

Научно-образовательный семинар НИВЦ МГУ
«Математическое моделирование геофизических процессов:
прямые и обратные задачи»,
15 февраля 2007 г.

В. М. Степаненко

*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ
Географический факультет МГУ*

Численное моделирование взаимодействия атмосферы с водоемами суши

*(диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук)*

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
В. Н. Лыкосов (ИВМ РАН, НИВЦ МГУ)

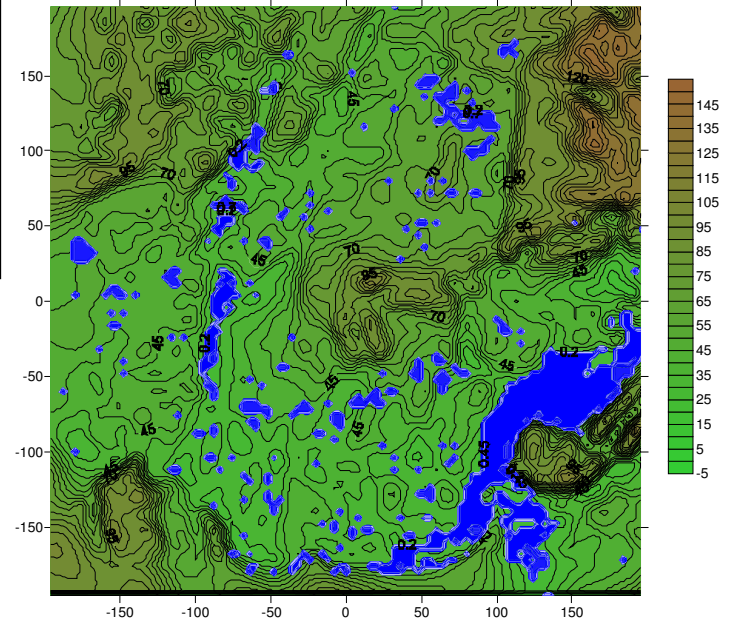
Неоднородность подстилающей поверхности суши (растительность, почвы, рельеф, водные объекты и т.д.)

Термические контрасты: “лес – поле”, “суша – море” городские “острова тепла”, и т.д.

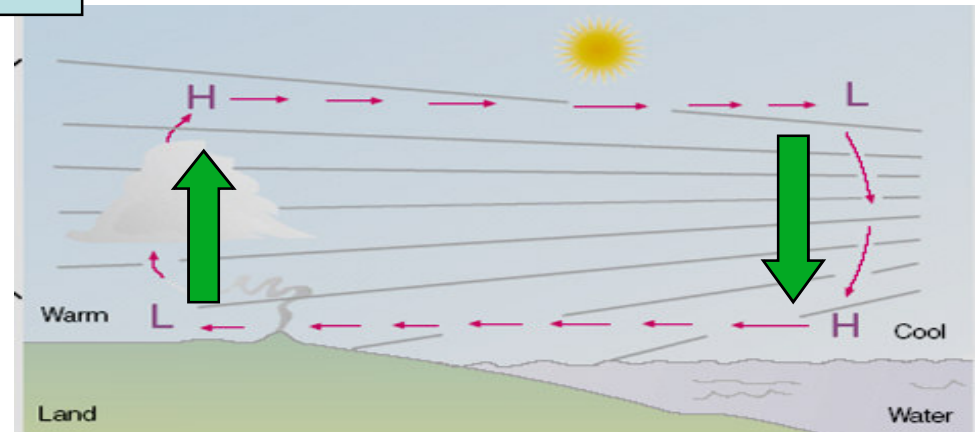
Пространственная неоднородность турбулентных потоков в приземном слое

Местные циркуляции: бризы, городские бризы, ветры склонов

Перенос тепла, влаги и количества движения мезомасштабными вихрями— **мезомасштабные потоки**



Агрегирование турбулентных потоков в атмосферных моделях



Параметризация мезомасштабных потоков в МОЦА

Постановка проблемы

**Гидрологическая неоднородность -
один из важнейших элементов неоднородности суши**



Проблемы:

- 1) Необходимость учета специфики теплообмена с водными объектами в атмосферных моделях;**
- 2) Оценка изменений в гидрологических системах при глобальном потеплении климата и обратного влияния этих систем на климат**



Решение:

Создание и внедрение в атмосферную модель блока гидрологических процессов на суше;

Одна из важнейших составляющих гидрологического блока – модель водоема

Цель:

**создание, верификация и апробация
вычислительной технологии для моделирования
взаимодействия атмосферы с водоемами суши**

Задачи:

- определение наиболее актуальных направлений исследований в области взаимодействия внутренних вод суши с атмосферой из анализа литературных источников;
- построение и верификация с привлечением данных наблюдений модели термодинамики водоема;
- включение модели водоема в мезомасштабную атмосферную модель в качестве параметризации водоемов и верификация совместной модели с использованием доступных данных наблюдений;
- оценка применимости методов агрегирования турбулентных потоков для гидрологически неоднородной подстилающей поверхности.

Современное состояние проблемы

Модели водоемов:

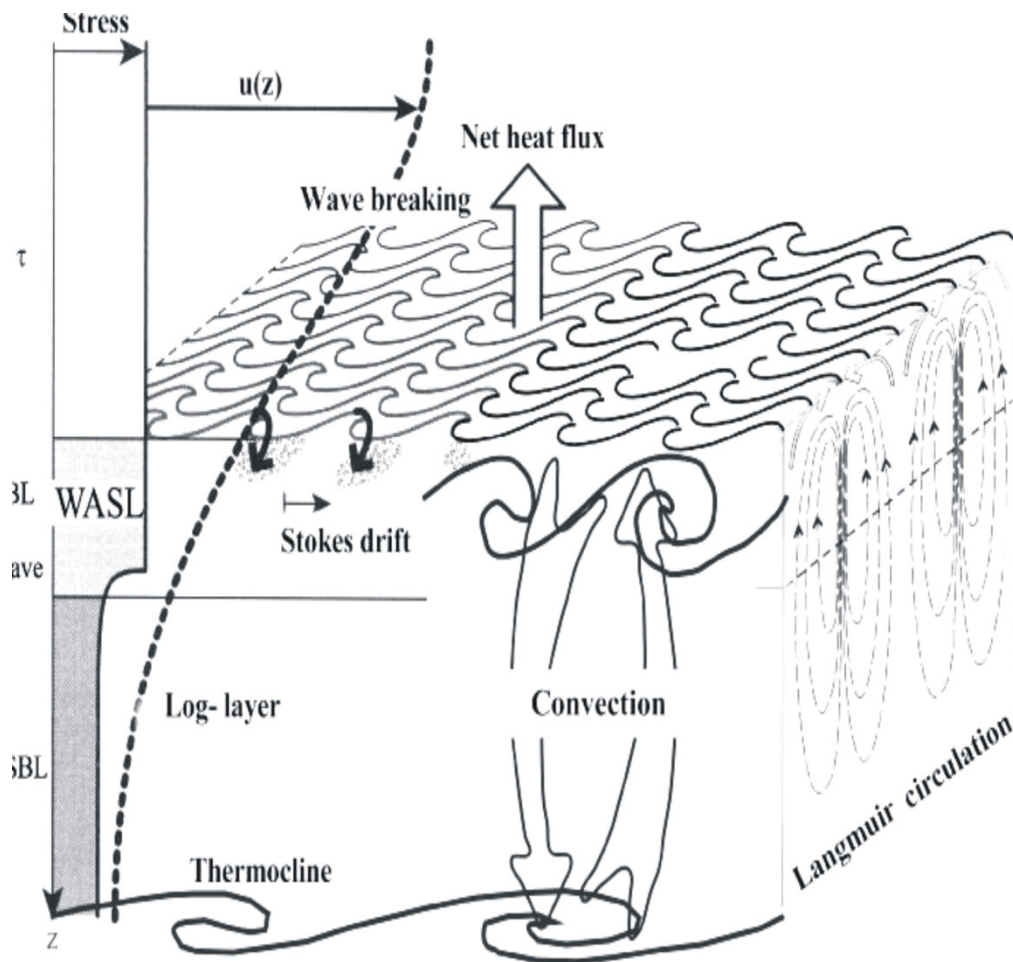
I. Детерминистические:

- 1) Трехмерные (Kelley et al., 1998) – наиболее детальное воспроизведение гидротермодинамики водоемов, требуют значительных вычислительных ресурсов;
- 2) Двухмерные – используются в некоторых специальных задачах (Пушистов и Иевлев, 2000);
- 3) Одномерные – компромисс вычислительной эффективности и физической адекватности (Mironov et al., 2006);

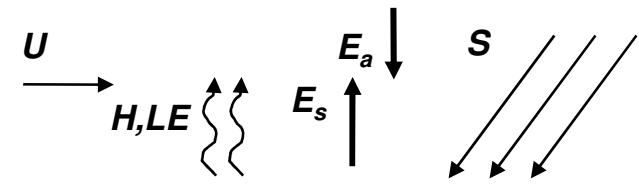
Одномерное приближение оправдано эмпирическим фактом:
в водоемах вертикальные градиенты параметров состояния на несколько
порядков превосходят горизонтальные градиенты

II. Стохастические и динамико-стохастические (Пальшин и Ефремова, 2005; Фролов, 2006)

Основные динамические процессы
в озерах
(Thorpe, 1985), (Simon, 1997)



Общая схема модели водоема
(Степаненко и Лыков, 2005)



- Многоуровневые модели снежного покрова (Мачульская и Лыков, 2002) и почвы (Володин и Лыков, 1998)
- “К-ε” параметризация турбулентности

