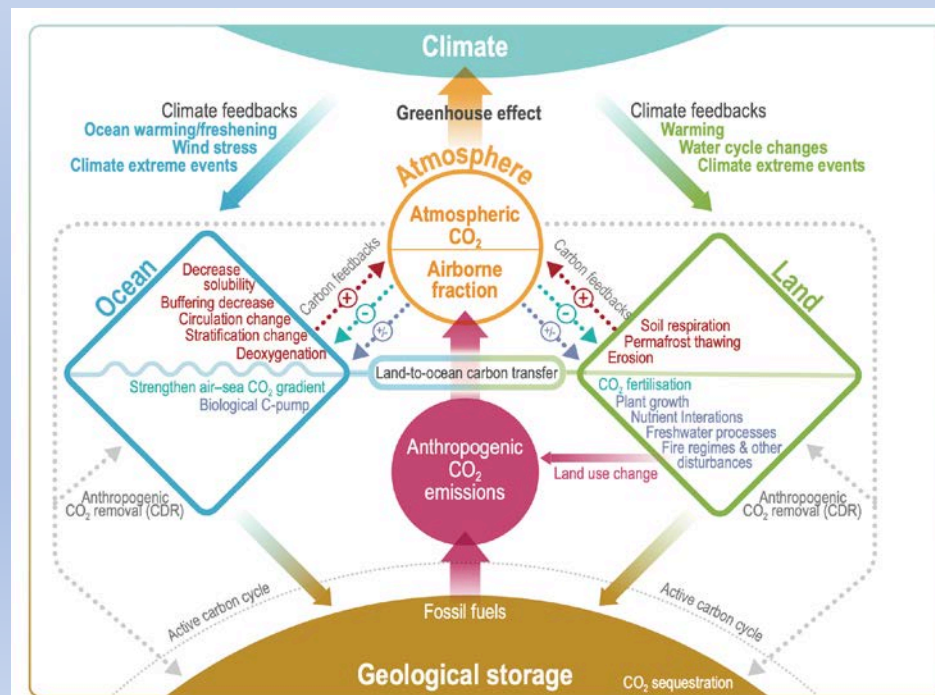


Дистанционные и прямые методы исследования баланса парниковых газов наземных экосистем

