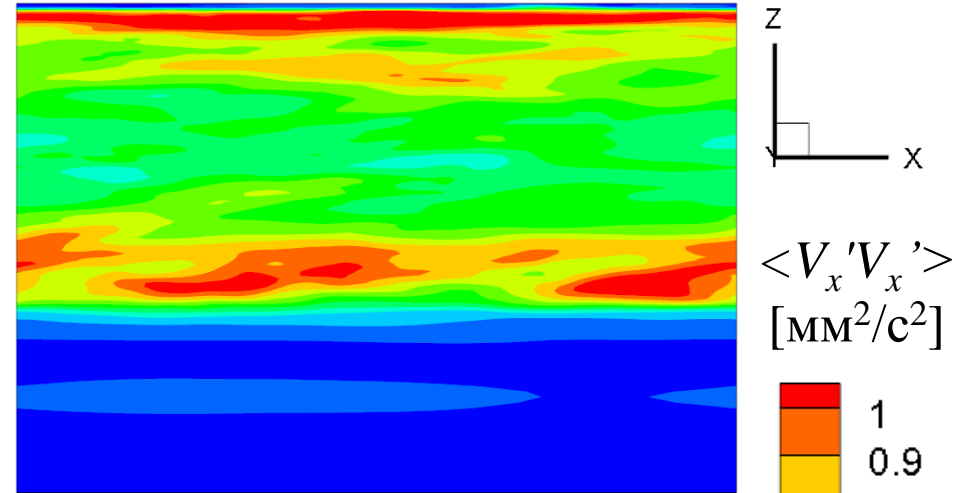
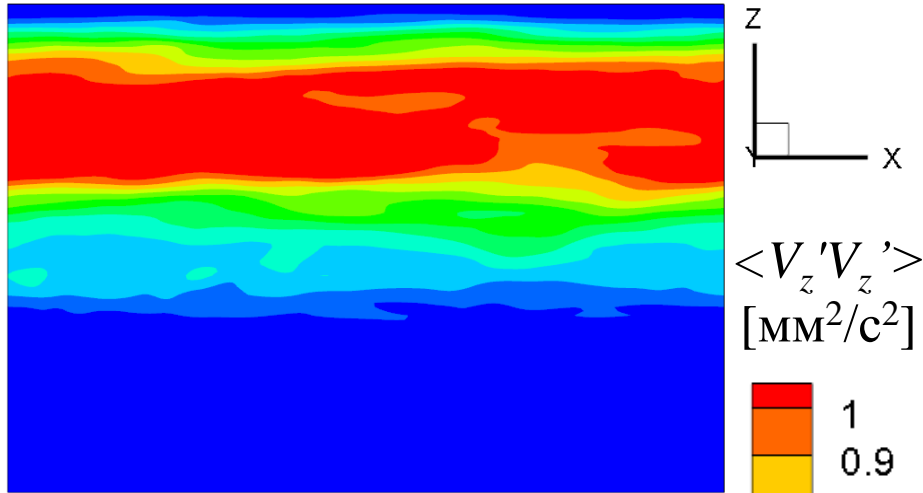