Основные уравнения модели водоема

Уравнение переноса тепла

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + c\rho \frac{dh}{dt} \frac{\xi}{h} \frac{\partial T}{\partial \xi} - c\rho \frac{1}{h} B_w \frac{\partial T}{\partial \xi} - \frac{1}{h} \frac{\partial S}{\partial \xi} + M$$

Турбулентная диффузия:

1. Уравнение Колмогорова

$$\lambda = c\rho C_{et} k \quad \boxed{k = E^2 / \varepsilon}$$

2. «К-ε» параметризация

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\alpha_E}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial E}{\partial \xi} + P - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\alpha_\varepsilon}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + C_1 \frac{\varepsilon}{E} (P - \varepsilon),$$

$$P = C_e \frac{k}{h^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} \right)^2 \right] - C_{et} \frac{g}{\rho} \frac{k}{h} \frac{\partial \rho}{\partial \xi},$$

Вертикальная координата

$$\xi = \frac{z}{h}$$

Солнечная радиация

$$S(\xi) = (1 - \beta_e) S(0) \exp(-\alpha_e h \xi)$$

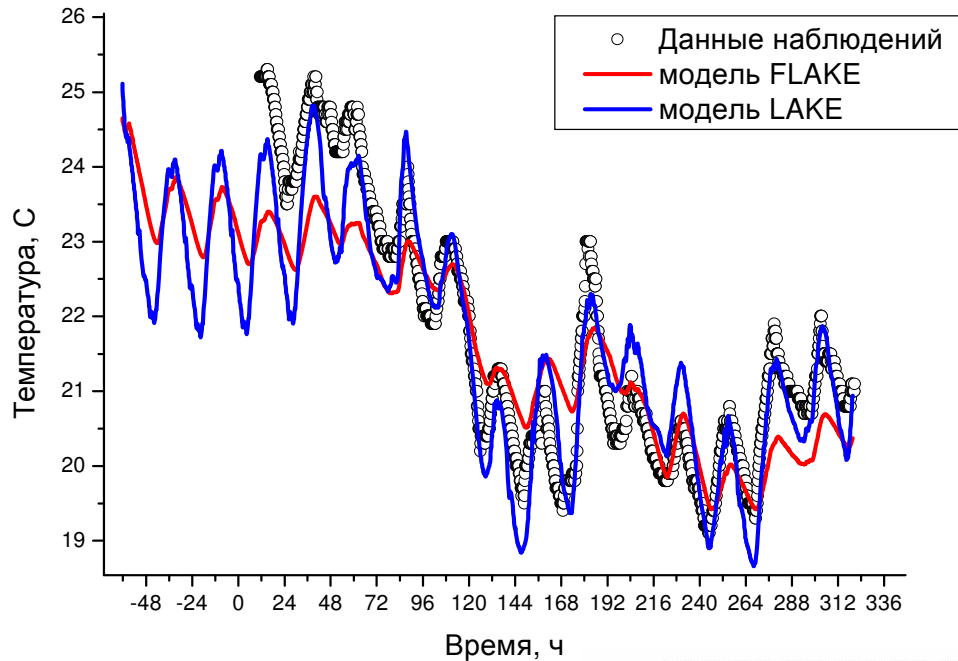
Скорость течения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{C_e}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial u}{\partial \xi},$$

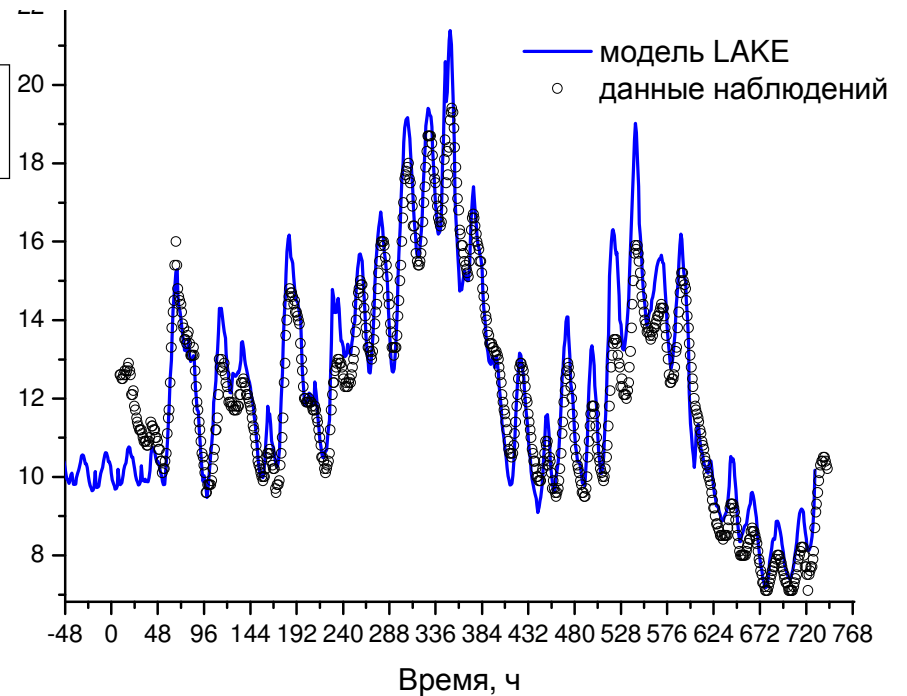
$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{C_e}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial v}{\partial \xi}.$$

Верификация модели водоема: температура поверхности

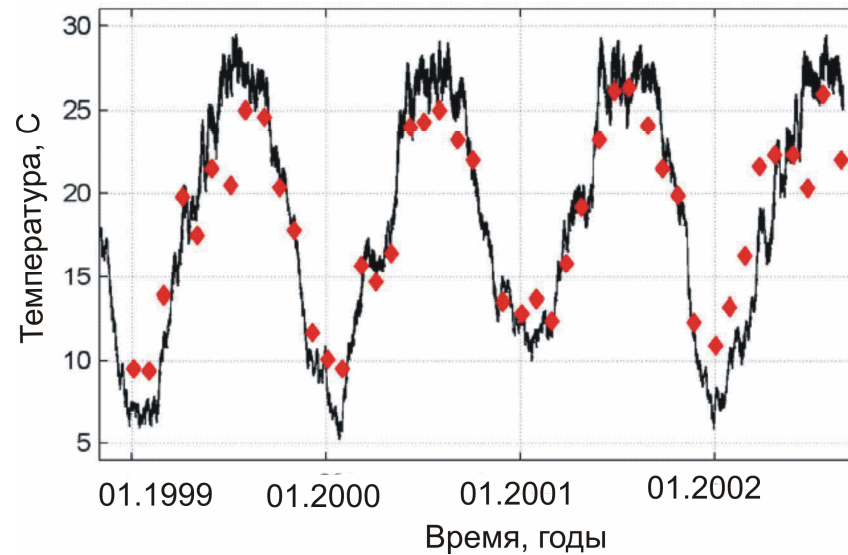
**Озеро Коссенблаттер, Германия,
Июнь, 1998**



Тикси, Июль, 2002



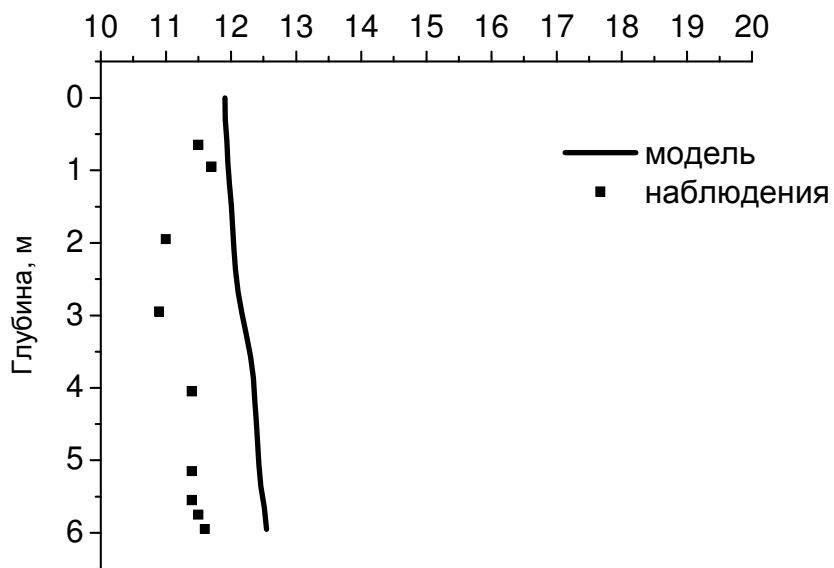
**Озеро Монте-Ново,
Португалия,
1999 - 2002**



Верификация модели водоема: вертикальное распределение температуры в оз. Сырдах (Якутия)

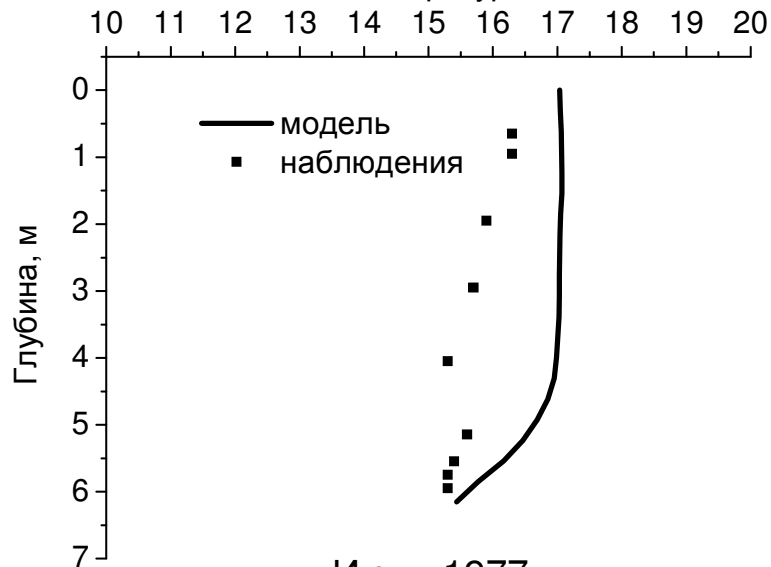
Сентябрь 1976 г.

