

*«Математическое моделирование геофизических процессов: прямые и обратные задачи»,  
НИВЦ МГУ, 14 апреля 2011 г.*

В.М.Степаненко

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ  
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ  
В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

---

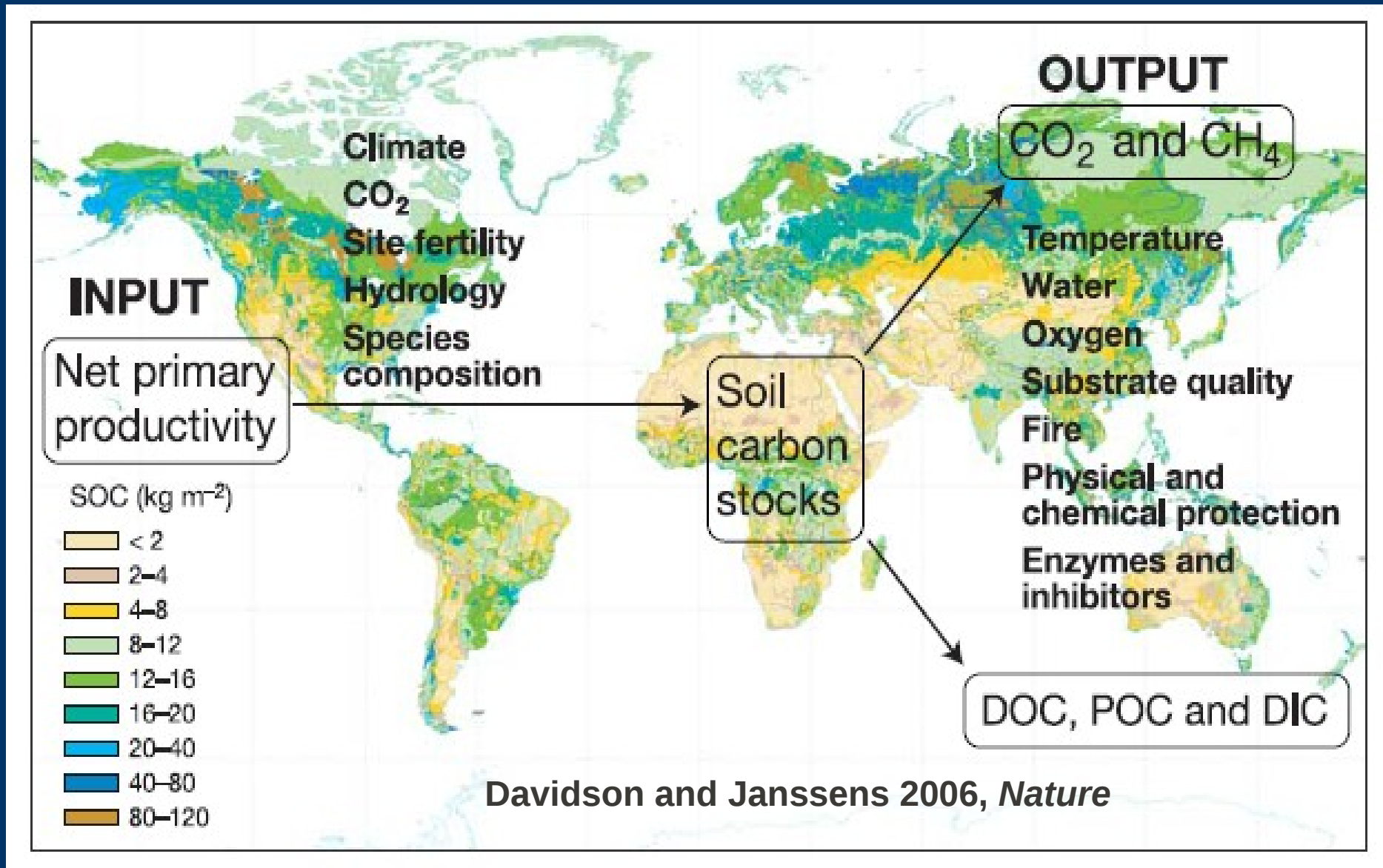
---

## План доклада

- Введение
  - Методы измерения потоков метана в приземном слое
  - Моделирование эмиссии метана с болот
  - Моделирование эмиссии метана с термокарстовых озер
  - Оценка потоков парниковых газов на поверхности решением обратной задачи переноса в атмосфере
  - Оценка потоков парниковых газов на подстилающей поверхности как на основе интегрального баланса
  - Метаногидраты, их возможная роль в климатической системе, моделирование
- 
-

# Содержание органического углерода в почвах

Основной резервуар органического углерода — почвы высоких широт



# Метод закрытых камер

## Камеры



## Изменение концентрации метана в камере со временем

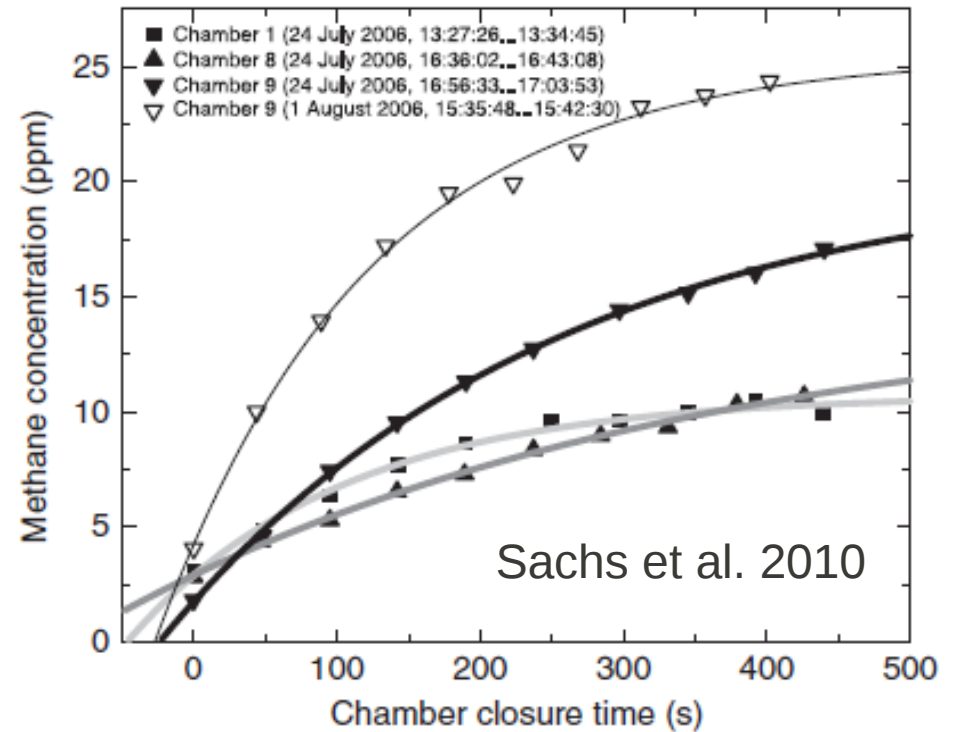


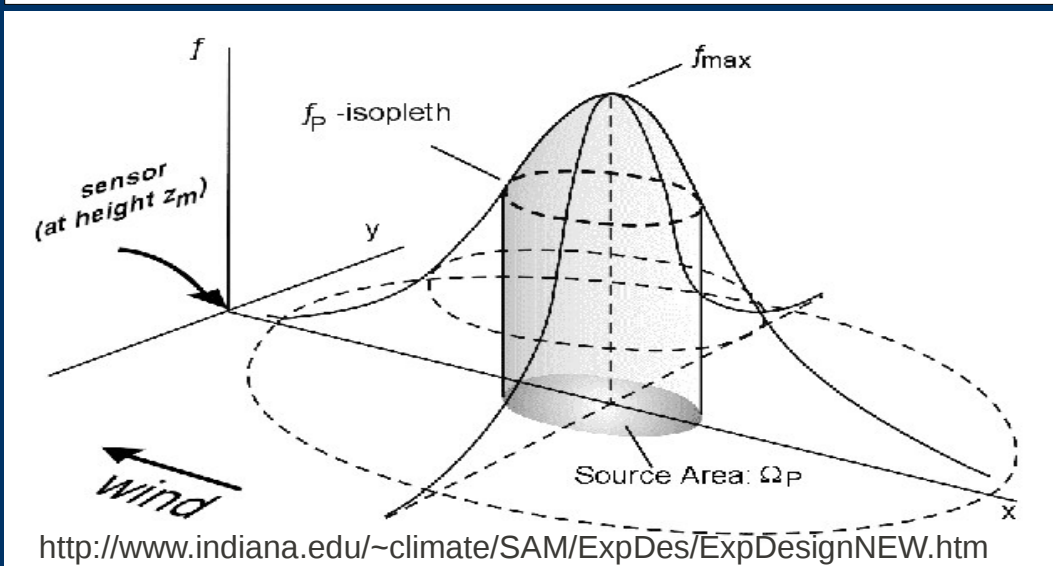
Fig. 4. Examples for nonlinear evolution of  $\text{CH}_4$  concentration in the closed chamber headspace for different microsites and dates. The exponential fits of the form  $c\text{CH}_4 = \beta_1 + \beta_2 \exp(\beta_3 t)$  are also given for each concentration curve.