# Поля пульсаций компонент скорости в вертикальном сечении в исходном варианте

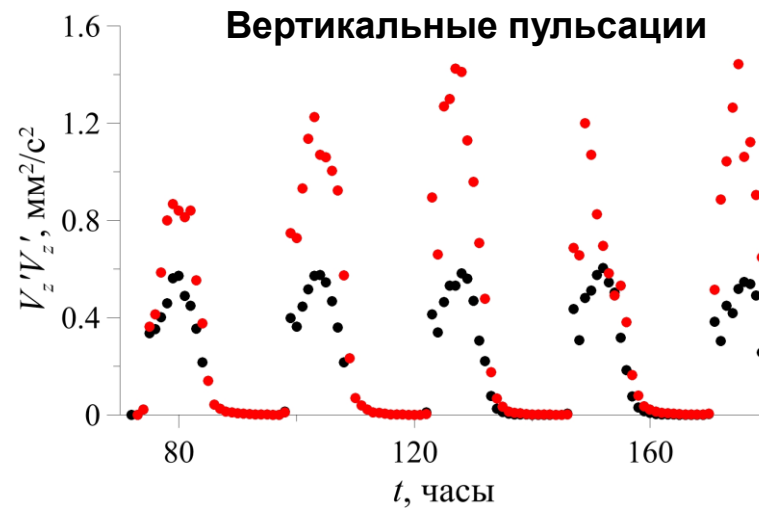
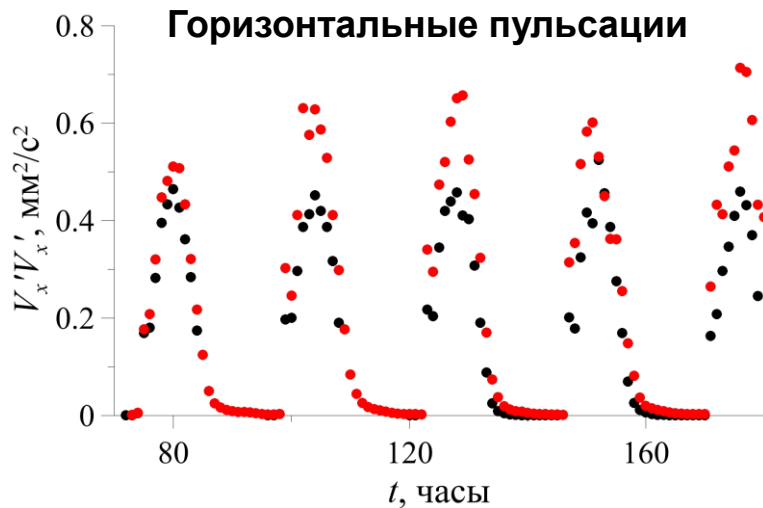
(осреднение проводилось с 14 до 15 часов восьмого дня)



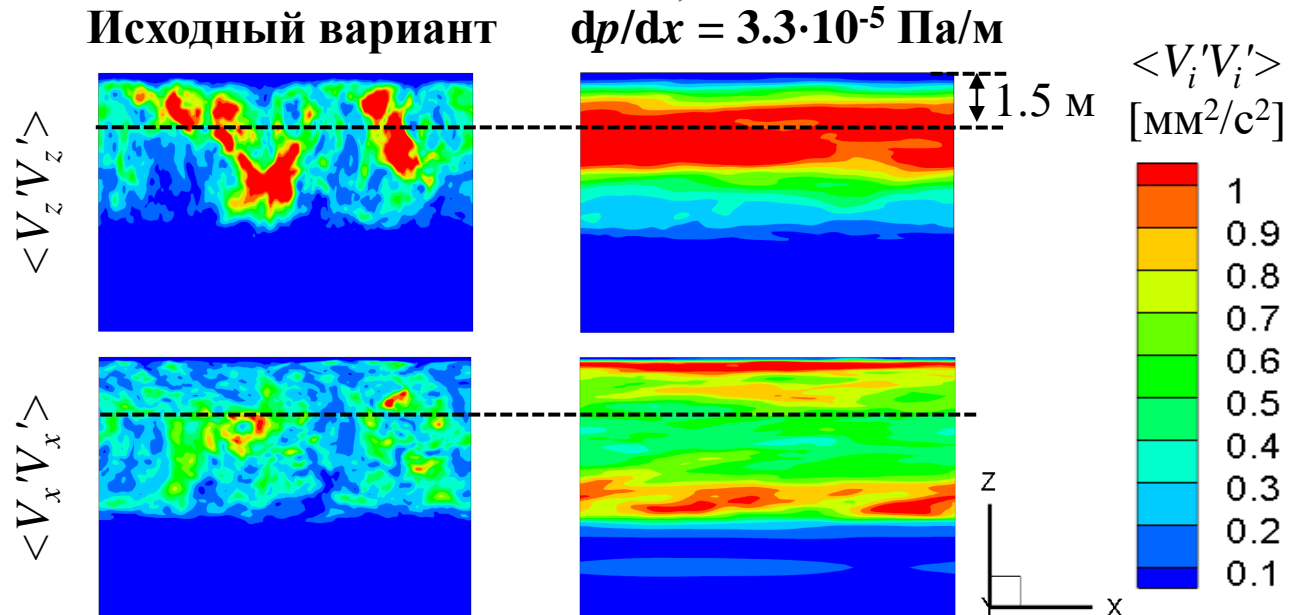
**Поля пульсаций компонент скорости в вертикальном сечении  
при задании градиента давления  
(осреднение проводилось с 14 до 15 часов пятого дня)**