Ирина Репина

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ



При поддержке РАНФ, грант
№22-47-04408

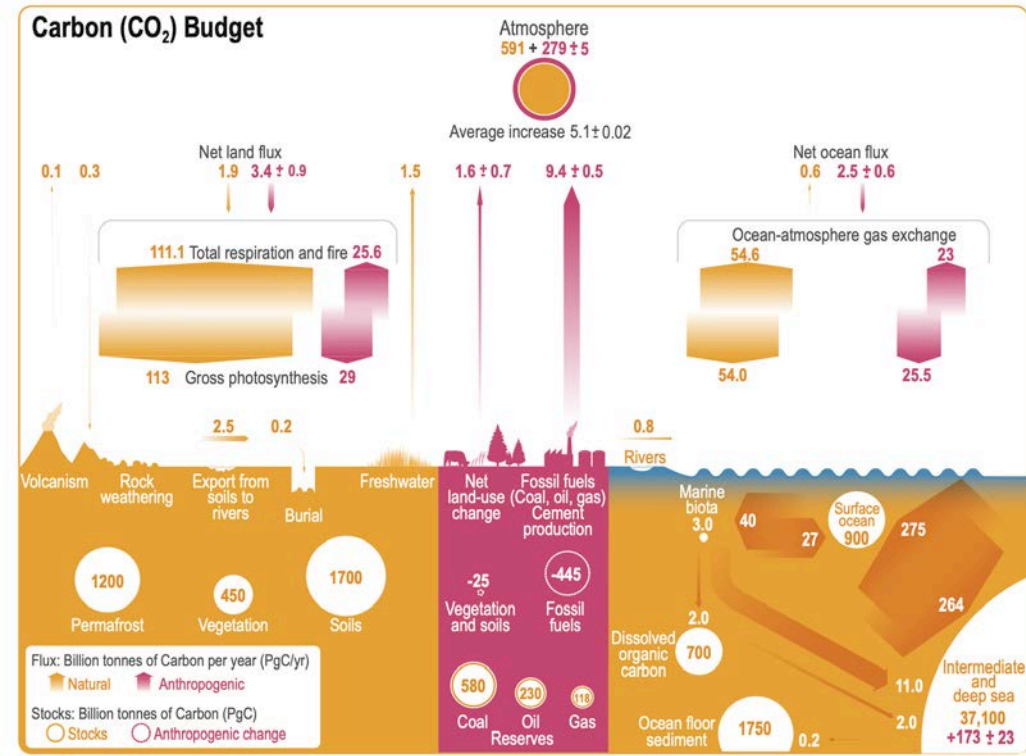
Climate Change 2022

Impacts, Adaptation and Vulnerability

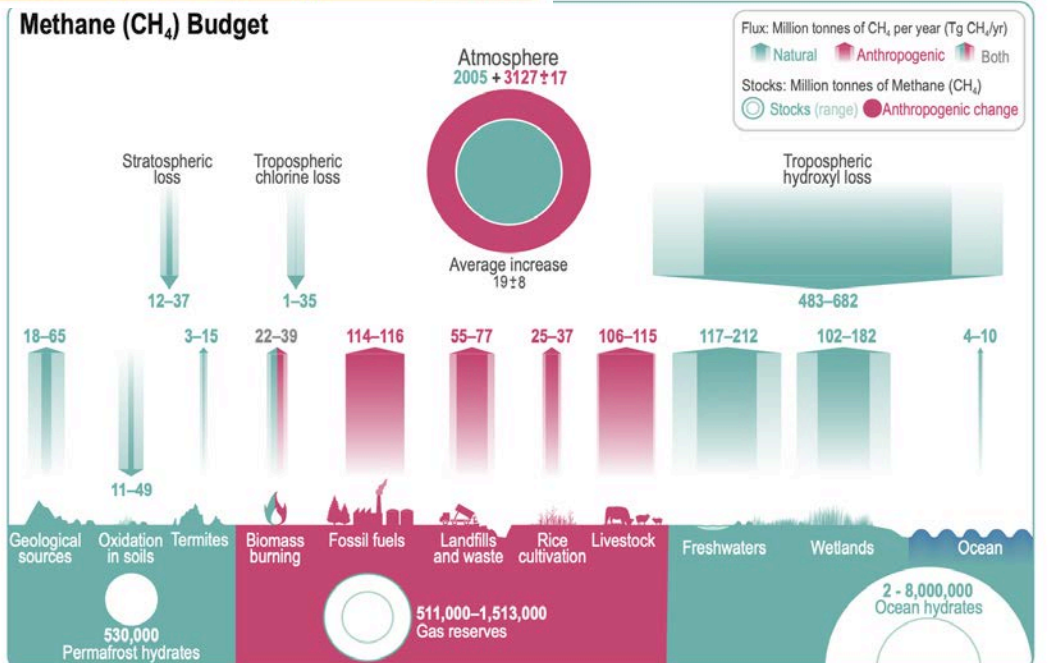
Summary for Policymakers



Carbon (CO₂) Budget



Methane (CH₄) Budget

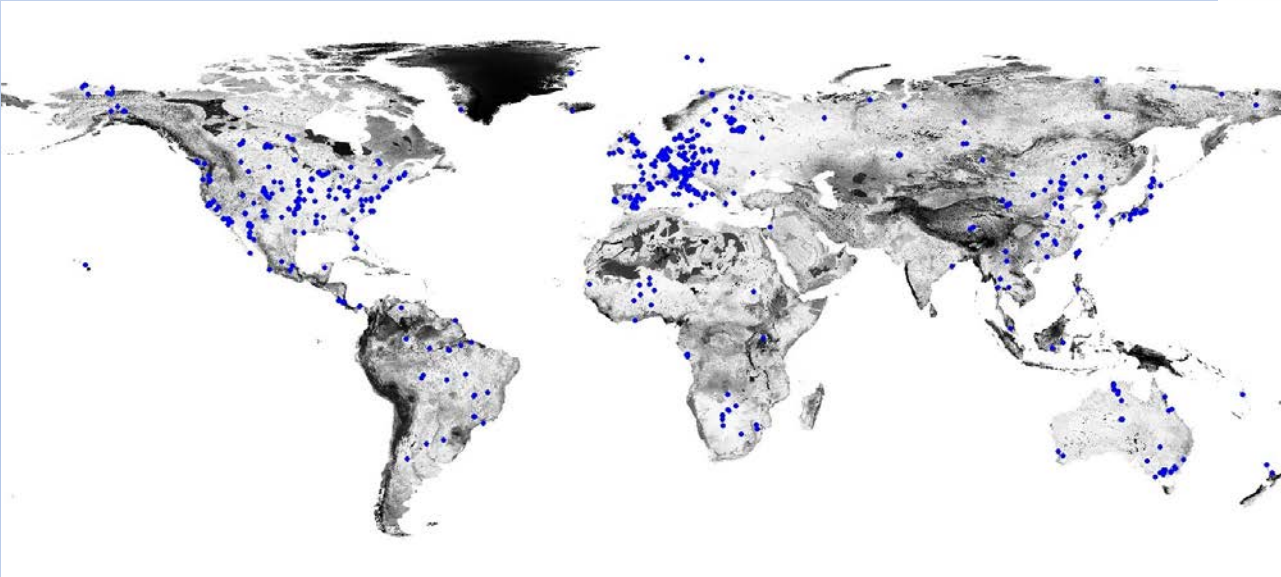


Components of Radiative Forcing

Component	RF (W m ⁻²)	ERF (W m ⁻²)
CO ₂	1.68 [1.50 to 1.86]	1.68 [1.33 to 2.03]
CH ₄	0.97 [0.80 to 1.14] (0.02; 0.07; 0.24; 0.64)	0.97 [0.74 to 1.20]
HaloCarbons	0.18 [0.03 to 0.33] (-0.15; 0.28; 0.06)	0.18 [0.01 to 0.35]
N ₂ O	0.17 [0.14 to 0.20]	0.17 [0.13 to 0.21]
HFCs-PFCs-SF ₆	0.03 [0.027 to 0.033]	0.03 [0.024 to 0.036]
CO	0.23 [0.18 to 0.29] (0.09; 0.07; 0.08)	0.23 [0.16 to 0.30]
NM VOC	0.10 [0.06 to 0.14] (0.03; 0.03; 0.04)	0.10 [0.05 to 0.15]
NO _x	-0.15 [-0.34 to 0.02] (-0.04; -0.25; 0.14)	-0.15 [-0.34 to 0.03]
NH ₃	-0.06 [-0.16 to -0.02] (-0.07; 0.01)	
SO ₂	-0.41 [-0.62 to -0.21]	