- Измерение **локальных** потоков метана на подстилающей поверхности (на данном микроэлементе ландшафта)

# Техника ковариации пульсаций (eddy covariance - EC) для измерения потоков парниковых газов

- Потоки зависят от периода осреднения, требуют сложной обработки
- Измеренный поток газа в приземном слое определяется потоком на поверхности в пределах больших значений функции влияния (footprint function), «области влияния»

$$F(x, y, z_m) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(x', y', z=0) f(x'-x, y'-y, z_m) dx' dy'$$



Акустический анемометр

Анализатор CH4

$w$   $C$

Измерения с частотой  $n \cdot 10$  Гц

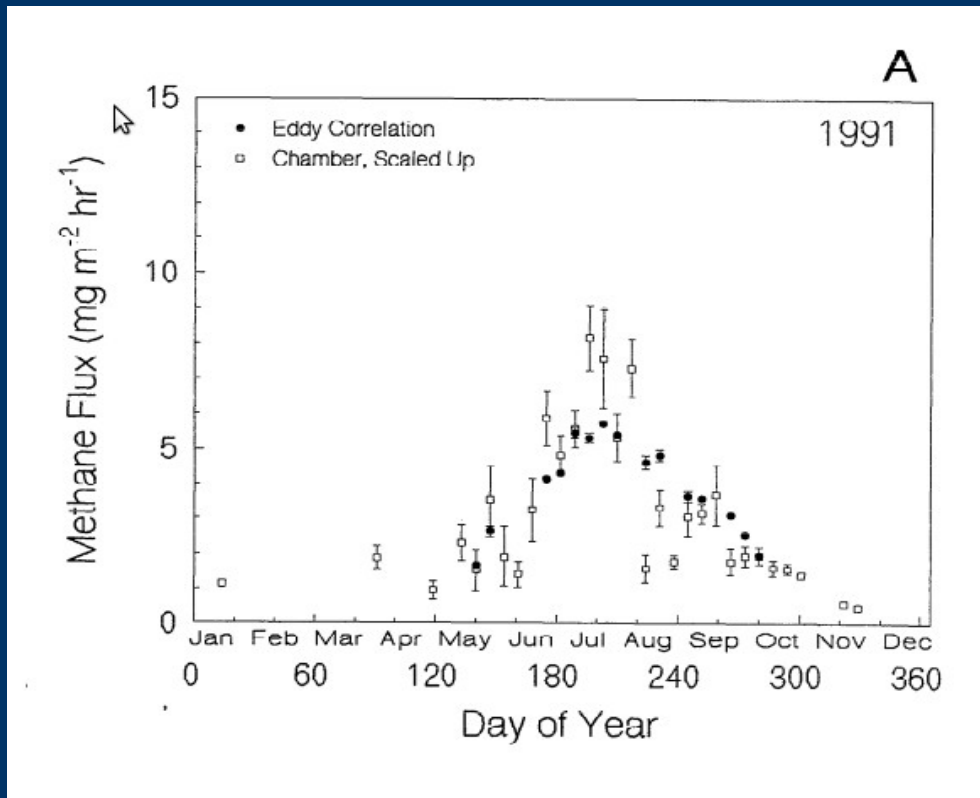
$\overline{w' C'}$

Турбулентный поток газа

# Сопоставление измерений методом камер и ковариации пульсаций

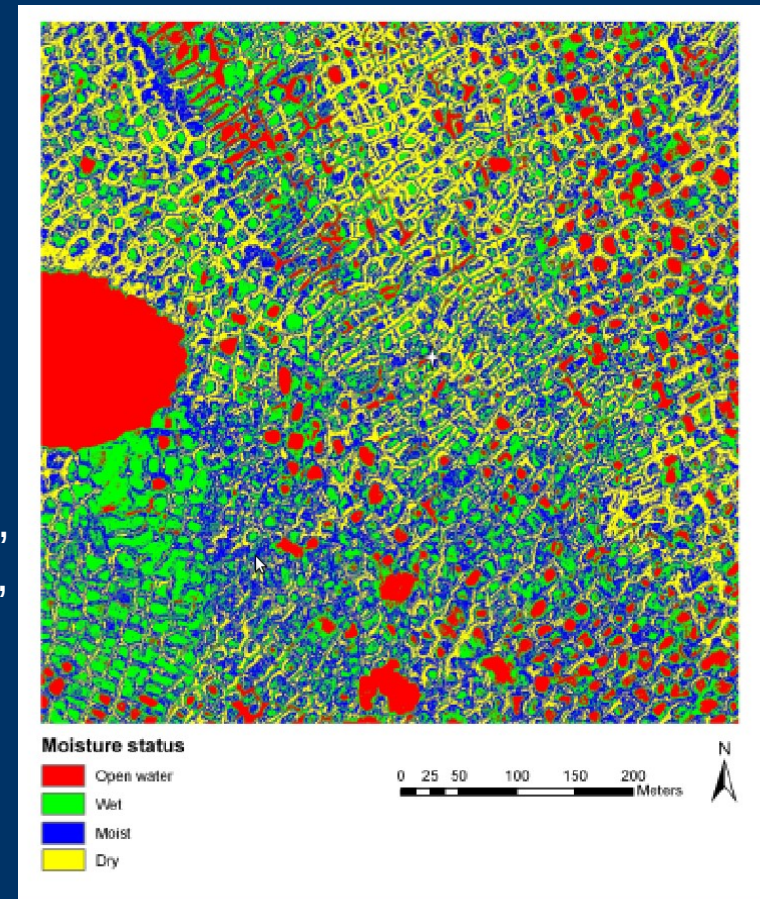
- Средний поток в «области влияния» рассчитывался по мозаичному методу с использованием наблюдений по камерам, расположенных в контрастных типах поверхности

$$\bar{F} = \sum_i F_i \alpha_i$$



Clement et al. 1995,  
болото Bog Lake, Миннесота, США

Sachs et al.  
2010,  
Остров  
Самойлова,  
устье Лены,



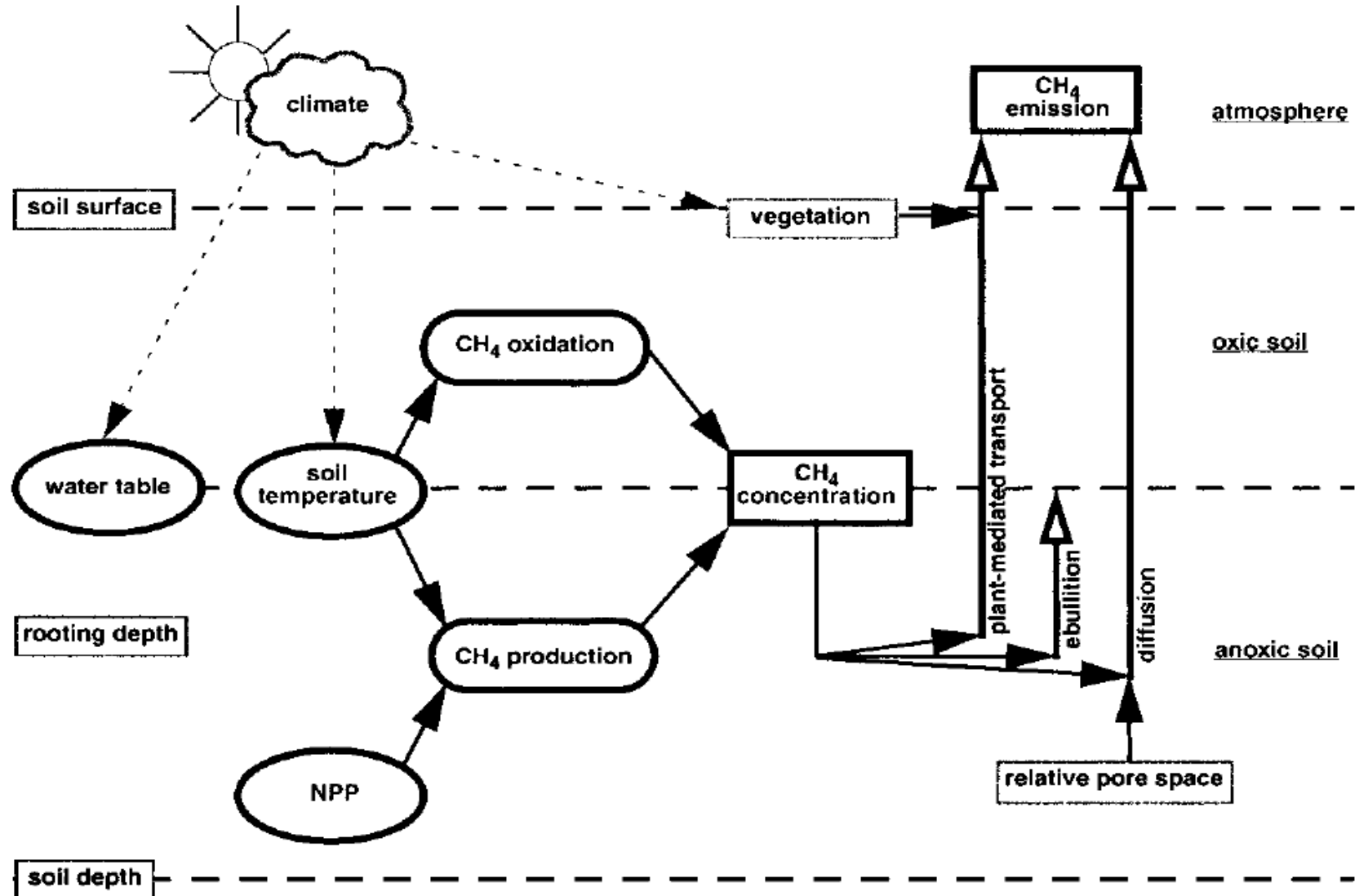
Средние значения за август 2006  
ЕС  $20.6 \pm 1.8 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$   
Агрегированный поток  $20.8\text{-}25.0 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$

## **Модели процессов генерации, переноса и стока метана в болотах**

- **Эмпирические модели** (Frolking and Grill 1994; Dalva et al. 2001; Sachs et al. 2010) связывают потоки метана с температурой почвы, уровнем грунтовых вод, атмосферным давлением, скоростью ветра;
  - **Биохимические модели** (James 1993; Vavilin et al. 1994) - подробное описание кинетики цепочки химических реакций образования метана из исходного органического вещества и динамики микробных популяций
  - **Одномерные модели диффузии метана с параметризацией источников и стоков** (Walter and Heimann 1996; Arah and Stephan 1998; Walter et al. 2001; Zhuang et al. 2004; Wania 2007)
- 
-

# Модель Вальтер и Хайманна (1996, 2001) — схема процессов

WALTER ET AL.: METHANE-MODEL DESCRIPTION AND RESULTS, 1





# Модель Вальтер и Хайманна (1996, 2001) — система уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot C_{CH_4}(t, z) = -\frac{\partial}{\partial z} \cdot F_{diff}(t, z) + Q_{ebull}(t, z) + Q_{plant}(t, z) + R_{prod}(t, z) + R_{oxid}(t, z)$$