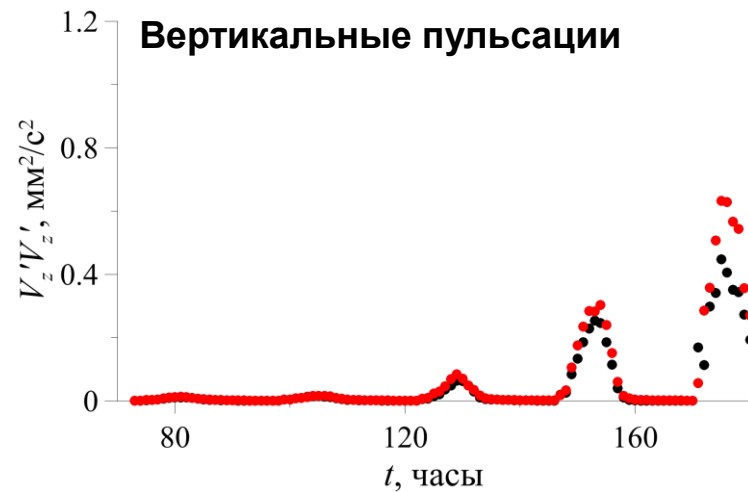
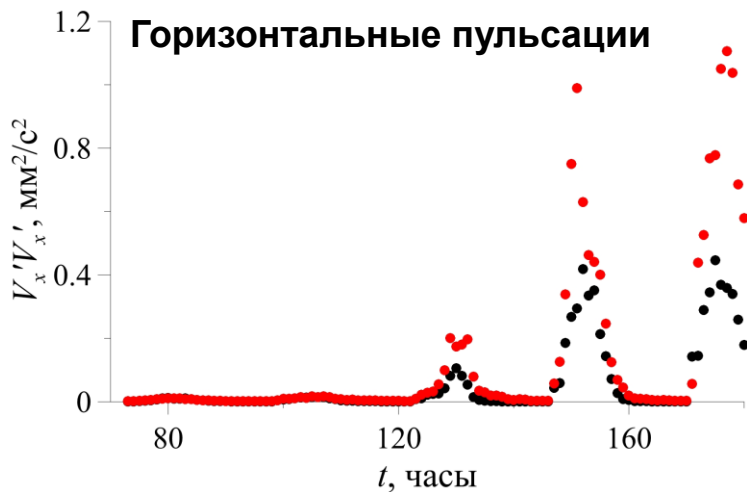
# Осреднённые по пространству горизонтальные и вертикальные пульсации скорости (временное осреднение – 1 час, плоскость осреднения располагалась на глубине 1.5 м)