Black Carbon	0.64 [0.25 to 1.09] (0.40; 0.20; 0.04)	
Organic Carbon	-0.29 [-0.47 to -0.08] (-0.09; -0.20)	
Mineral Dust	-0.10 [-0.30 to 0.10]	
RFari Rapid Adjust.		-0.10 [-0.30 to 0.10]
Aerosol-Cloud		-0.45 [-1.20 to 0.00]
Aircraft	0.01 [0.005 to 0.03]	0.05 [0.02 to 0.15]
Land Use	-0.15 [-0.25 to -0.05]	
Solar Irradiance		

RF: Radiative Forcing (W m⁻²), ERF: Effective Radiative Forcing (W m⁻²)

Карбоновые полигоны



Всемирная сеть станций для мониторинга потоков парниковых газов (Fluxnet)

Карбоновый полигон - один или несколько участков земной поверхности с репрезентативными для данной территории рельефом, растительным и почвенным покровом, созданный для реализации мероприятий по сбору экспериментальных данных о потоках парниковых газов, а также по развитию технологий их контроля в природных экосистемах.



Важный элемент стратегии низкоуглеродного развития по адаптации экономики Российской Федерации к глобальному энергопереходу, сокращение выбросов парниковых газов и достижение углеродной нейтральности к 2060 году.