Температура, С



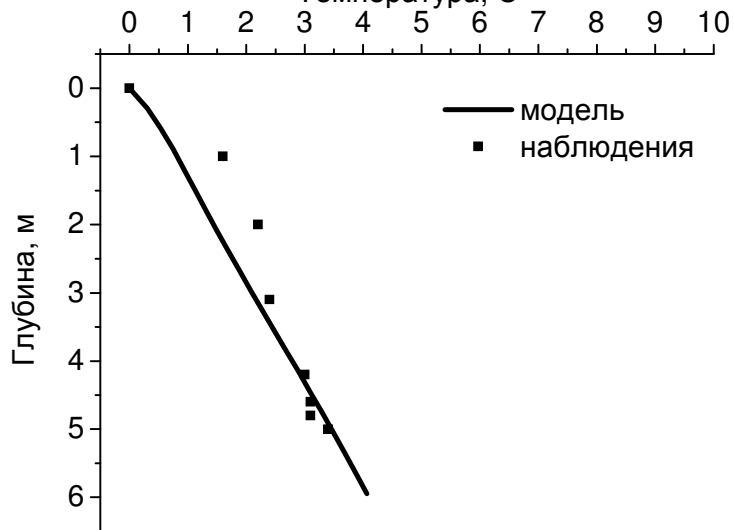
Август 1977 г.

Температура, С



Апрель 1977 г.

Температура, С



Июль 1977 г.

Температура, С



Воздействие водоемов на атмосферу:

Внутренние (термические) пограничные слои над водоемами
(Mahrt, 2000; Струнин, 2006)



Горизонтальные градиенты температуры и давления



Мезомасштабная изменчивость крупномасштабного потока
(мезомасштабные циркуляции)

Адекватный инструмент воспроизведения этого механизма:
мезомасштабная атмосферная модель

Требования к мезомасштабной атмосферной модели:

- 1) трехмерность;
- 2) негидростатичность;
- 3) наличие блока «почва-растительность».

Мезомасштабная атмосферная модель Nh3D (Miranda, 1990)

Система уравнений в σ -системе координат (Miller and White, 1984)

$$\frac{\partial u p_*}{\partial t} + \frac{\partial u^2 p_*}{\partial x} + \frac{\partial v u p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} u p_*}{\partial \sigma} = -p_* \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \sigma \frac{\partial p_*}{\partial x} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + f v p_* + p_* (D_u + R_u),$$

$$\frac{\partial v p_*}{\partial t} + \frac{\partial u v p_*}{\partial x} + \frac{\partial v^2 p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} v p_*}{\partial \sigma} = -p_* \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \sigma \frac{\partial p_*}{\partial y} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} - f u p_* + p_* (D_v + R_v),$$

$$\frac{\partial \tilde{w} p_*}{\partial t} + \frac{\partial u \tilde{w} p_*}{\partial x} + \frac{\partial v \tilde{w} p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} \tilde{w} p_*}{\partial \sigma} = -S_v p_* \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + p_* g \left(\frac{\theta'}{\theta_s} - q_r \right) + p_* (D_w + R_w),$$

$$\frac{\partial \theta' p_*}{\partial t} + \frac{\partial u \theta' p_*}{\partial x} + \frac{\partial v \theta' p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} \theta' p_*}{\partial \sigma} = -S_v \tilde{w} p_* \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} + p_* \frac{L_v}{c_p} \left(\frac{p_0}{p} \right)^k (COND - EVAP) + p_* (D_\theta + R_\theta),$$

$$\frac{\partial p_*}{\partial t} + \frac{\partial u p_*}{\partial x} + \frac{\partial v p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_*}{\partial \sigma} = 0,$$

$$\frac{\partial q_v p_*}{\partial t} + \frac{\partial u q_v p_*}{\partial x} + \frac{\partial v q_v p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_v p_*}{\partial \sigma} = p_* (EVAP - COND) + p_* (D_{q_v} + R_{q_v}),$$

$$\frac{\partial q_c p_*}{\partial t} + \frac{\partial u q_c p_*}{\partial x} + \frac{\partial v q_c p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_c p_*}{\partial \sigma} = p_* (COND - AUTO - COL) + p_* (D_{q_c} + R_{q_c}),$$

$$\frac{\partial q_r p_*}{\partial t} + \frac{\partial u q_r p_*}{\partial x} + \frac{\partial v q_r p_*}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_r p_*}{\partial \sigma} = p_* (AUTO + COL - EVAP) - g \frac{\partial \rho V_r q_r}{\partial \sigma} + p_* (D_{q_r} + R_{q_r}).$$

Мезомасштабная атмосферная модель Nh3D

Параметризации физических процессов

- 1) **Микрофизика облаков и осадков**
(испарение/конденсация, автоконверсия, захват облачных капель осадками, и т.д.) (Teixeira, Miranda, 1997)
- 2) **Турбулентное замыкание 1-го порядка**
- 3) **Двухуровневая модель почвы ISBA** (перенос тепла и влаги в почве)
- 4) **Потоки радиации на поверхности задаются согласно полуэмпирическим формулам** (Матвеев, 2000)
- 5) **Модель термодинамики водоема** (Степаненко и Лыкосов, 2005)
- 6) **Модель термодинамики водоема FLAKE** (Mironov, 2005)

1. Область расчета:
360*360 км;

2. Размерность сетки:
36*36 точек;