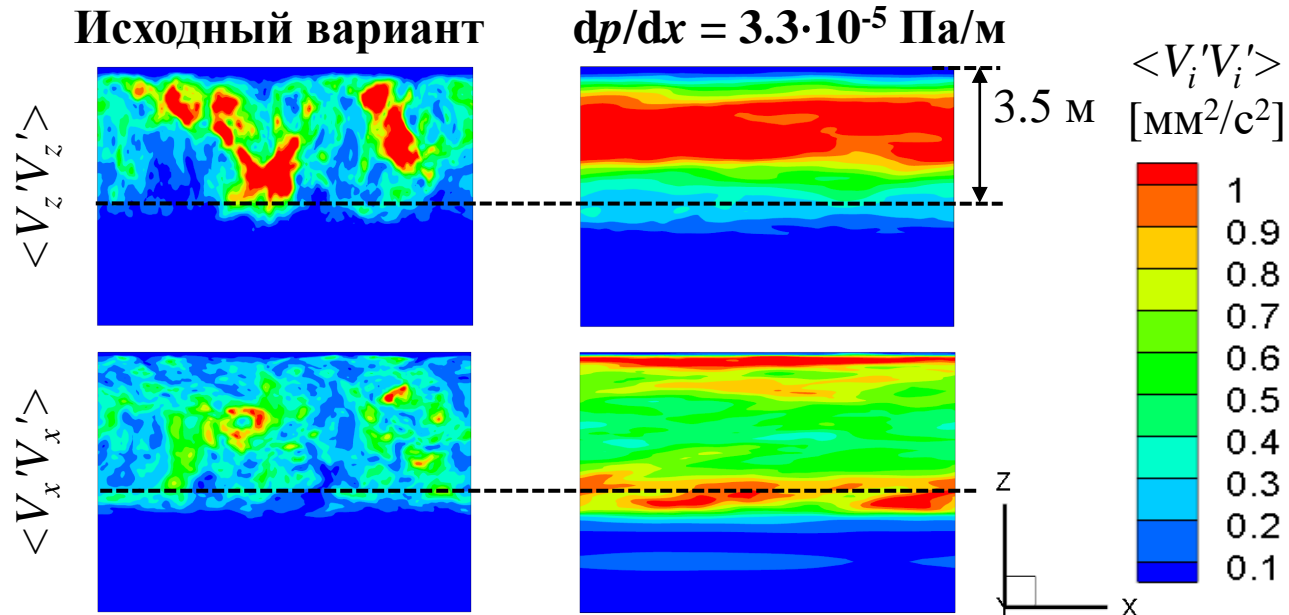
- ● ● Исходный вариант
- ● ●  $dp/dx = 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ Па/м}$



# Осреднённые по пространству горизонтальные и вертикальные пульсации скорости (временное осреднение – 1 час, плоскость осреднения располагалась на глубине 3.5 м)



- ● ● Исходный вариант
- ● ●  $dp/dx = 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ Па/м}$



# Увеличение глубины и температуры КПС в зависимости от кумулятивной накачки для разных вариантов

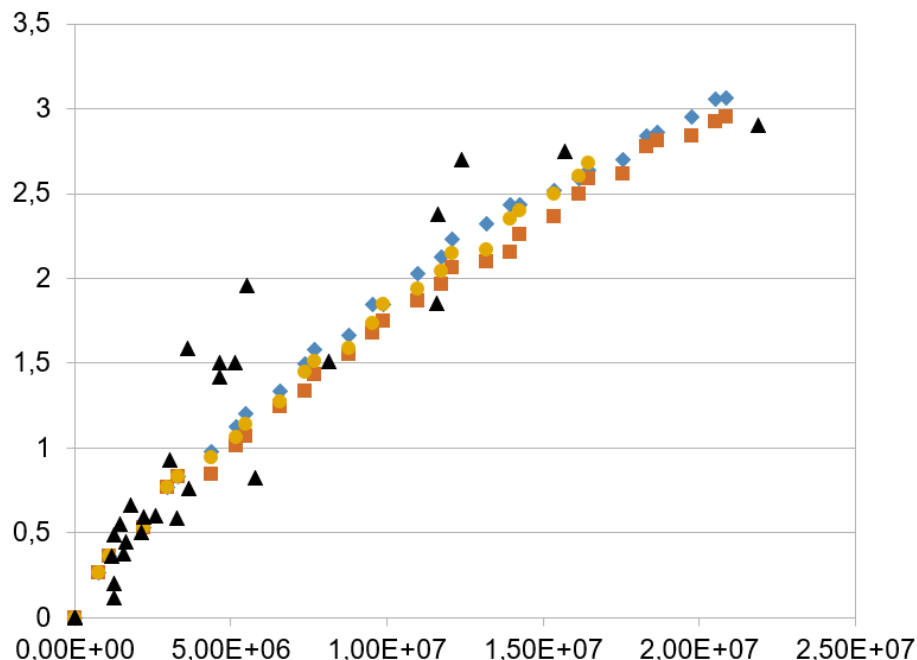
$$Q = I_0 \rho C_p \int_0^t \sin\left(2\pi \frac{t}{T^*}\right) dt$$