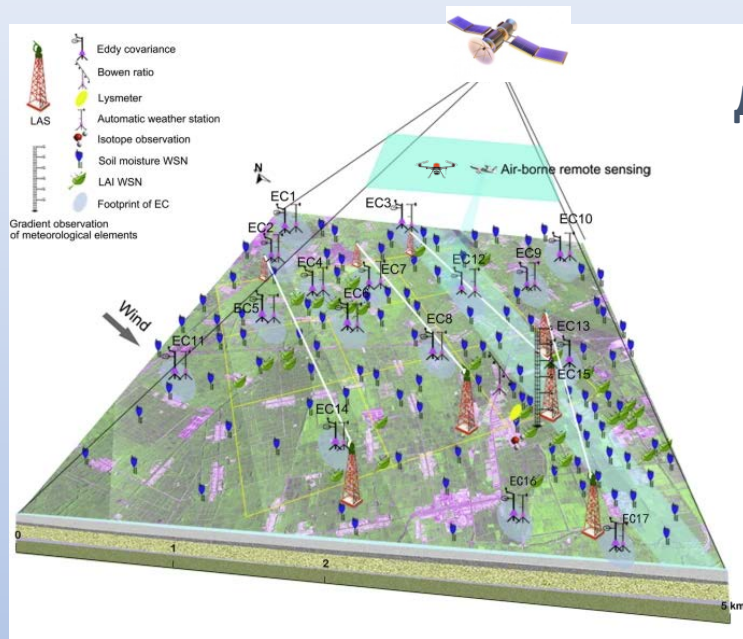
Основные мероприятия: внедрение в экономику низко- и безуглеродных технологий, поддержка технологий улавливания, использования и утилизации парниковых газов, **принятие мер по сохранению и увеличению поглощающей способности парниковых газов природными экосистемами, ...**

Основные задачи карбоновых полигонов:



- ✓ **Мониторинговые наблюдения за эмиссией и поглощением** газов посредством наземных и дистанционных методов измерений.
- ✓ **Отработка технологических решений контроля эмиссии и поглощения** парниковых газов, направленных на уменьшение их эмиссии и увеличения их поглощения природными экосистемами.
- ✓ **Разработку и адаптацию технологий дистанционного мониторинга** структуры и состояния растительного и почвенного покрова, агрохимического контроля почв, эмиссии и поглощения парниковых газов.
- ✓ **Развитие математических моделей** для описания эмиссии и поглощения парниковых газов в природных экосистемах.
- ✓ **Подготовка кадров высшей квалификации** в области новейших методов экологического контроля, перспективных технологий для низкоуглеродного развития.

Комплексное развитие сети наземного и спутникового мониторинга потоков парниковых газов