3. Горизонтальное разрешение: 10 км

4. Количество σ - уровней: 21

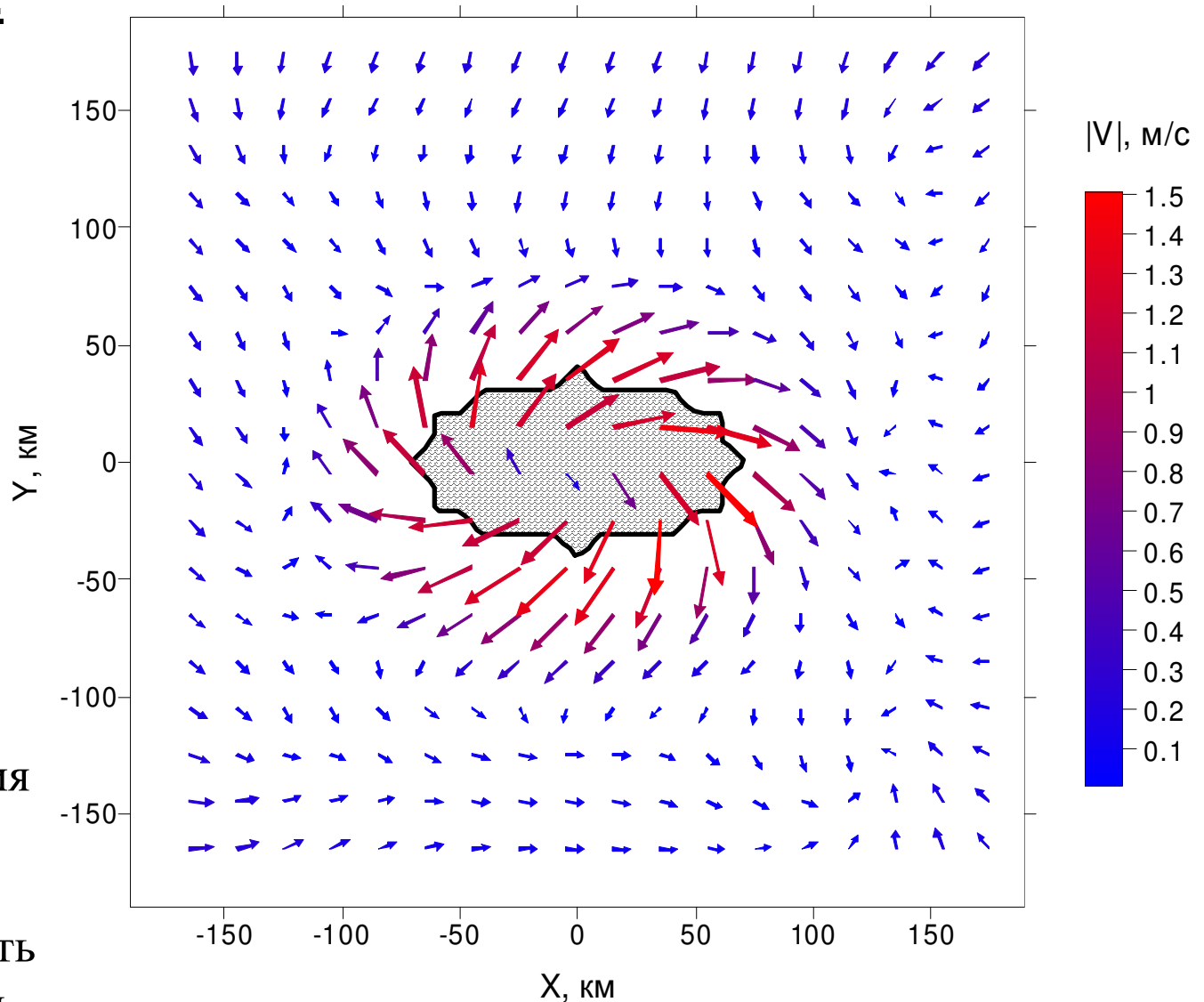
5. Размеры озера:
50*100 км

6. Синоптический поток 0 м/с

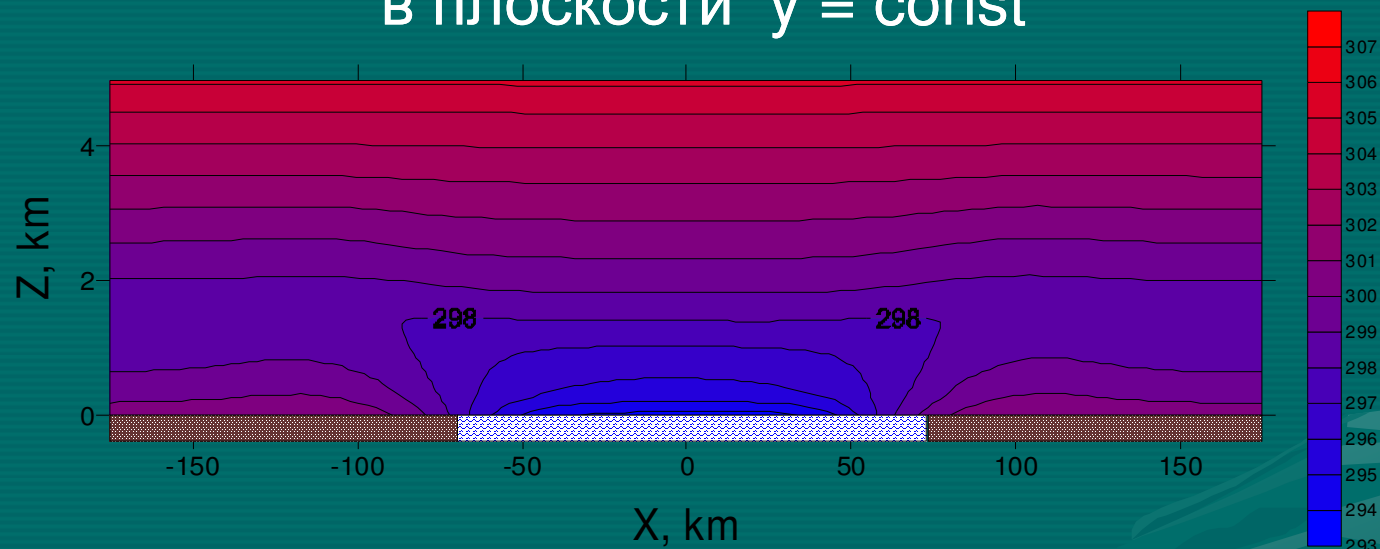
Глубина проникновения
бриза на сушу ~50 км;

Вертикальная мощность
бризовой ячейки ~2 км

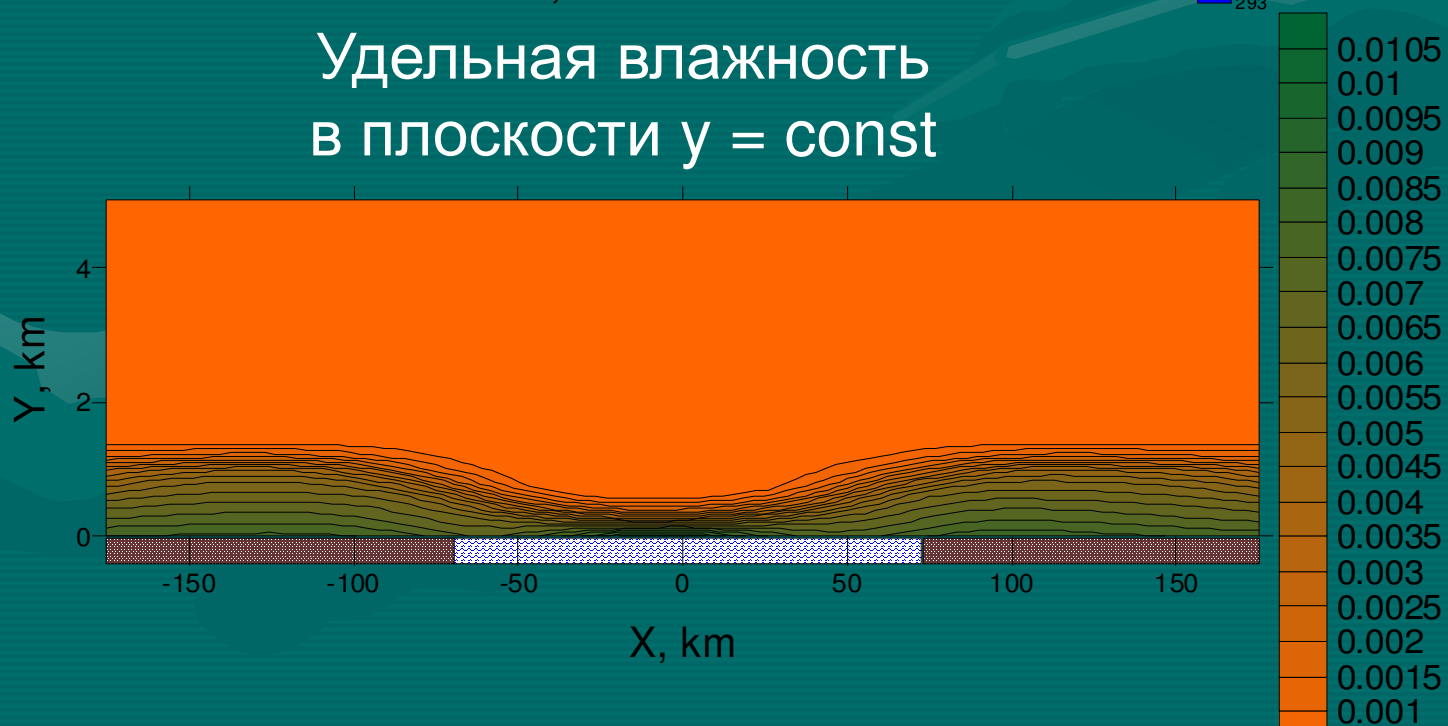
Верификация мезомасштабной модели: Контрольный эксперимент



Потенциальная температура в плоскости $y = \text{const}$



Удельная влажность в плоскости $y = \text{const}$



Численные эксперименты на чувствительность бриза к внешним факторам



Условия на подстилающей поверхности:

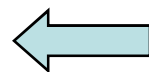
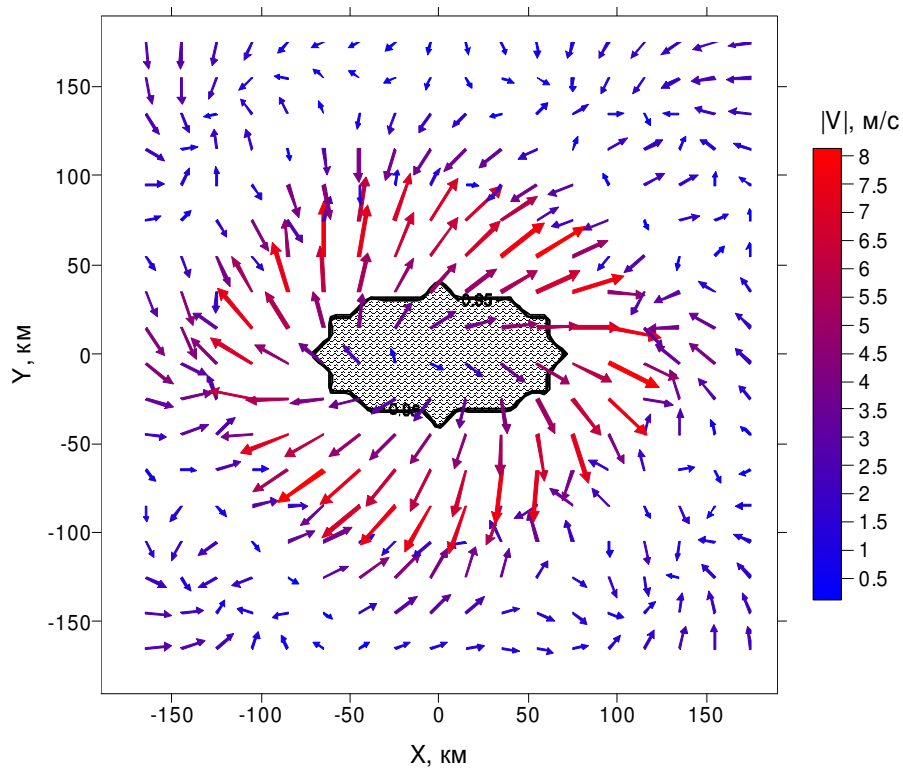
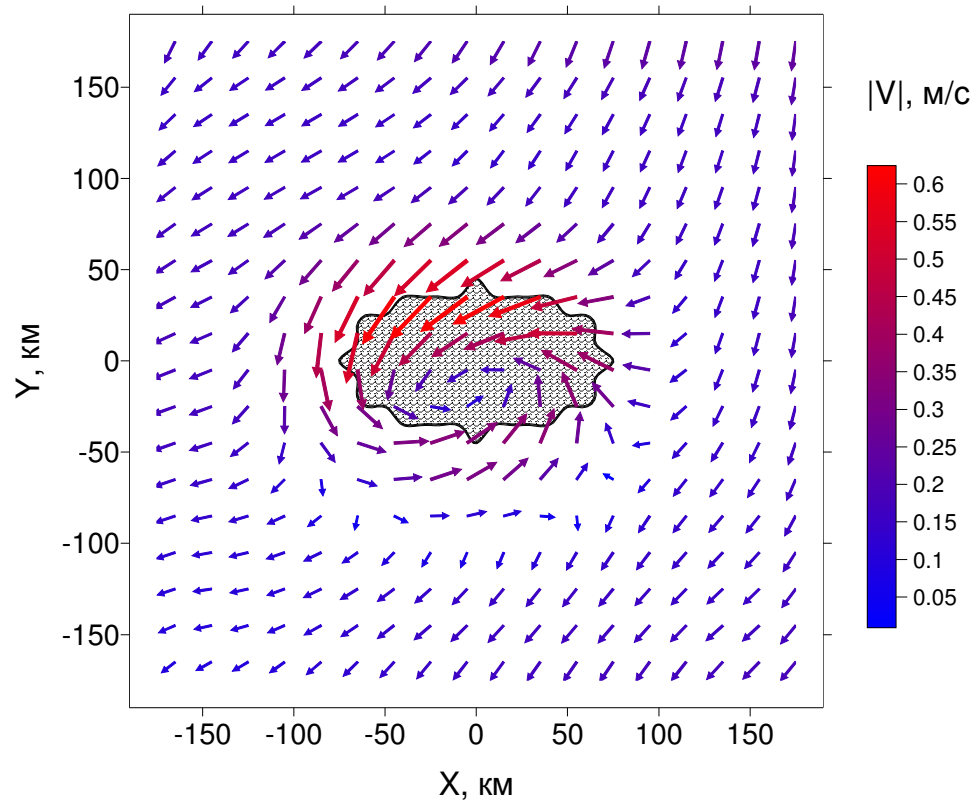
- 1) 5 водоемов;
- 2) 16 водоемов;
- 3) рельеф;
- 4) влажность почвы;
- 5) проективное покрытие растительности;
- 6) «пустыня»;
- 7) глубина водоема;
- 8) реальный участок территории Западной Сибири.