Уравнение диффузии с источниками для концентрации метана в вертикальном столбе почвы

$$F_{diff}(t, z) = -D_{CH_4}(z) \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot C_{CH_4}(t, z)$$

$$Q_{ebull}(t, z) = -k_e \cdot f(C_{CH_4}) \cdot (C_{CH_4}(t, z) - C_{max})$$

$$F_{ebull}(t) = \int_l^w A_{por} \cdot Q_{ebull}(t, z) \cdot dz$$

Пузырьковая эмиссия

$$Q_{plant}(t, z) \stackrel{\Delta}{=} -k_p \cdot D_{veg} \cdot T_{veg} \cdot f_{grow}(t) \cdot f_{root}(z) \cdot C_{CH_4}(t, z)$$

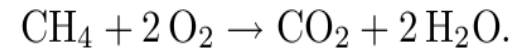
$$F_{plant}(t) = \int_r^s (1 - P_{ox}) \cdot Q_{plant}(t, z) \cdot dz$$

$$R_{prod}(t, z) = R_0 \cdot f_{org}(z) \cdot f_{in}(t) \cdot Q_{10}^{\frac{T(t,z)-10}{10}} \cdot f(T)$$

генерация метана

$$R_{oxid}(t, z) = -\frac{V_{max} \cdot C_{CH_4}(t, z)}{K_m + C_{CH_4}(t, z)}$$

сток метана за счет окисления кислородом



$$\frac{\partial}{\partial z} \cdot C_{CH_4}(t, z = l) = 0$$

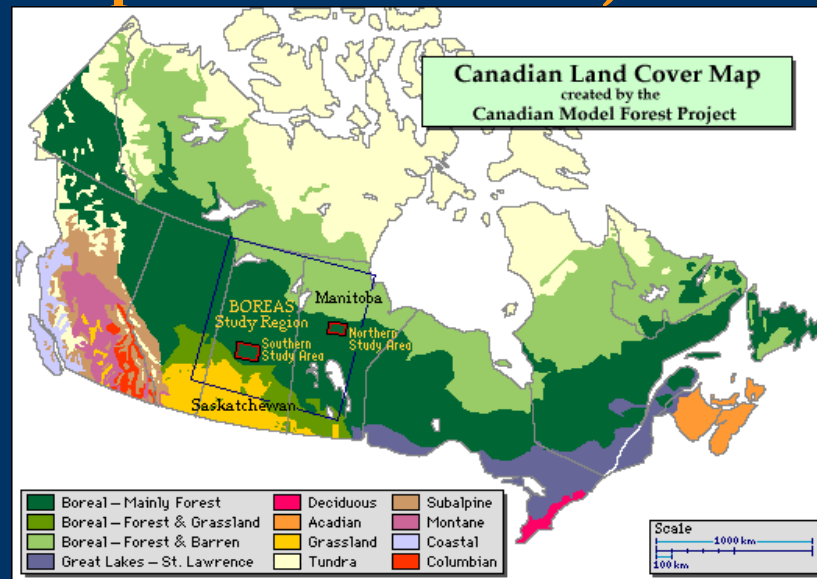
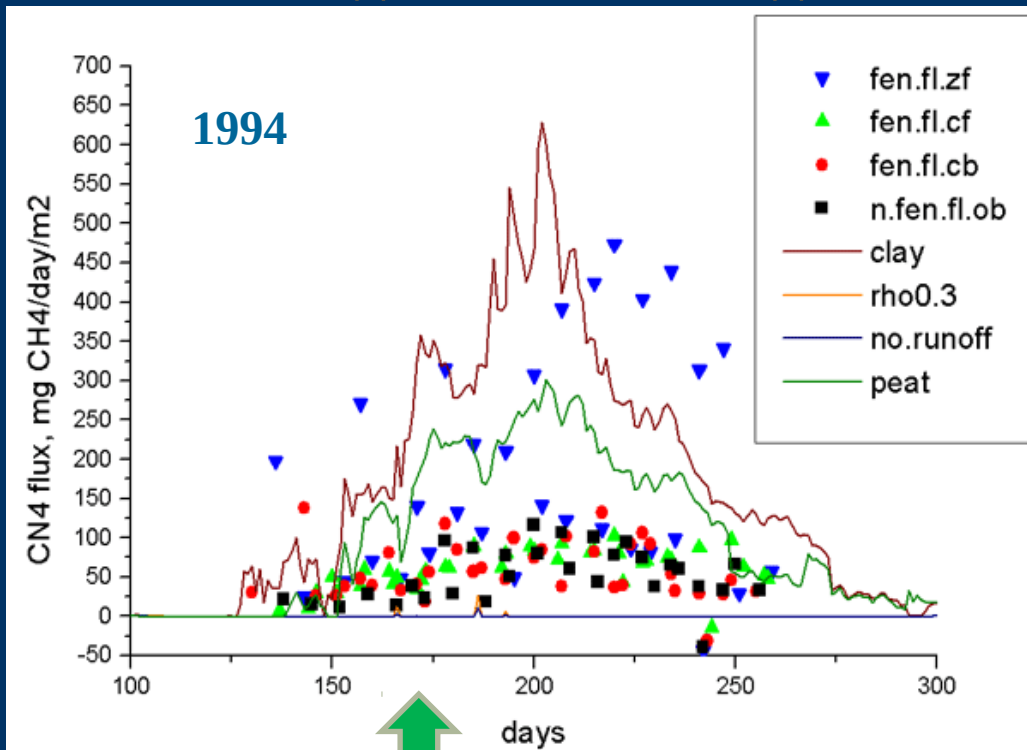
$$F_{tot}(t) = F_{diff}(t, z = u) + F_{ebull}(t) + F_{plant}(t)$$

Суммарная эмиссия метана в атмосферу

Граничные условия

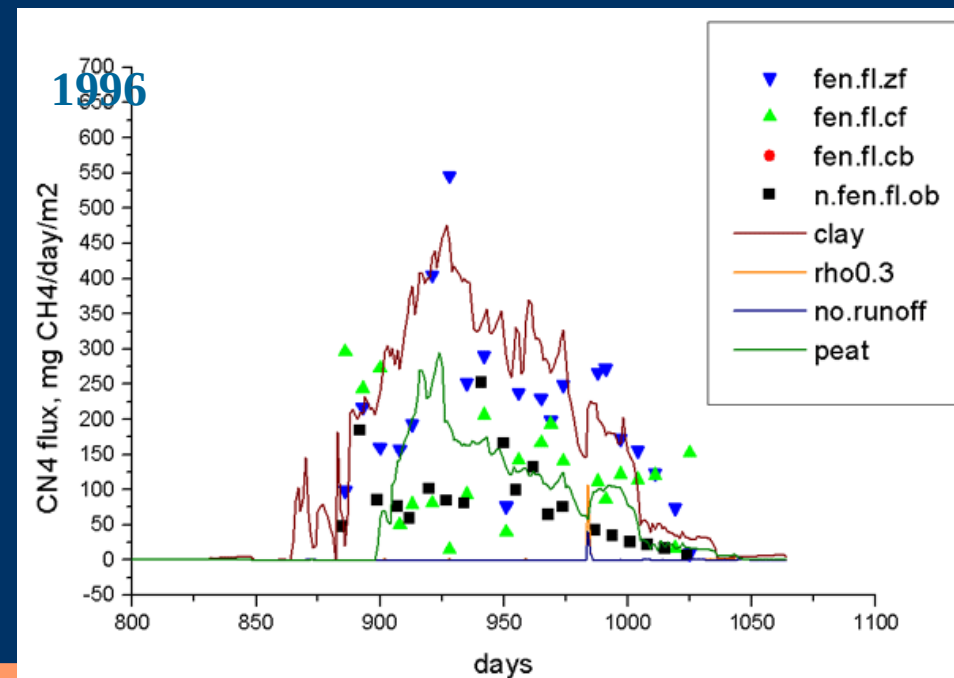
$$C_{CH_4}(t, z = u + 2cm) = C_{atm}$$

# Потоки метана по модели Вальтер и Хайманна (Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН, данные наблюдений – эксперимент BOREAS)



Потоки метана близки к 0, если верхние слои почвы имеют малую влажность.

Потоки метана очень чувствительны к влажности почвы. →  
Корректность воспроизведения влажности почвы во много определяется точностью задания гидрофизических параметров.



# Международный проект по сравнению моделей процессов генерации и эмиссии метана в болотах

WETCHIMP

Home

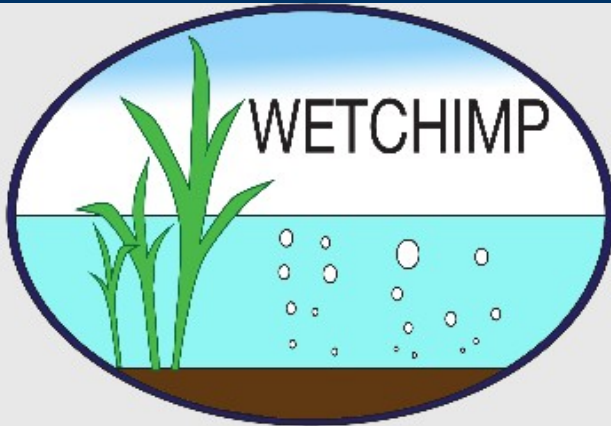
News

Overview

Protocol (wiki)

Mailinglist

Contact



## WETland and Wetland CH<sub>4</sub> Inter-comparison of Models Project (WETCHIMP)

Welcome to our home-page.

Please use the menu on the left to navigate the site and learn more about the WETland and Wetland CH<sub>4</sub> Inter-comparison of Models Project (WETCHIMP).