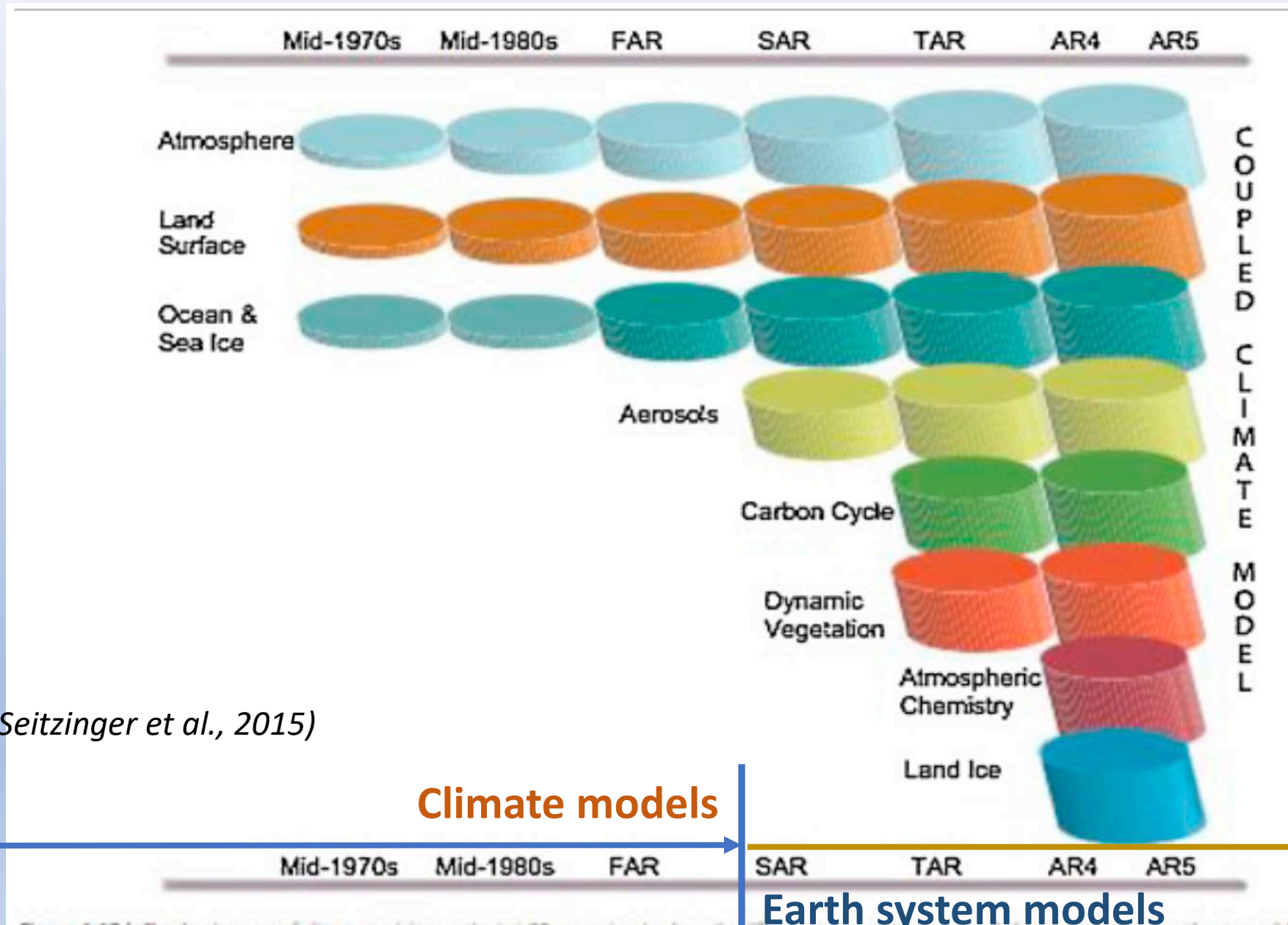
Дистанционное зондирование

Аэрологическое зондирование
(БПЛА)

Наземная сеть наблюдений за потоками парниковых газов (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , и др.); запасами углерода, изотопным составом воздуха, почвы, растений, и др.