Синоптические условия:

- 1) облачность;
- 2) фоновый (синоптический) поток;
- 3) высота солнца (сезон года).

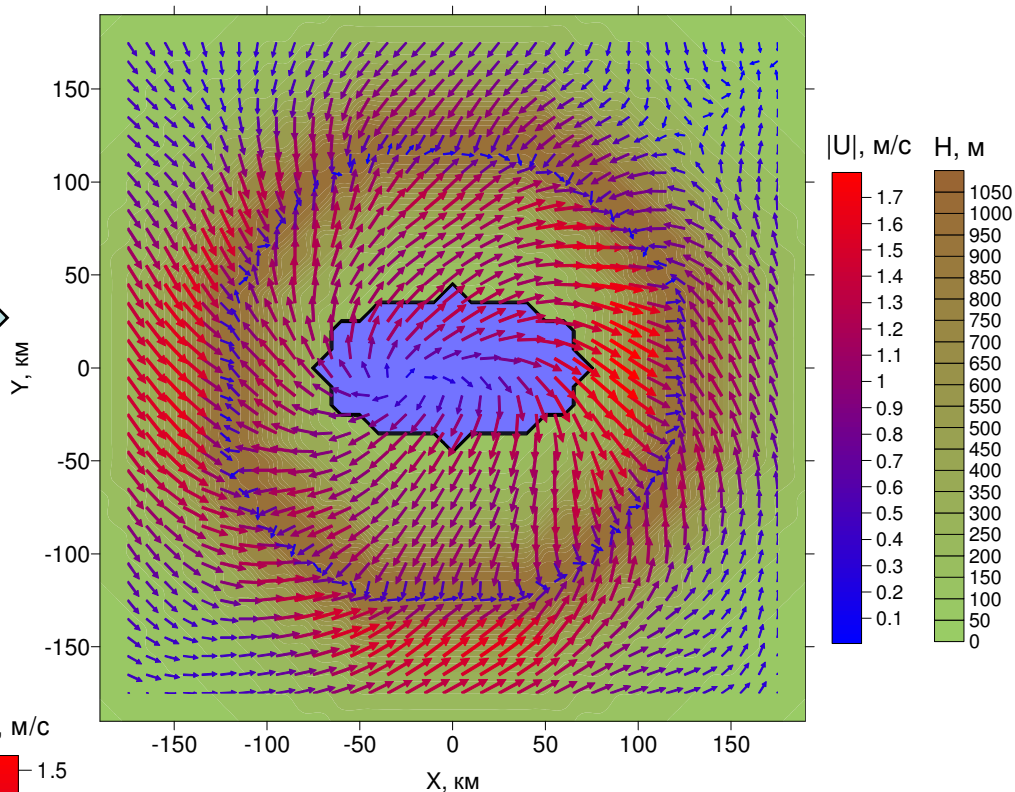
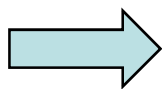
Параметризация водоемов

**Бризовая циркуляция
осенью:
теплый водоем и
холодная суша**

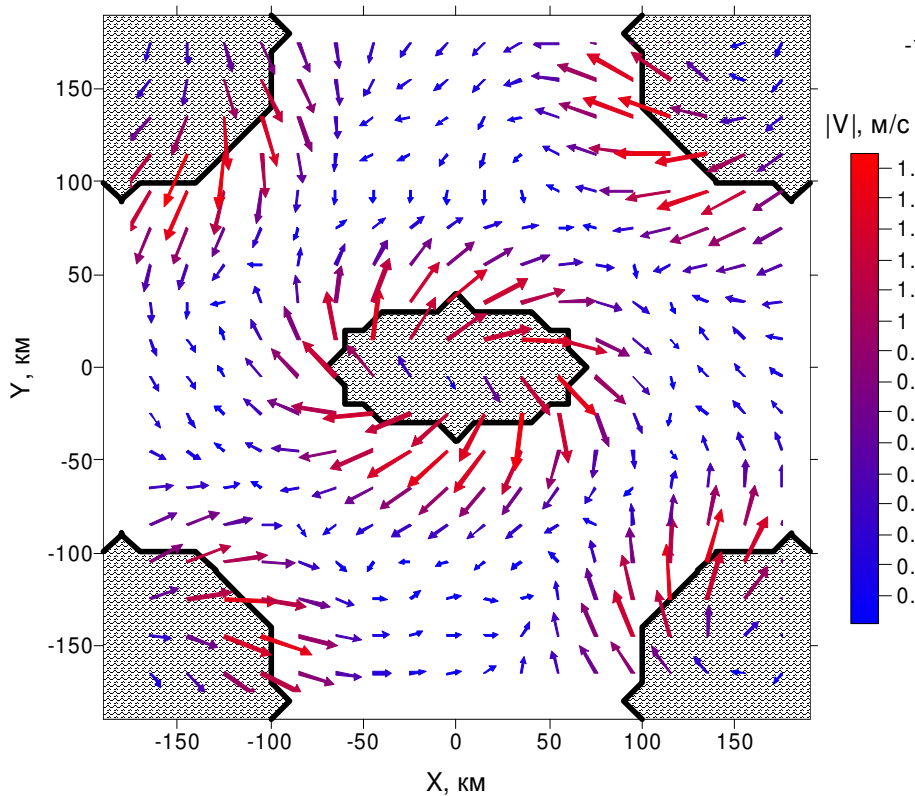


**Бризовая циркуляция
над водоемом,
окруженным пустыней**

Водоём, окруженный возвышенностью



5 водоемов



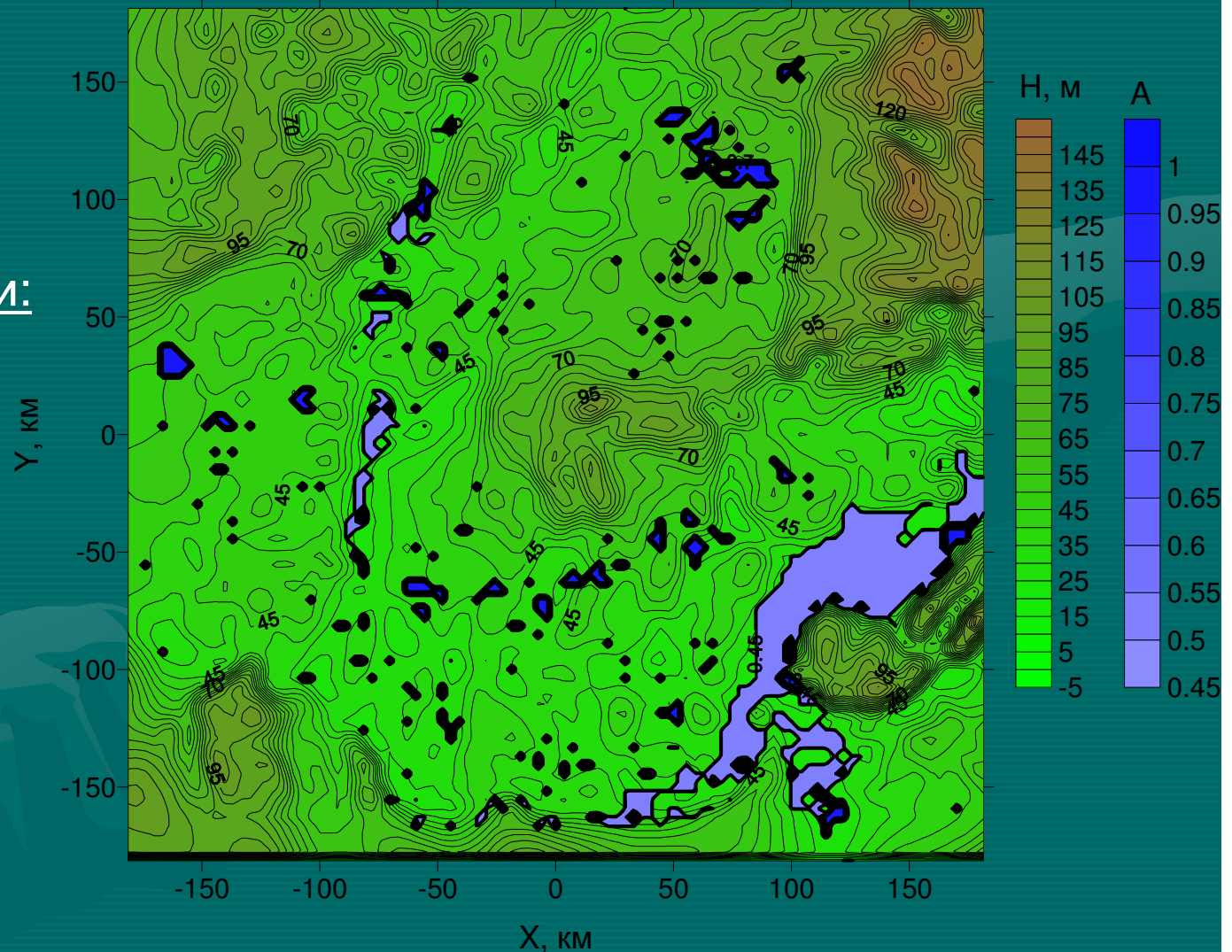
Гидрологически неоднородная территория Западная Сибирь, 54.5-58.6° с.ш., 63.1-66.6° в.д.