*The WETCHIMP pages are maintained by J. Melton and hosted by the ARVE group*

- сравнение региональных и глобальных моделей деятельного слоя болот в терминах потока метана в атмосферу
- метеорологический «форсинг», распределение болот, приземные концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> заданы

# Едома



## Едома -

субарктические равнины Восточной Сибири, где небольшие возвышенности сложены четвертичными отложениями с ископаемыми льдами и мелкобугристой поверхностью. Едома обладает очень высоким содержанием органического углерода (до 2% по массе)

Map adapted from Guido Grosse, 2008.

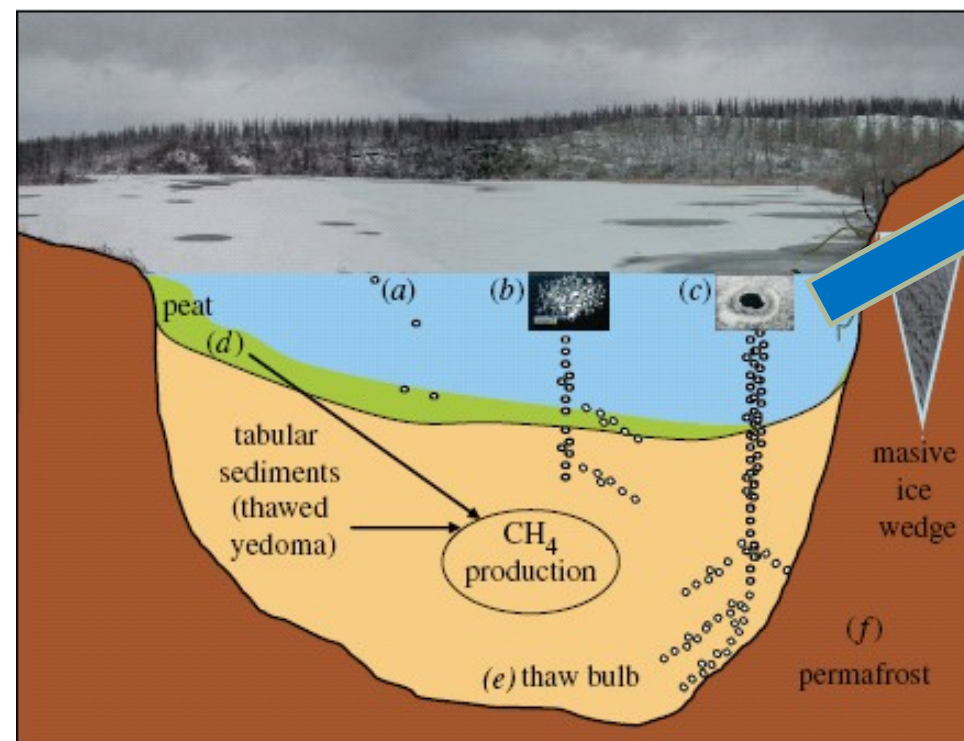
# Эмиссия метана термокарстовыми озерами



- термокарстовые озера в Сибири занимают до 22-48% площади
- Поле термокарстовых озер очень динамично



Интенсивный источник ("hotspot") – может быть источником значительную часть зимы



- 8 - 50% от антропогенной эмиссии метана в XXI веке в зависимости от сценария МГЭИК (K. Walter et al., 2006, *Nature*)

# Methane emission: bogs and lakes

## Mechanism of methane production

- On **bogs** the substrate for methane production comes from surface NPP -> modeling approaches are well developed
- In **lakes** methane is produced (i) from lake bottom NPP and (ii) from the old organics, that has been sequestered in permafrost and comes to positive temperature region while talik is deepening -> the need for new parameterization

## Implication to annual cycle

- On **bogs** cold season emission is very low;
- In **lakes** methane is produced in talik, that is under positive temperatures all year round (40-50% of annual emission happen in cold period)

# Methane concentration in lake talik

$$\frac{\partial [CH_4]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{CH_4, m} \frac{\partial [CH_4]}{\partial z} + P - E - \cancel{F}$$

(B. Walter & Heimann, 1996, 2000)

**Neglected:**

vegetation transport  $F$

**Ebullition:**

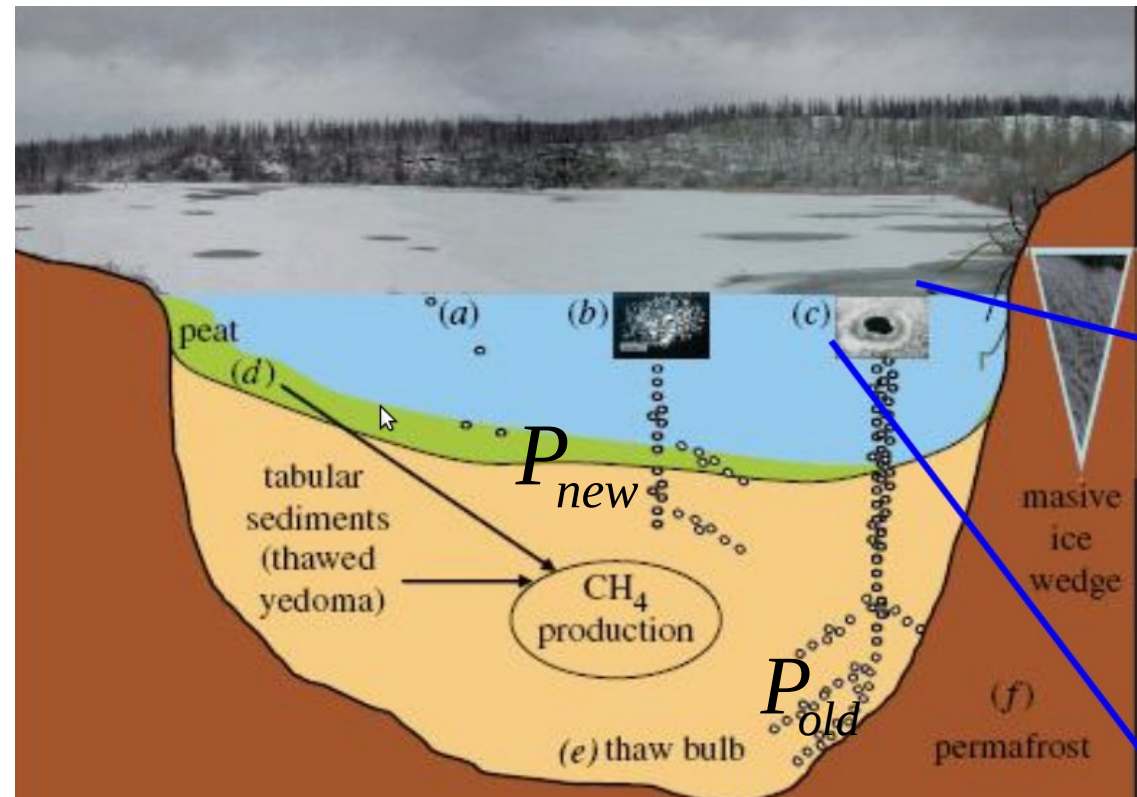
$$E = k_e f_{step} (\Delta [CH_4]) \Delta [CH_4],$$

$$\Delta [CH_4] = [CH_4] - [CH_4]_{max}$$

**Production:**

$$P = P_{new} + P_{old}$$

$$P_{new} = P_{new,0} \exp(-\alpha_{new} z) f_{step}(T) q_{00}^{T/10} \quad P_{new,0} \text{ - calibrated parameter}$$



# Methane production from old organics decomposition

- happens only under positive temperatures
- is exponentially dependent on temperature
- is proportional to decomposable organics content

$$P_{old} = P_{old,0}^* C_{old} f_{step}(T) q_{00}^{T/10}$$

$P_{old,0}^*$  - calibrated parameter

Michaelis-Menten equation  
for decomposition (1)



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{-V_{C,max} C_{old}}{\alpha_C + C_{old}},$$

$$C_{old} = f(t, t_0, \alpha_C, V_{C,max})$$

Analytical law  
for talik deepening (2)



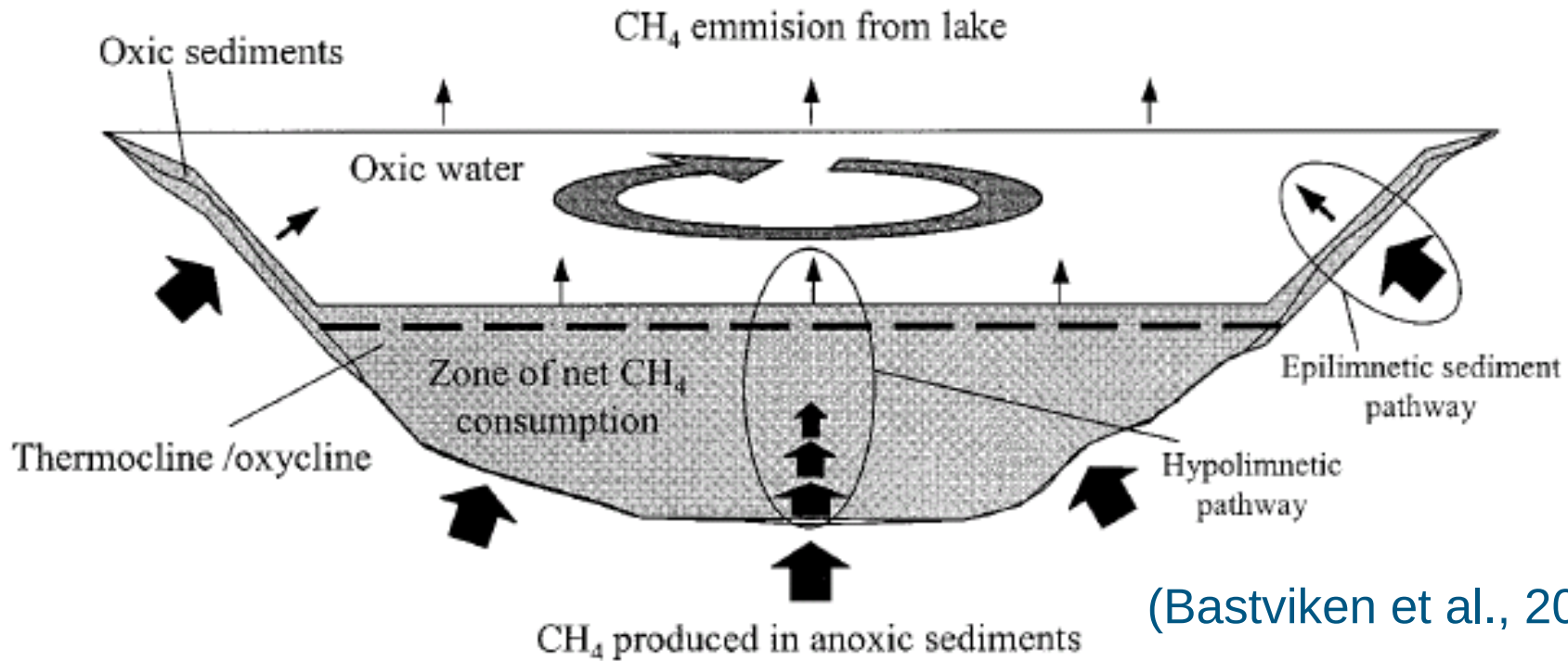
$$z = C_t \sqrt{t_0}, \quad h_t = C_t \sqrt{t}$$