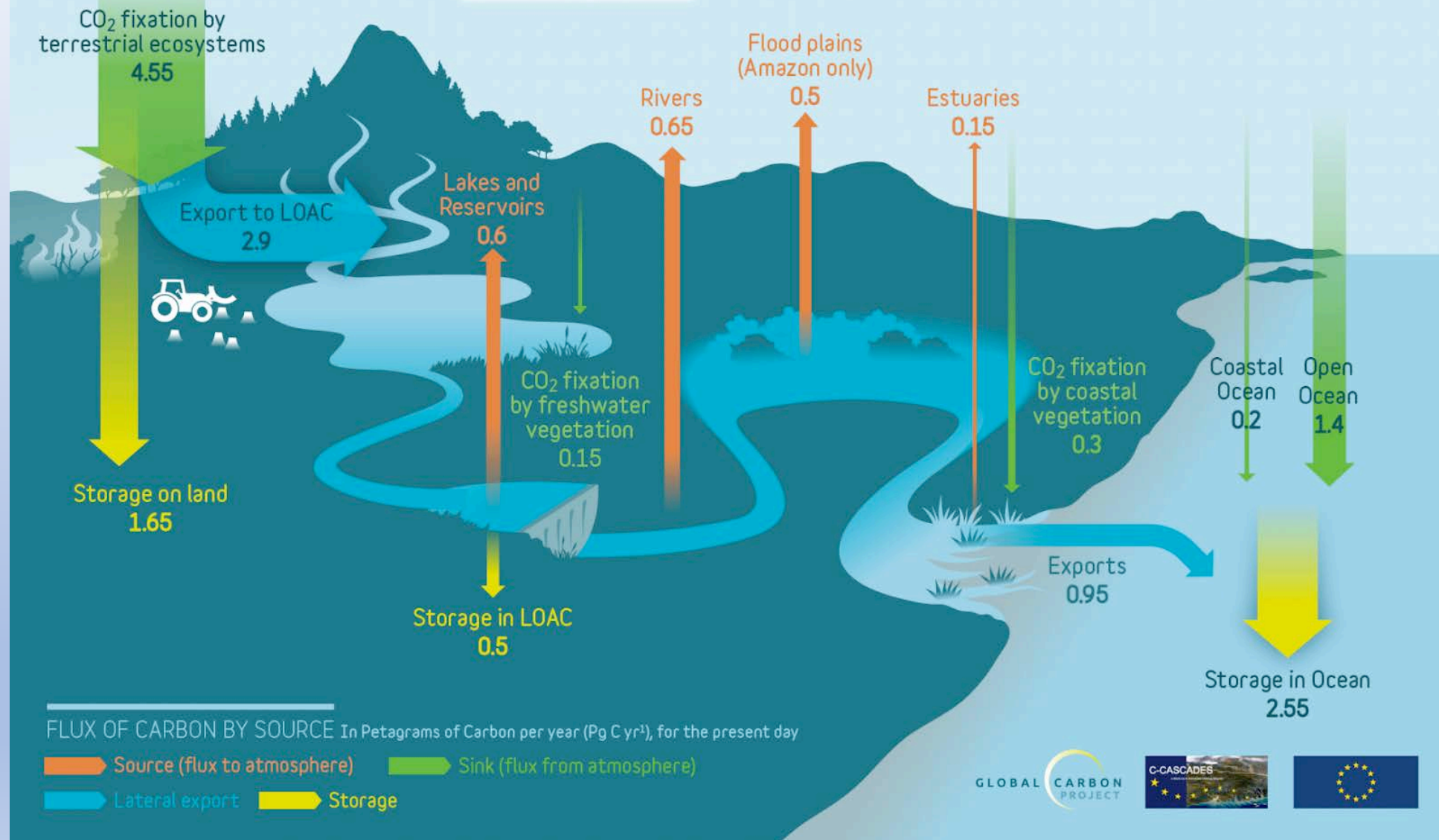


Развитие климатических моделей (1970s-2020s)



(Seitzinger et al., 2015)

GLOBAL CARBON BUDGET OF THE LAND TO OCEAN AQUATIC CONTINUUM (LOAC)



Роль болот в земной климатической системе

Углеродный цикл: естественный источник CH_4 , поглотитель CO_2 (и C)