1. Область
моделирования:
355*355 км;

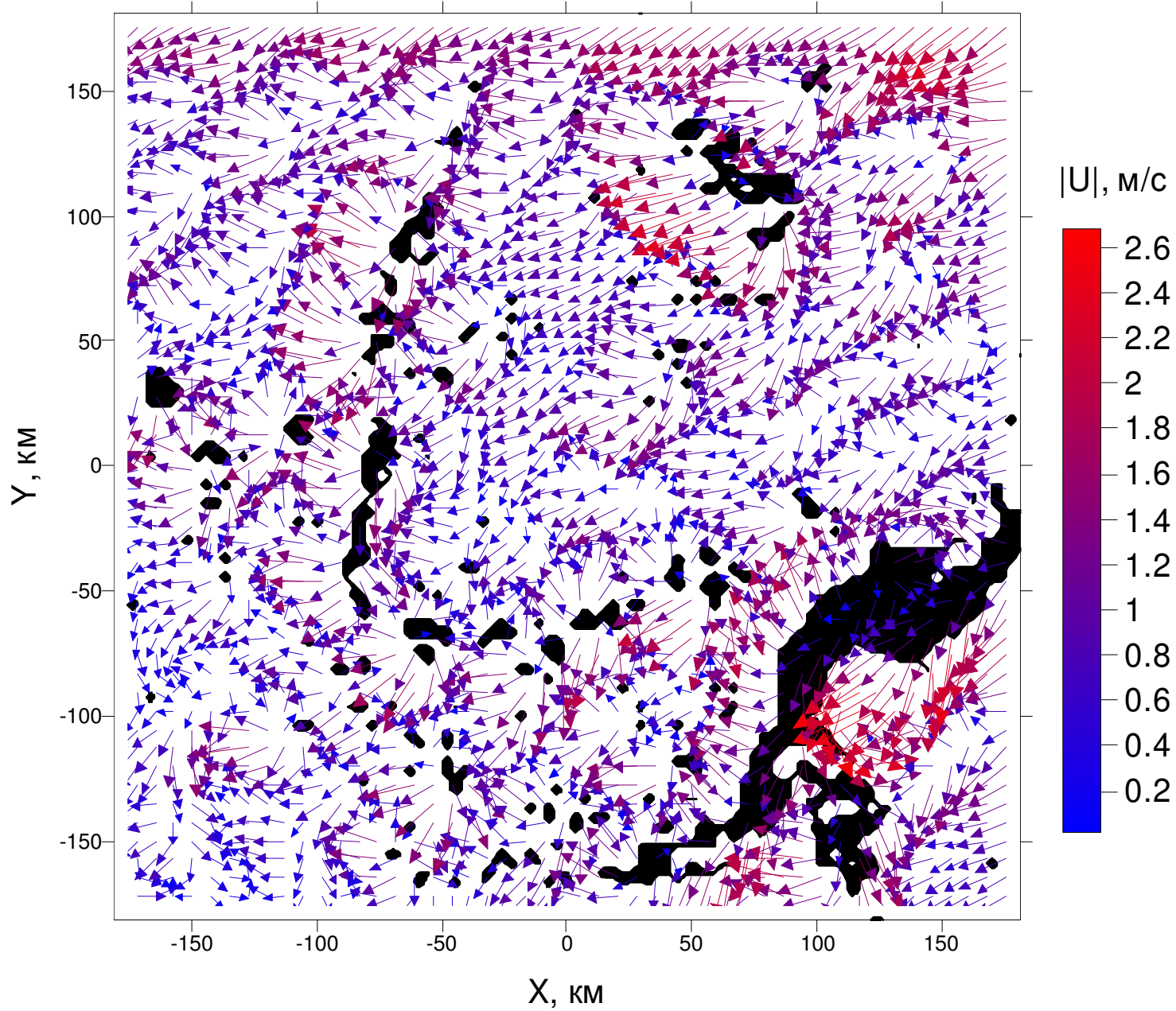
2. Размерность сетки:
96*96 точек;

3. Горизонтальное
разрешение: 3.7 км

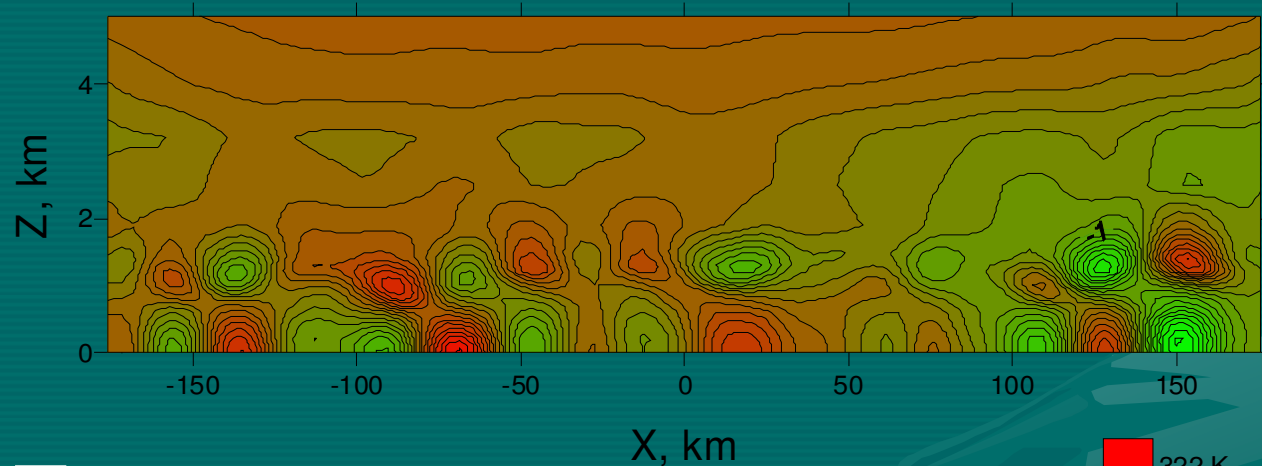
4. Количество σ -
уровней: 21



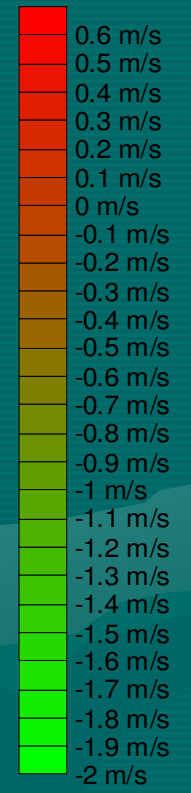
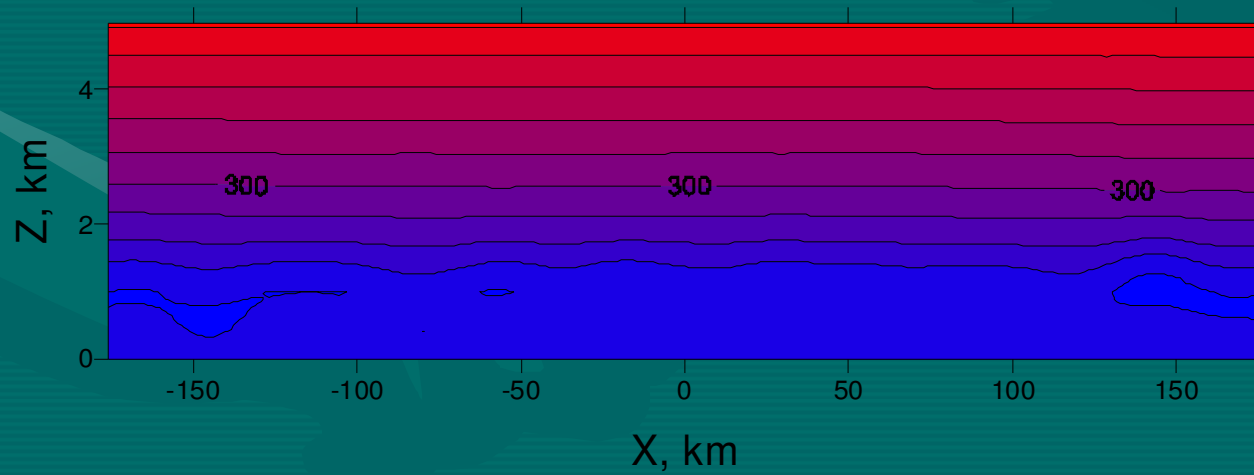
Поле ветра над участком Западной Сибири



Зональная составляющая скорости в плоскости $y=\text{const}$



Потенциальная температура в плоскости $y=\text{const}$



Учет эффектов гидрологической неоднородности в моделях общей циркуляции атмосферы

Водоемы суши – подсеточные объекты



Необходимость привлечения методов агрегирования турбулентных потоков

Агрегирование потоков – оценка средних потоков по территории (ячейке атмосферной модели), занятой различными типами подстилающей поверхности.