Combining (1) and (2) yields

$$P_{old} = P_{old,0}^* C_{old,0} * \left( 2 + \lambda_C - \sqrt{(1 + \lambda_C)^2 + 2\gamma_C C_t^{-2} (h_t^2 - z^2)} \right) f_{step}(T) q_{00}^{T/10}$$



# Methane transfer in the water body



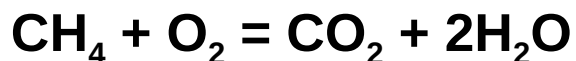
(Bastviken et al., 2002)

- **dissolved gases:**

- methane
- oxygen
- carbon dioxide

- **processes:**

- turbulent diffusion
- methane oxidation



$$\frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{CH}_4} \frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial z} - V_{\text{oxid}}$$

$$\frac{\partial [\text{O}_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{O}_2} \frac{\partial [\text{O}_2]}{\partial z} - 2V_{\text{oxid}}$$

$$\frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{CO}_2} \frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial z} + 2V_{\text{oxid}}$$

# Термогидродинамическая модель водоема LAKE

Одномерная постановка задачи с краевыми условиями на границе с атмосферой и на нижней границе слоя грунта

- уравнение притока тепла

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{1}{A} \int_{\Gamma_A} \vec{u} \cdot \vec{n} T dl$$

- уравнения движения воды

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial u}{\partial z} + fv - g \cdot \operatorname{tg} \alpha_x - C_{veg} u \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_M \frac{\partial v}{\partial z} - fu - g \cdot \operatorname{tg} \alpha_y - C_{veg} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

- уравнения турбулентного замыкания k-ε

$$k_M = C_e \frac{E^2}{\varepsilon},$$

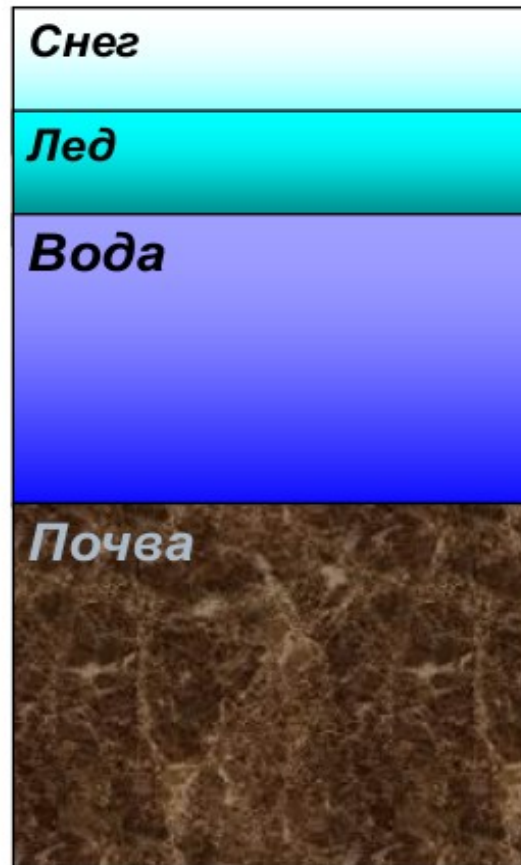
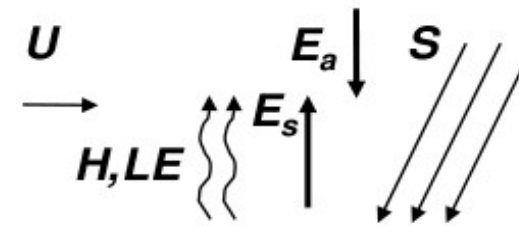
$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( v + \frac{k_M}{\sigma_E} \right) \frac{\partial E}{\partial z} + P + B - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( v + \frac{k_M}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{E} c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon$$

- уравнения теплопроводности и переноса жидкой влаги в снежном покрове;

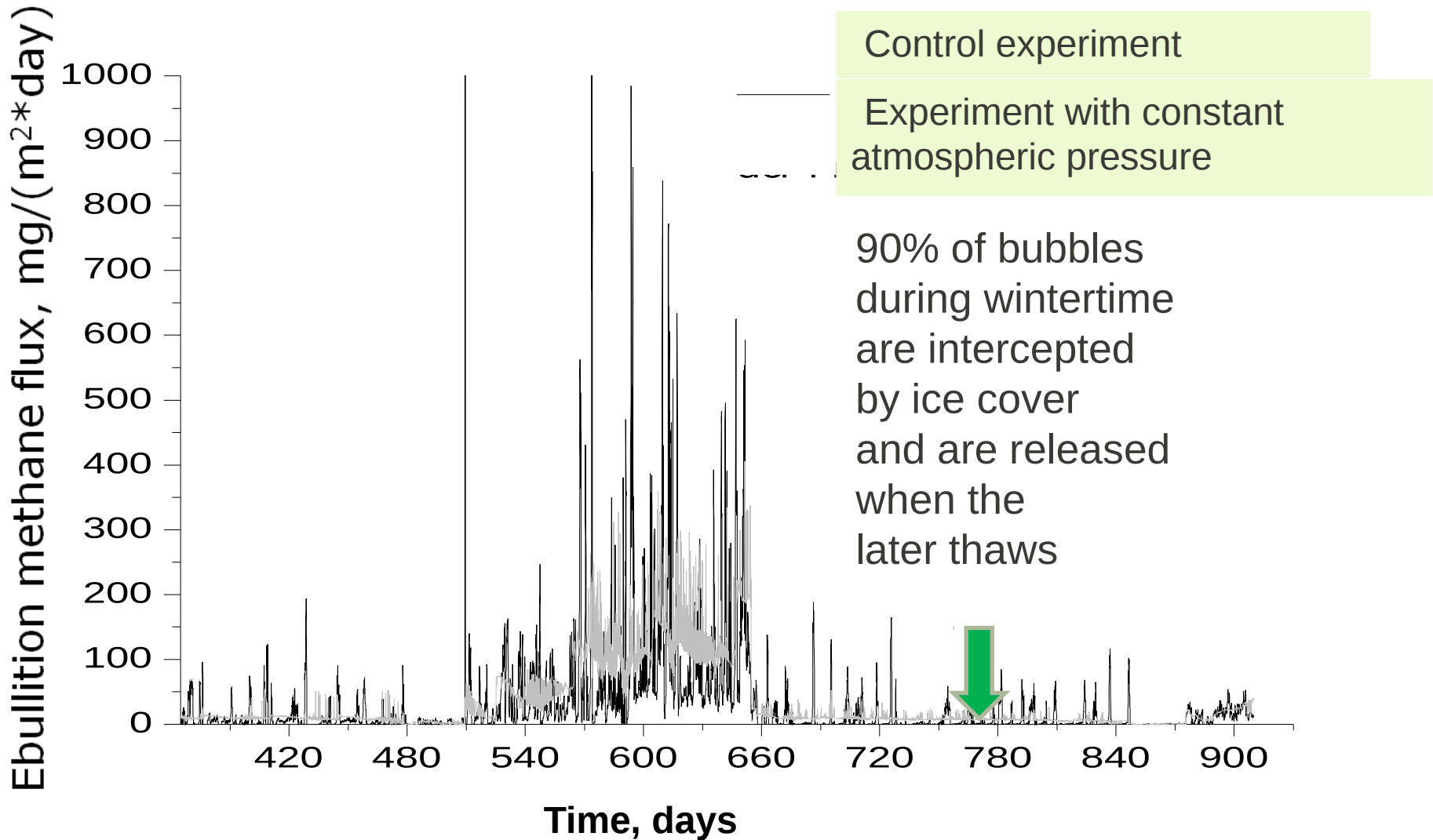
- уравнение теплопроводности в слое льда;

- уравнение теплопроводности и переноса жидкой влаги в грунте с учетом замерзания/таяния.