$$TCML = \langle T \rangle - \langle T_{CML,0} \rangle$$

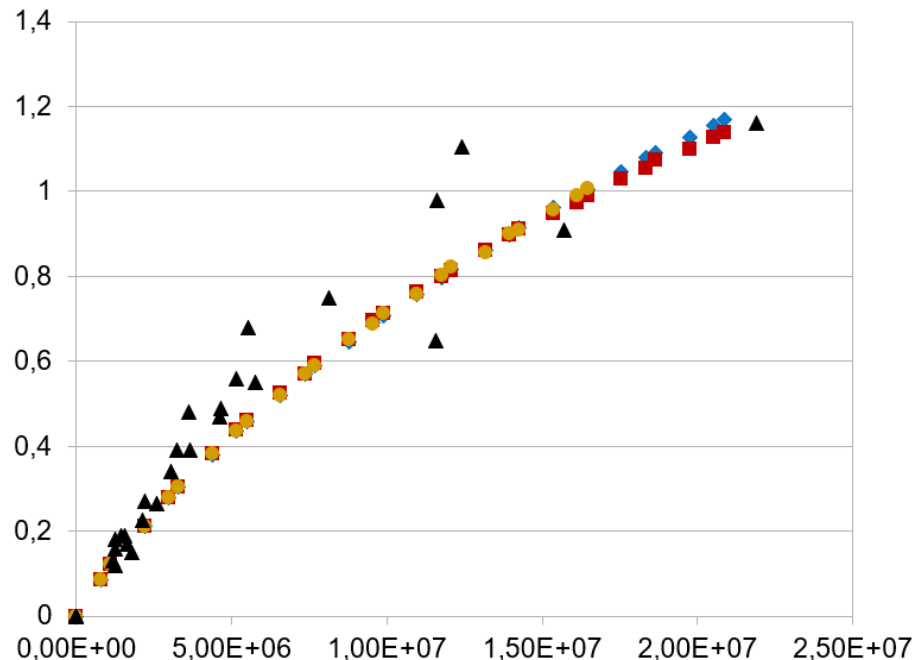
$$HCML = h - h_{CML,0}$$

- ▲ Экспериментальные данные
- ◆ Исходный вариант
- $\partial p / \partial x = 3.3 \cdot 10^{-5}$  Па/м
- $\partial p / \partial x = 3.3 \cdot 10^{-6}$  Па/м

Приращение глубины (HCML), м



Приращение температуры (TCML), К



Q, Дж/м<sup>2</sup>

## Заключение

- Представлены результаты численного моделирования свободной турбулентной подлёдной конвекции с периодическим проникающим объёмным нагревом с использованием подхода Implicit LES при наличии продольного градиента давления.
- В случае отсутствия наложенного горизонтального градиента давления в области возникают крупномасштабные нерегулярные конвективные ячейки, заполняющих всю глубину конвективно-перемешанного слоя.
- При наложении горизонтального градиента давления с течением времени конвективные ячейки трансформируются в вытянутые вдоль градиента двумерные валы, причём чем больше градиент, тем быстрее происходит трансформация.
- Представленные результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями по пульсационным характеристикам и кумулятивному прогреву слоя; таким образом, численная модель позволяет адекватно описать подлёдную конвекцию в малых озерах.



*Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ №21-17-00262  
“Перемешивание в бореальных озёрах:  
механизмы и их эффективность”*

**Спасибо за внимание!**