Методы агрегирования:

- 1) Метод эффективных параметров;
- 2) Мозаичный метод.

$$\tilde{F} = \sum_{i=1}^M \alpha_i F_i$$

Метод эффективных параметров не подходит для гидрологически неоднородной территории – невозможность определения «среднего» типа между сушей и водоемами

Верификация мозаичного метода агрегирования

Область мезомасштабной модели = Ячейка МОЦА

Прямое осреднение турбулентных потоков по мезомасштабной области («истина»):

1. Потоки вычисляются в каждой точке области

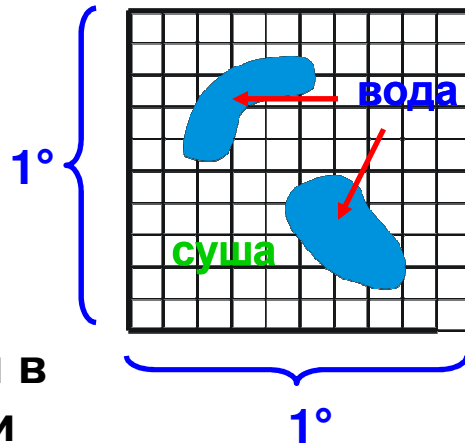
$$H = -\rho c_p C_T u (\theta_a - \theta_s)$$

$$E = -\rho C_E u (q_a - q_s)$$

2. Осреднение потоков по мезомасштабной области

$$\bar{H} = S^{-1} \iint_S H ds'$$

$$\bar{E} = S^{-1} \iint_S E ds'$$



Агрегирование в ячейке МОЦА: мозаичный метод (Avisar and Pielke, 1989)

1. Потоки над типом «водоем»:

$$\tilde{H}_w = -\rho c_p \bar{C}_{Tw} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sw})$$

$$\tilde{E}_w = -\rho \bar{C}_{Ew} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sw})$$

2. Потоки над типом «суша»:

$$\tilde{H}_{so} = -\rho c_p \bar{C}_{Tso} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sso})$$

$$\tilde{E}_{so} = -\rho \bar{C}_{Eso} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sso})$$

3. Агрегирование потоков

$$\tilde{H} = (1 - \alpha_w) \tilde{H}_{so} + \alpha_w \tilde{H}_w,$$

$$\tilde{E} = (1 - \alpha_w) \tilde{E}_{so} + \alpha_w \tilde{E}_w$$

Задача:

$$\bar{H} \Leftrightarrow \tilde{H},$$

$$\bar{E} \Leftrightarrow \tilde{E}$$

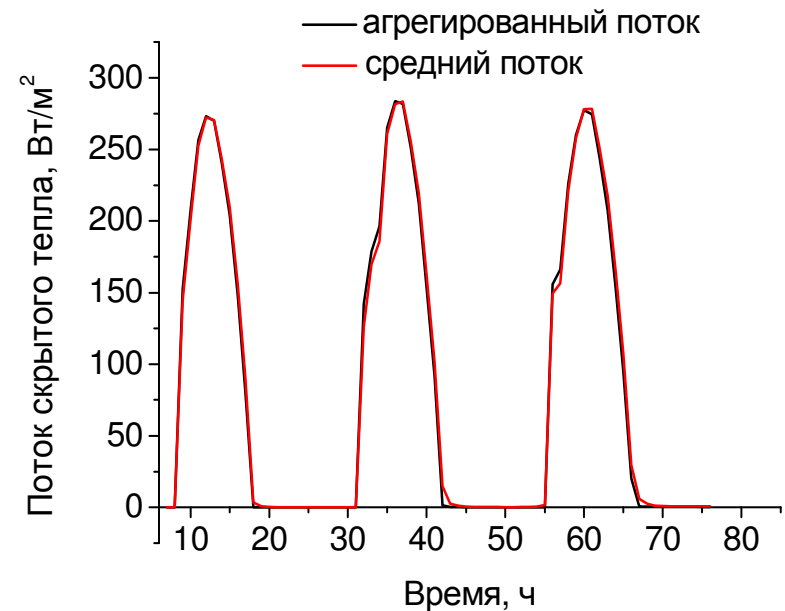
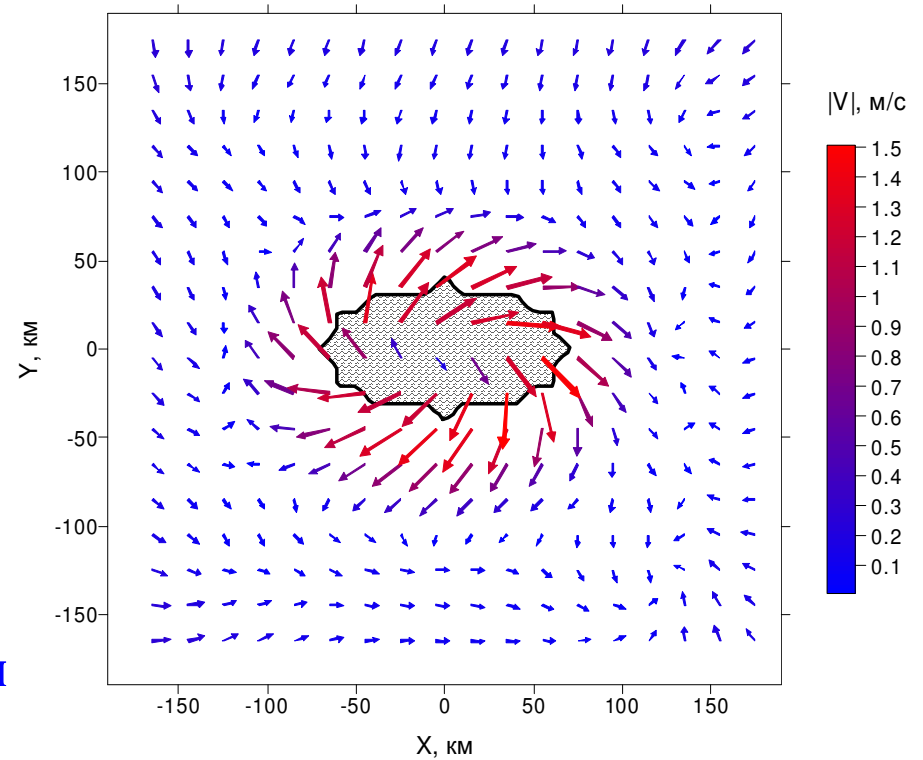
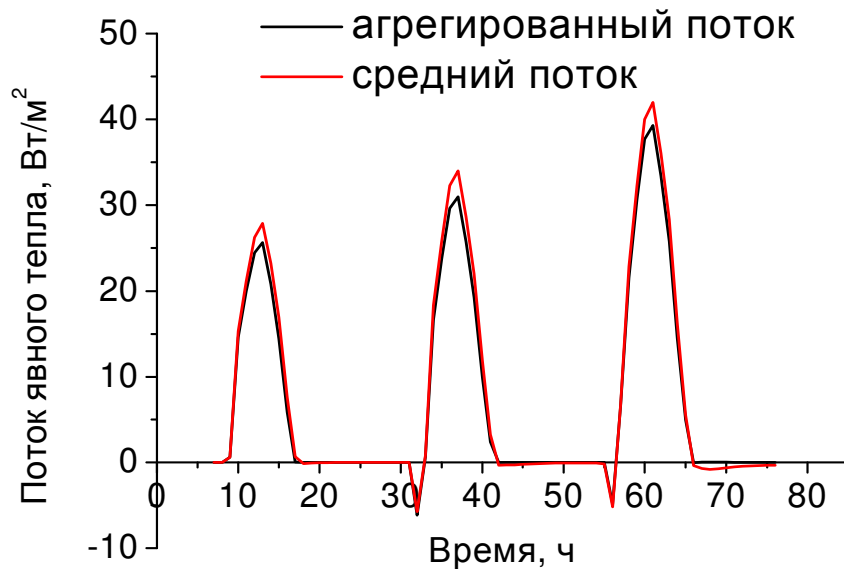
Механизм систематической ошибки мозаичного метода

$$\bar{u} \approx \bar{v} \approx 0$$



Мозаичный метод занижает реальные средние потоки

Средний и агрегированный потоки в контрольном эксперименте



Истинные и агрегированные потоки явного и скрытого тепла для дневного времени суток