# Case study: Lake Shuchi (Щучье)

- Time series of atmospheric variables as input to lake model are extracted from ERA-Interim reanalysis



# Model calibration: Lake Shuchi

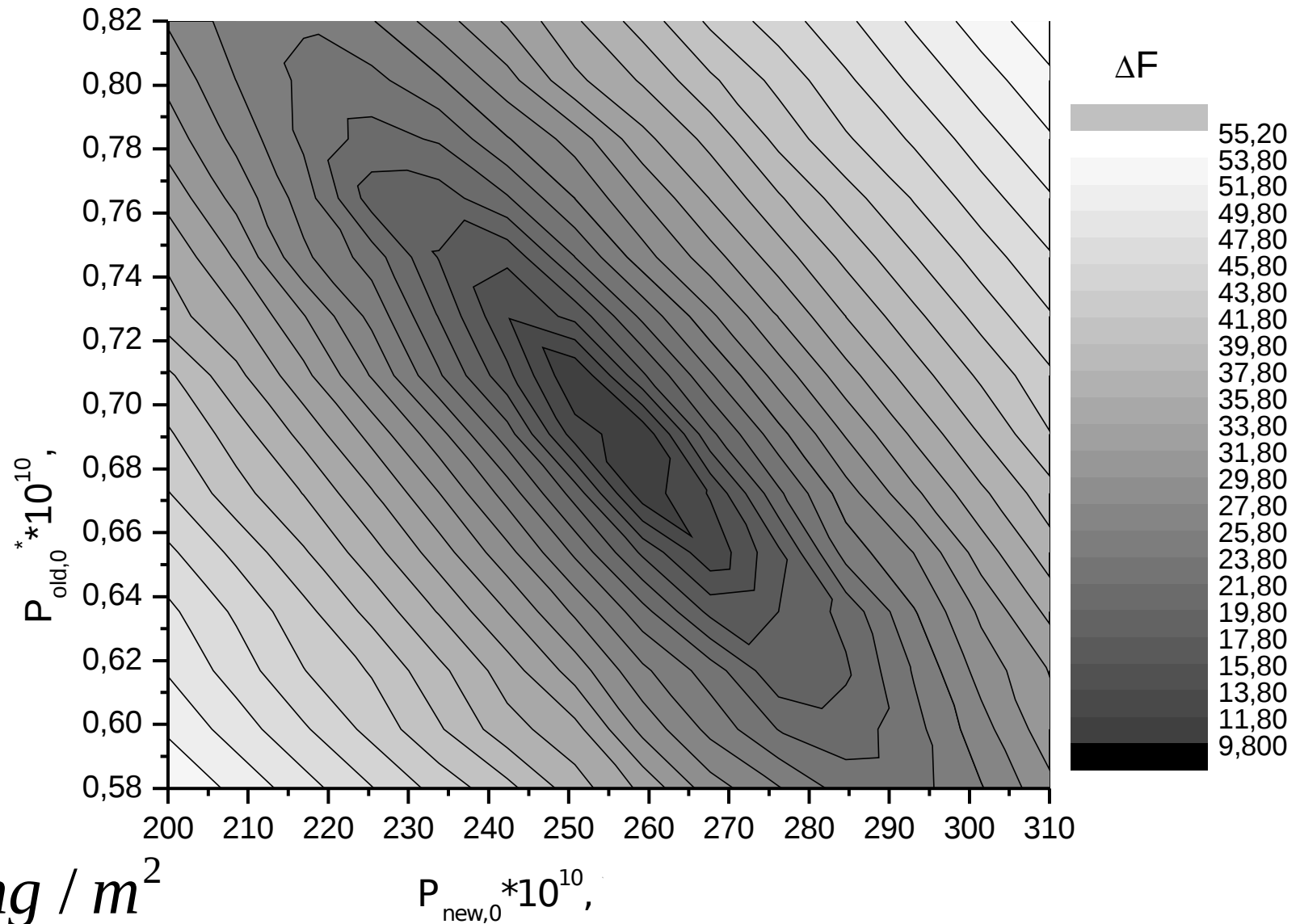
The measure  
of model error

$$\Delta F^2 \propto \left( F_a^w - F_{a,m}^w \right)^2 + \left( F_a^s - F_{a,m}^s \right)^2$$

- Calibrated parameters

$$P_{old,0}^*, P_{new,0}$$

- $\Delta F$   
has single  
minimum



# Model validation

**Observations: Lake Shuchi** (K. Walter et al., 2006)

hourly observations of ebullition and diffusion methane fluxes in different lake sections for 2003 – 2004

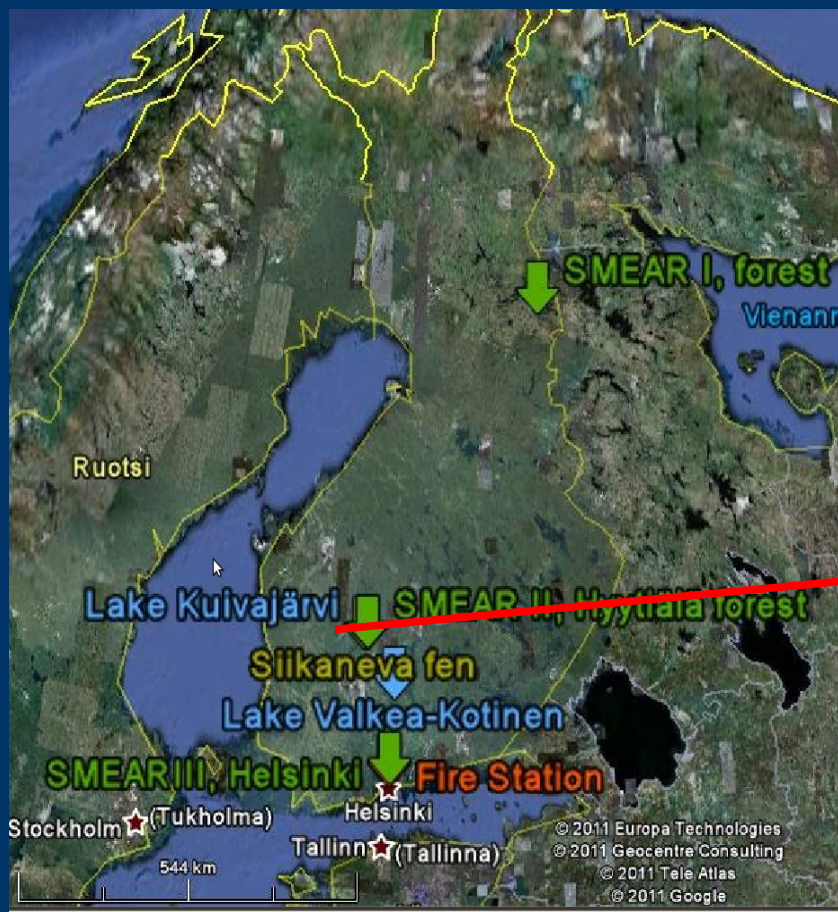
	Annual methane emission, (m <sup>2</sup> *yr) g/	A part of open-water emission , %	A part of ice-covered period emission, %
<b>Observations</b>	<b>22.7</b>	<b>54</b>	<b>46</b>
<b>Model</b>	<b>22.6</b>	<b>54</b>	<b>46</b>

	Open water period	Ice-covered period
<b>A part of young methane in emissions (observations) , %</b>	<b>47</b>	<b>6</b>
<b>A part of young methane in net generation (model) , %</b>	<b>61</b>	<b>32</b>

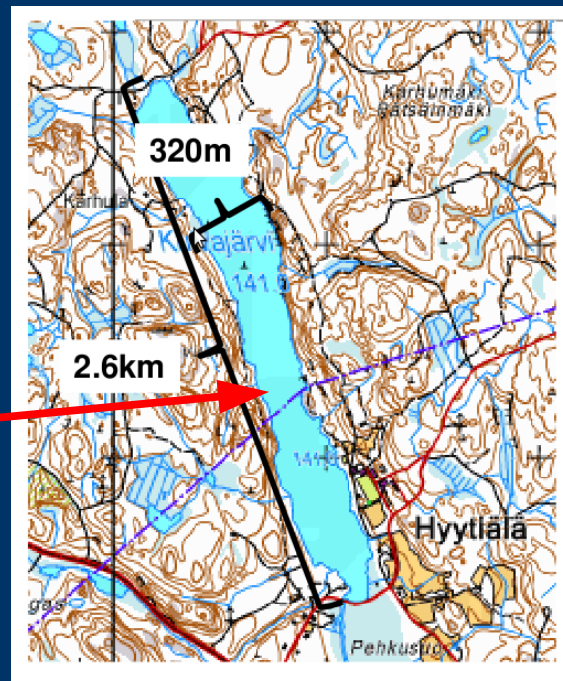
# Remarks on lake methane model

- The values of calibrated parameters depend on errors (lack of observations!) of input parameters: lake depth, water turbidity, atmospheric forcing, etc.
- The model should be verified on a significant number of thermokarst lakes
- The model still does not consider thermokarst lake development (deepening, drainage, etc.)

## Дальнейшее развитие модели метана в озере: озера высоких широт вне зоны вечной мерзлоты



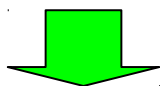
### Озеро Куйвайярви, Финляндия



- Измерения проводятся на заякоренном буе
- Стандартные метеорологические измерения
- Потоки радиации
- Измерения ЕС потоков  $H$ ,  $LE$ ,  $\tau$ ,  $F(CO_2)$
- Профили температуры,  $CO_2$  и  $CH_4$  в озере
- Измерения потоков  $CH_4$  методом камер

# Схема деятельного слоя суши для моделирования потоков метана и углекислого газа с поверхности для разрешения 1-10 км

**Данные для валидации** → интегральные потоки с больших регионов Западной Сибири



**Метеорологический форсинг** → региональный реанализ



## Схема деятельного слоя суши ИВМ РАН

(Володина и др., 2000)

- 1) Процессы тепловлагопереноса в почве с учетом фазовых переходов
- 2) Модель снежного покрова (Мачульская)
- 3) Растительность

## Модель водоема LAKE

(Степаненко и др., 2011)

k-ε модель турбулентности, слой грунта с вечной мерзлотой

Параметризация фотосинтеза (Bonan et al., 1996)

Окисление органики в почве- модель ROMUL (Chertov et al., 2001)

Модель генерации и эмиссии метана в болотах (Walter&Heimann, 2001)

Модель генерации, переноса и стока метана в озере



## Внешние параметры → данные ЕСОСЛИМАР (1км x 1км):

- 1) коэффициент шероховатости
- 2) альбедро
- 3) типы растительности
- 4) площадь водоемов



# Обратное моделирование источников парниковых газов на подстилающей поверхности

Основной аппарат — 4-мерное усвоение данных

- Потоки парникового газа на поверхности определяются из условия минимума целевого функционала (cost function) (Meirink et al. 2005)

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (\mathbf{H}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i)^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{H}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i).$$

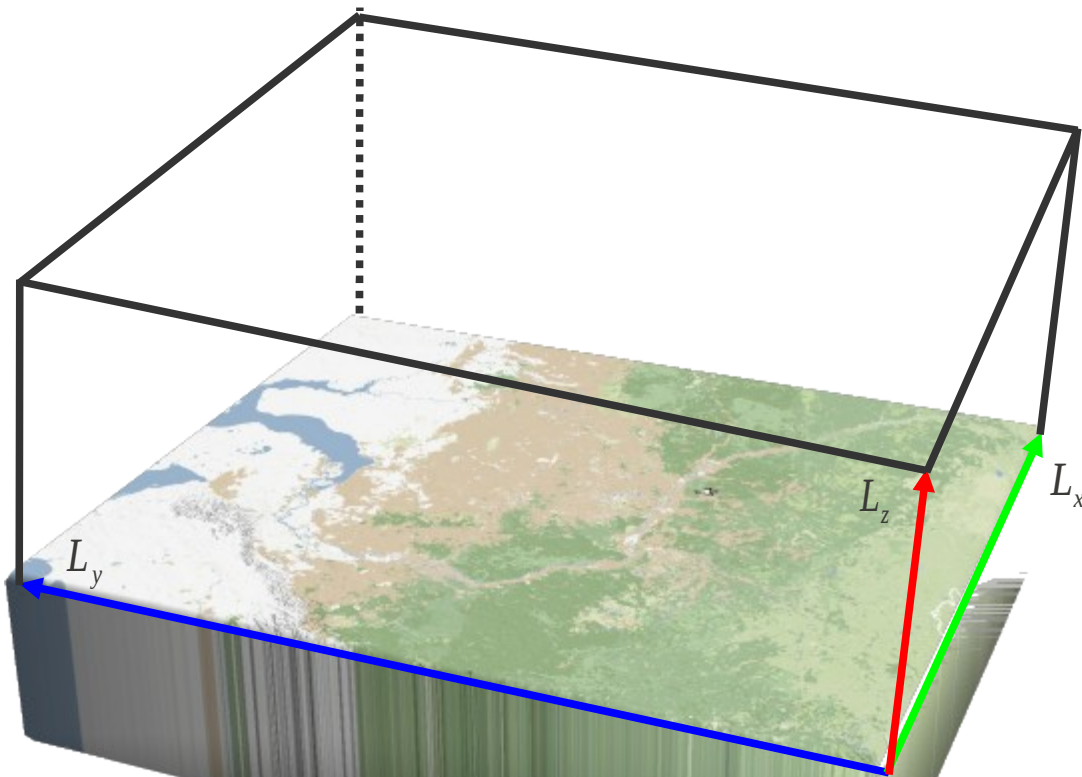
- Вектор состояния в  $i$ -й момент времени определяется последовательным применением операторов шага модели переноса газа, начиная с начального (0-го) момента времени

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{M}_{i-1} \mathbf{x}_{i-1} = \mathbf{M}_{i-1} \cdots \mathbf{M}_0 \mathbf{x}_0,$$

- Методы нахождения минимума  $J$  требуют вычисления градиента  $J$ , в который входят сопряженные операторы переноса  $\mathbf{M}^T$

$$\nabla J(\mathbf{v}) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) + \sum_{i=0}^n \mathbf{M}_0^T \cdots \mathbf{M}_{i-1}^T \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{H}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i)$$

- Метод позволяет получить потоки газа на поверхности с высоким разрешением (разрешением модели переноса)
- На результаты обратной задачи влияют важные неопределенности, например, неточность задания матриц ковариации ошибок



Уравнение переноса-диффузии-реакции для концентрации метана С:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} =$$

$$CD - \left( \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) - R(C, C_{OH}, T),$$

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Интегрируя его по объему:

$$(\dots) = \iiint_{xyz} (\dots)$$

получаем:

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{C} +$$

$$\iint_{yz} (uC)_{x=L_x} - \iint_{yz} (uC)_{x=0} +$$

$$\iint_{xz} (vC)_{y=L_y} - \iint_{xz} (vC)_{y=0} +$$

$$\iint_{xy} (wC)_{z=L_z} - \iint_{xy} (wC)_{z=0} =$$

$$- \left( \iint_{yz} F_{x,x=L_x} - \iint_{yz} F_{x,x=0} \right) -$$

$$\left( \iint_{xz} F_{y,y=L_y} - \iint_{xz} F_{y,y=0} \right) +$$

$$(\tilde{C}D) - \tilde{R} -$$

$$\iint_{xy} F_{z,z=L_z} +$$

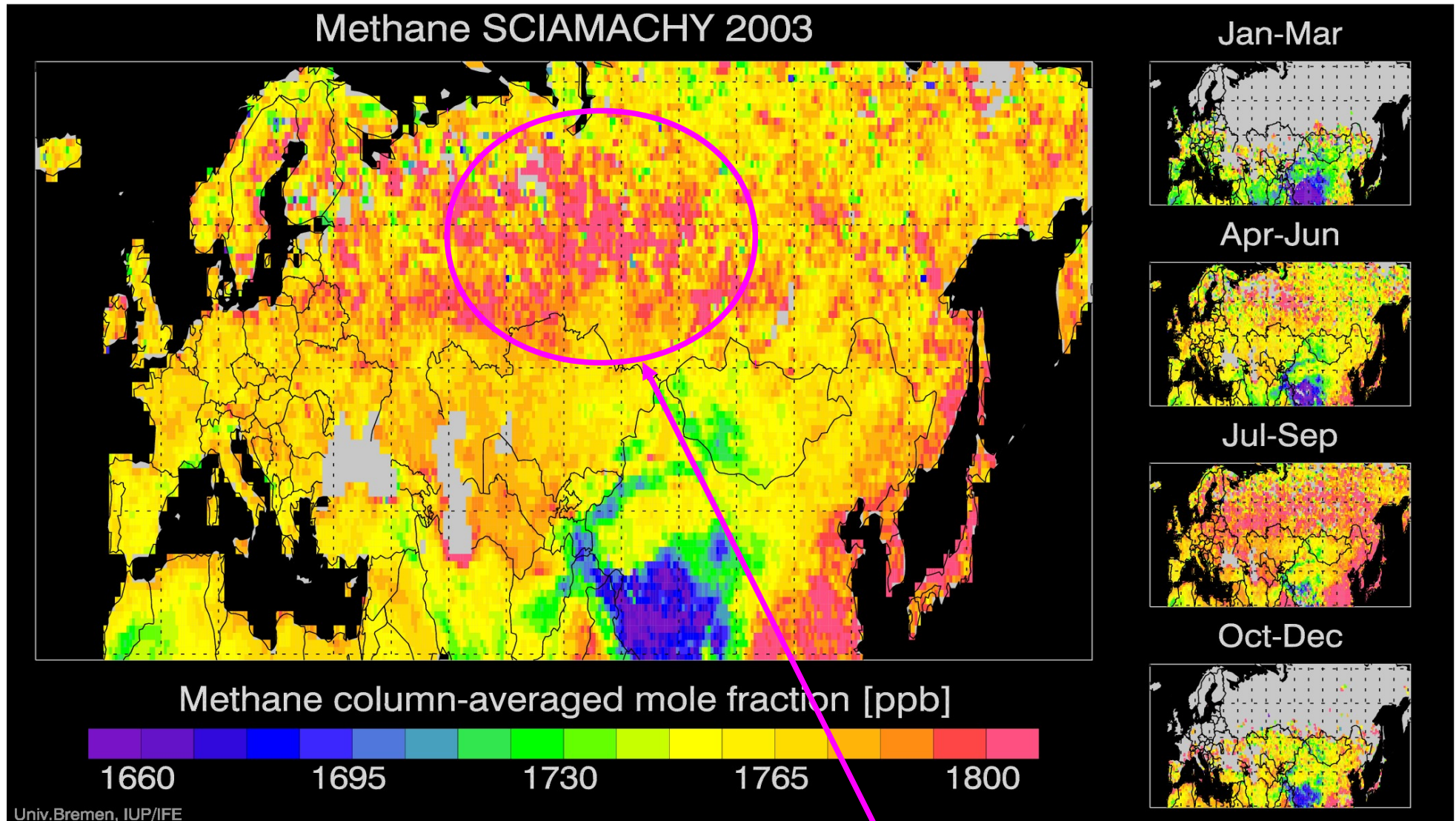
Эти слагаемые рассчитываются по следующим данным:

- 1) Температура, скорости, коэффициент турбулентной диффузии – **региональный реанализ**
- 2) Концентрация метана – **спутниковое зондирование**
- 3) Концентрация ОН – **климатические средние**

Остаточный член уравнения – интегральный поток метана с поверхности региона

$$\iint_{xy} F_{z,z=0}$$

# Satellite retrievals of methane concentration



## 1) SCIAMACHY

(SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY, <http://envisat.esa.int>)

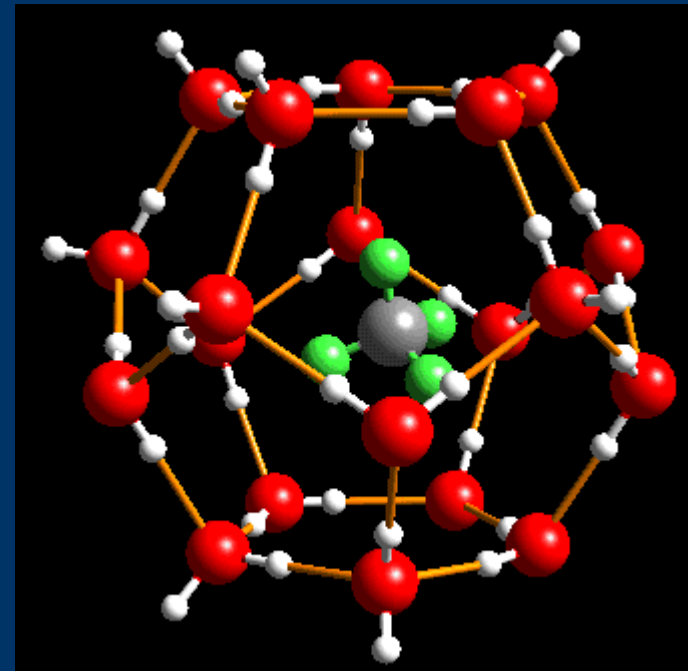
2) GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite, [http://www.gosat.nies.go.jp/index\\_e.html](http://www.gosat.nies.go.jp/index_e.html))