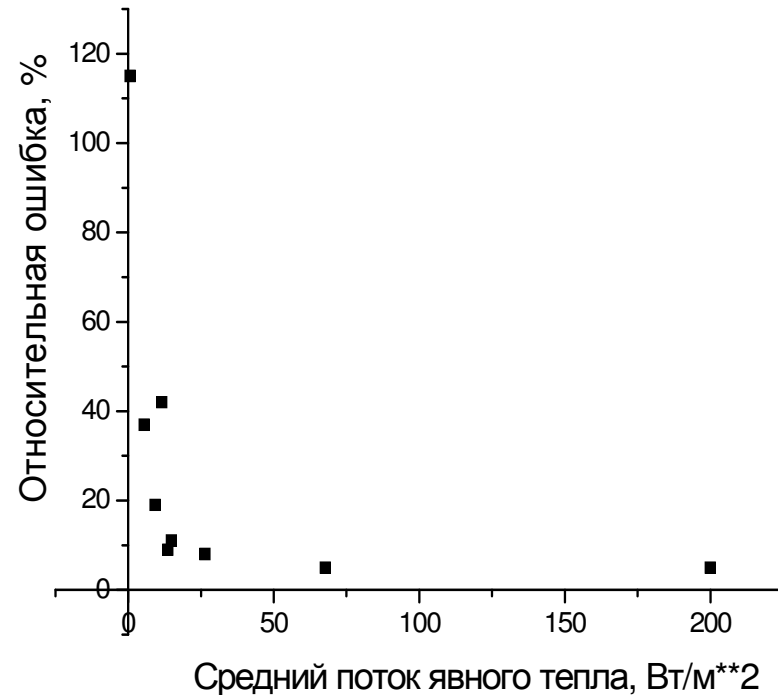
Название эксперимента	Поток явного тепла, Вт/м ²				Поток скрытого тепла, Вт/м ²			
	\hat{H}	\hat{H}	$\hat{\sigma}_H$	\hat{r}_H , %	$L\hat{E}$	$L\hat{E}$	$\hat{\sigma}_{LE}$	\hat{r}_{LE} , %
Контрольный	13.58	14.85	1.70	11	165.88	167.22	7.38	4
5 озер	7.73	11.49	4.87	42	139.55	136.92	11.68	8
16 озер	7.83	9.32	1.81	19	131.48	130.75	7.58	6
Участок Западной Сибири	13.85	13.75	1.19	9	169.54	178.59	12.89	7
Облачность 10 баллов	0.14	0.63	0.73	115	60.33	53.41	13.27	25
Геострофический ветер 10 м/с	4.07	5.48	2.05	37	226.59	226.40	5.63	2
Глубина озера 1 м	13.62	14.86	1.66	11	165.84	167.28	7.45	4
Глубина озера 10 м	13.64	14.87	1.64	11	165.76	167.35	7.52	4
Проективное покрытие растительности 0%	25.17	26.42	2.06	8	227.04	231.81	9.49	4
Влажность почвы 10%	66.78	67.74	3.67	5	6.61	6.91	0.98	14
«Пустыня»	198.5 1	200.79	9.94	5	10.83	11.70	2.84	24

Истинные и агрегированные потоки явного и скрытого тепла для ночного времени суток

Название эксперимента	Поток явного тепла, Вт/м ²				Поток скрытого тепла, Вт/м ²			
	\hat{H}	\hat{H}	$\hat{\sigma}_H$	\hat{r}_H , %	\hat{LE}	\hat{LE}	$\hat{\sigma}_{LE}$	\hat{r}_{LE} , %
Контрольный	0.003	-0.21	0.32	152	0.13	0.64	1.11	174
5 озер	0.02	-0.38	0.62	163	0.64	1.42	2.37	168
16 озер	0.12	0.05	0.15	322	2.19	1.25	1.59	128
Участок Западной Сибири	-0.005	-0.62	0.80	129	0.18	1.59	2.76	174
Облачность 10 баллов	-8*10 ⁻⁵	-0.004	0.006	182	4*10 ⁻⁴	0.03	0.05	196
Геострофический ветер 10 м/с	-40.19	-39.19	1.16	3	26.99	25.86	1.82	7
Глубина озера 1 м	0.005	-0.20	0.31	152	0.15	0.73	1.25	170
Глубина озера 10 м	0.01	-0.20	0.31	154	0.16	0.72	1.25	173
Проективное покрытие растительностью 0%	0.003	-1.11	1.56	140	0.11	-0.50	1.22	242
Влажность почвы 10%	-0.16	-1.89	2.39	126	0.12	1.84	2.05	112
«Пустыня»	-0.002	-10.79	14.29	132	0.001	0.11	0.44	409

Результаты верификации мозаичного метода агрегирования

- в большинстве случаев мозаичный метод занижает абсолютные значения средних потоков;
- относительная ошибка расчета турбулентных потоков мозаичным методом зависит от абсолютной величины этих потоков;
- при значениях потоков более 15 Вт/м^2 ошибка мозаичный метода составляет не более 10%;
- мозаичный метод адекватно воспроизводит порядок величины ночных средних потоков;
- ошибка мозаичного метода существенно нелинейно зависит от характеристик подстилающей поверхности и метеорологических условий.

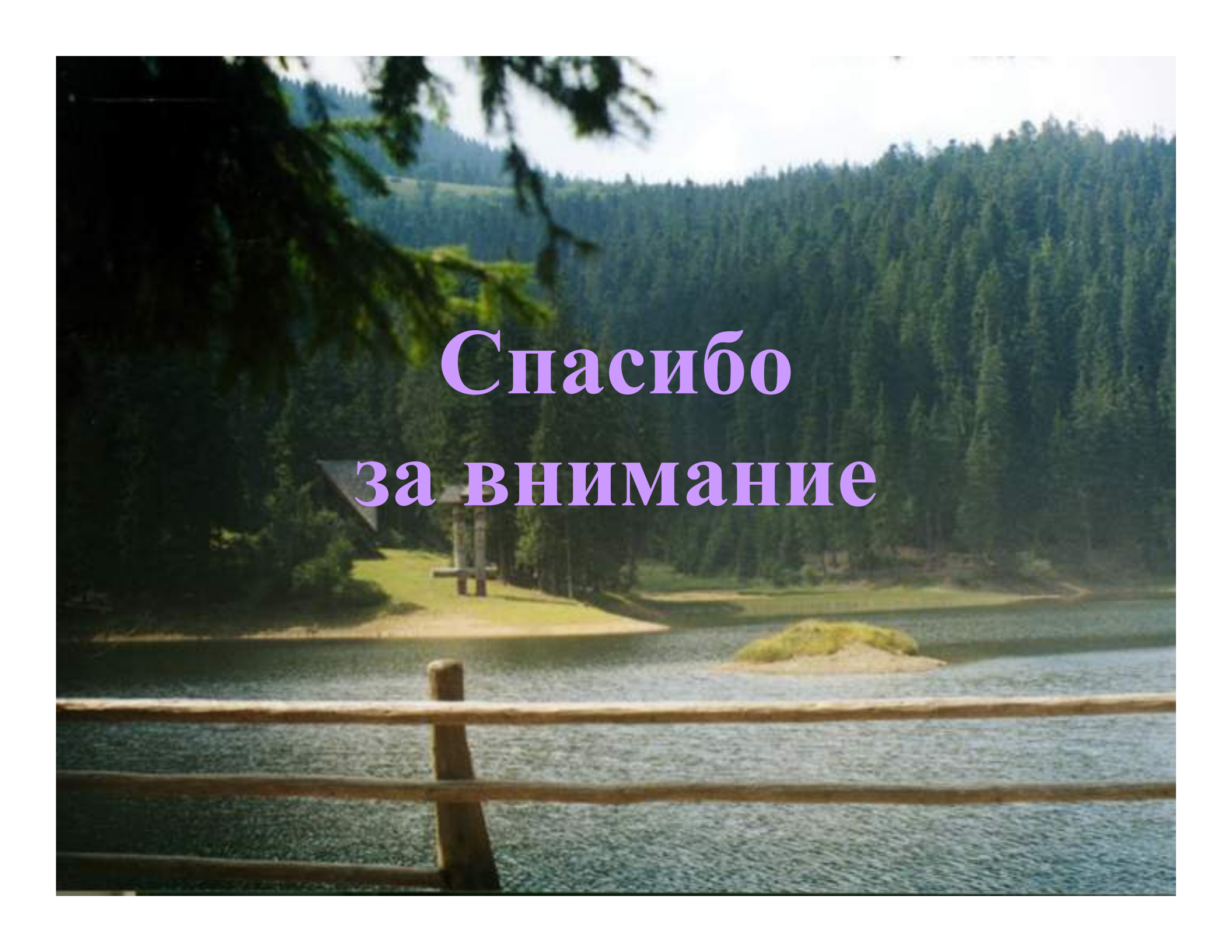


ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Создана термодинамическая модель водоема с описанием процессов тепловлагообмена слоях грунта, льда и снега.
- Модель демонстрирует удовлетворительное согласие с данными наблюдений температуры водоема на суточном, синоптическом и сезонном масштабах времени.
- На основе созданной модели реализована параметризация водоемов в мезомасштабной атмосферной модели.
- Мезомасштабная модель с параметризацией водоемов достаточно реалистично воспроизводит основные характеристики дневных бризовых циркуляций, возникающих над гидрологически неоднородной территорией при различных внешних условиях.
- Оценены ошибки мозаичного метода расчета турбулентных потоков в приземном слое в моделях общей циркуляции атмосферы в зависимости от синоптических условий и характеристик подстилающей поверхности.

Перспективы развития работы

- Модель водоема будет дополнена блоком расчета переноса примесей для оценок концентрации загрязнений, выпадающих в составе атмосферных осадков.
- Моделирование взаимодействия атмосферы с гидрологически неоднородной сушей будет дополнено количественной оценкой мезомасштабных потоков, формируемых бризовыми циркуляциями.
- Модель водоема целесообразно включить в климатическую модель для расчета изменений в гидрологических системах суши при глобальной потеплении.
- Модель водоема целесообразно включить в систему оперативного прогноза погоды на стадиях инициализации и интегрирования
- Модель водоема целесообразно также использовать в системе усвоения данных наблюдений на суше.



**Спасибо
за внимание**