3) AIRS (Atmospheric Infrared Sounder, <http://airs.jpl.nasa.gov/>)

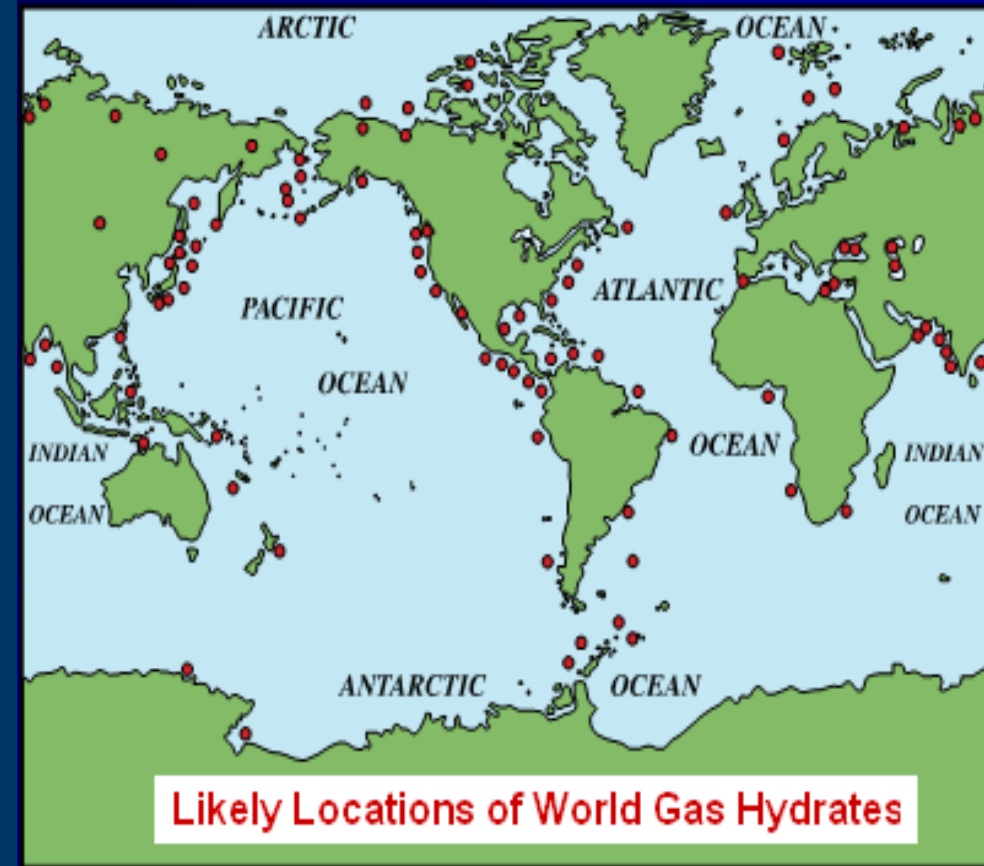
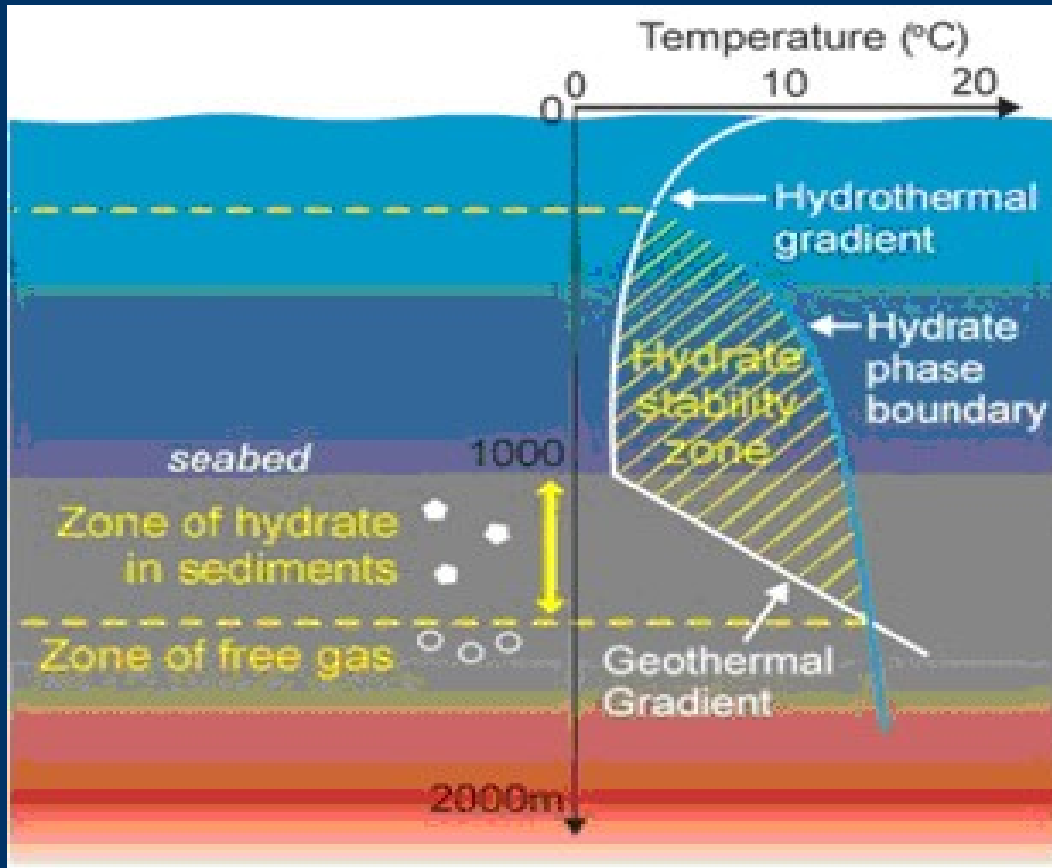
Maximum of methane concentration over Western Siberia indicates high surface emissions

# Метаногидраты

- Кристаллическая структура формируется молекулами воды, внутри каркаса которой находится молекула метана (обычно 1 моль  $\text{CH}_4$  приходится на 5.75 молей  $\text{H}_2\text{O}$ )
- Устойчив при высоких давлениях
- При падении давления или росте температуры распадается на метан и воду, но может существовать и в метастабильном состоянии (при температурах, превышающих температуру таяния)
- Плотность около  $900 \text{ кг/м}^3$
- 



# Метаногидраты в Мировом океане и литосфере



- Особый интерес представляют газогидраты Арктики, поскольку потепление климата и океана там наиболее интенсивно и разрушение газогидратов, таким образом, наиболее вероятно

## Перенос метана к поверхности воды

- При пузырьковом выделении метана, пузырьки достигают поверхности воды только на шельфах, **в районах глубин несколько десятков метров**, из-за газообмена с окружающей водой
  - При механическом воздействии куски метаногидрата могут отрываться от дна и достигать поверхности воды (Brewer et al. 2002)
  - Турбулентная диффузия растворенного метана — эффективный механизм переноса, поскольку окисление метана в океане характеризуется временем жизни 50 лет (Rehder et al. 1999)
- 
-



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

# Моделирование метаногидратов

- Одномерная модель (Grag et al. 2008) донных отложений с подробным описанием переноса-диффузии жидкой и газовой фазы в пористых отложениях дна океана — применение модели на геологическом масштабе времени (миллионы лет)
- Модель TOUGH+HYDRATE (Moridis et al. 2008) применена для расчета эмиссии метана при повышении донной температуры на 1 C/100 лет, эксперимент длился (300 лет)

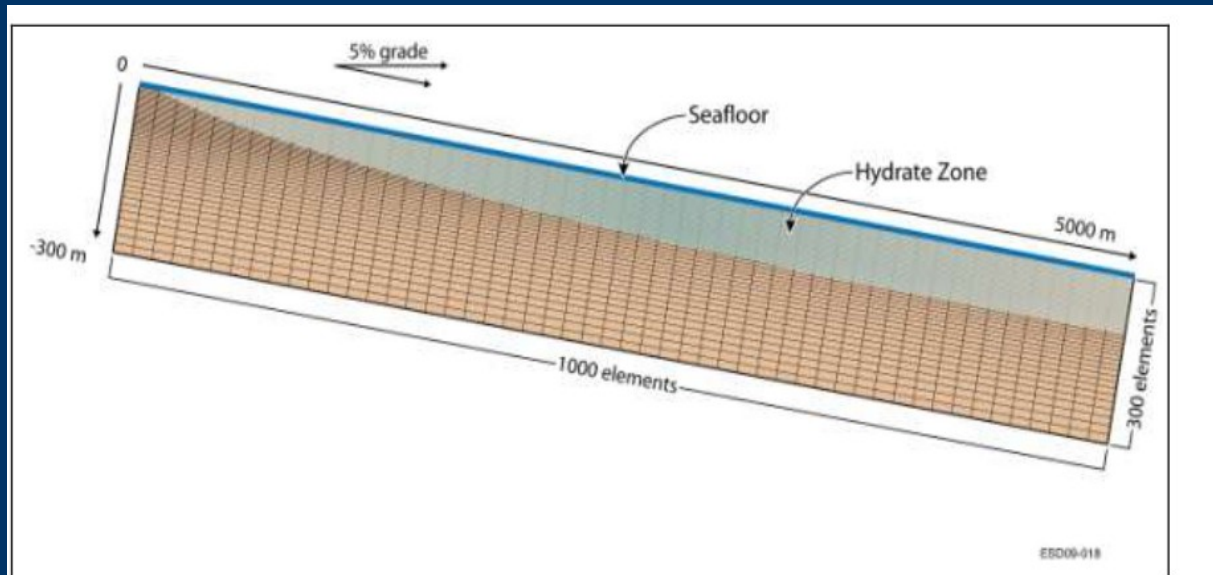


Figure 1. Illustration of the domain discretization, GHSZ extent, and boundaries for the 2D sloping system (not to scale). Gridlines are a schematic representation only.