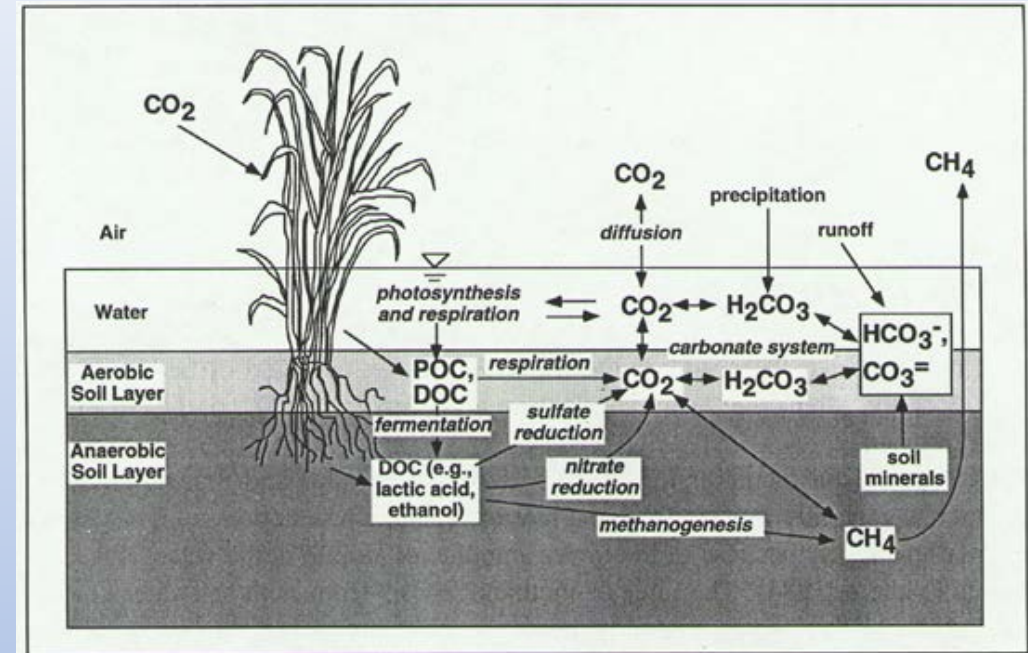
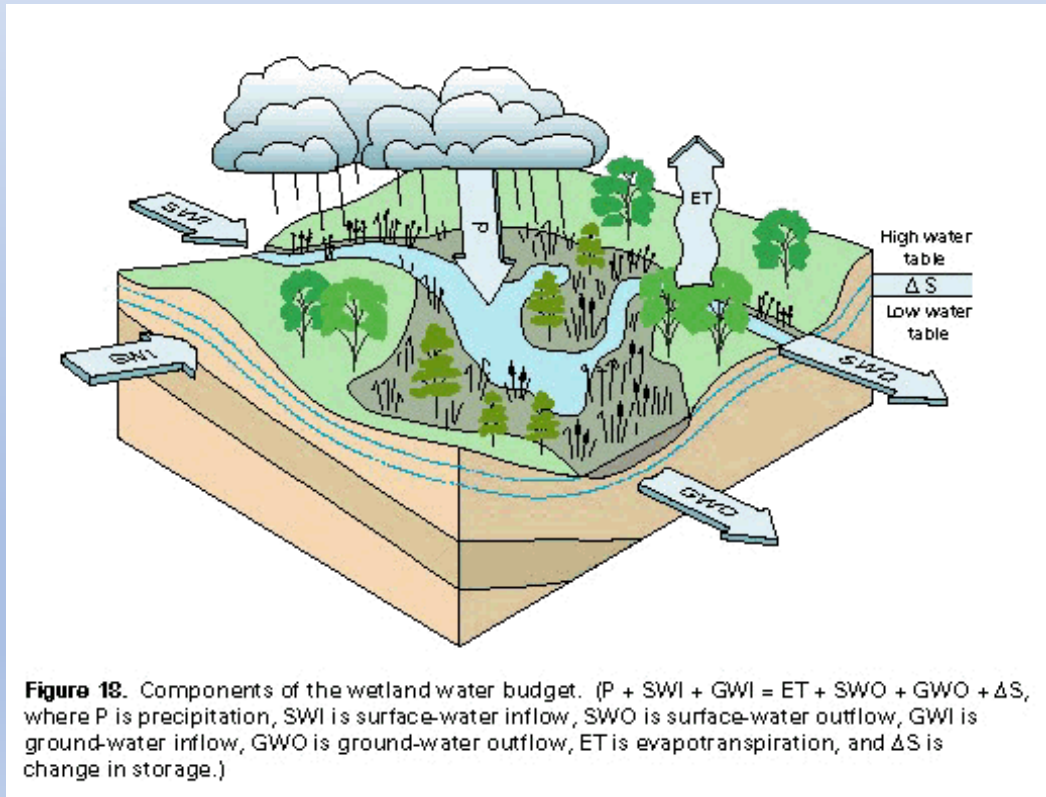
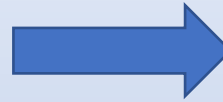


Figure 5-10. Carbon transformations in wetlands. POC indicates particulate organic carbon; DOC indicates dissolved organic carbon.



Гидрологический цикл: регулируют испарение, поверхностный и подземный сток

Пресноводные экосистемы в карбоновом цикле

(Tranvik et al. 2009)

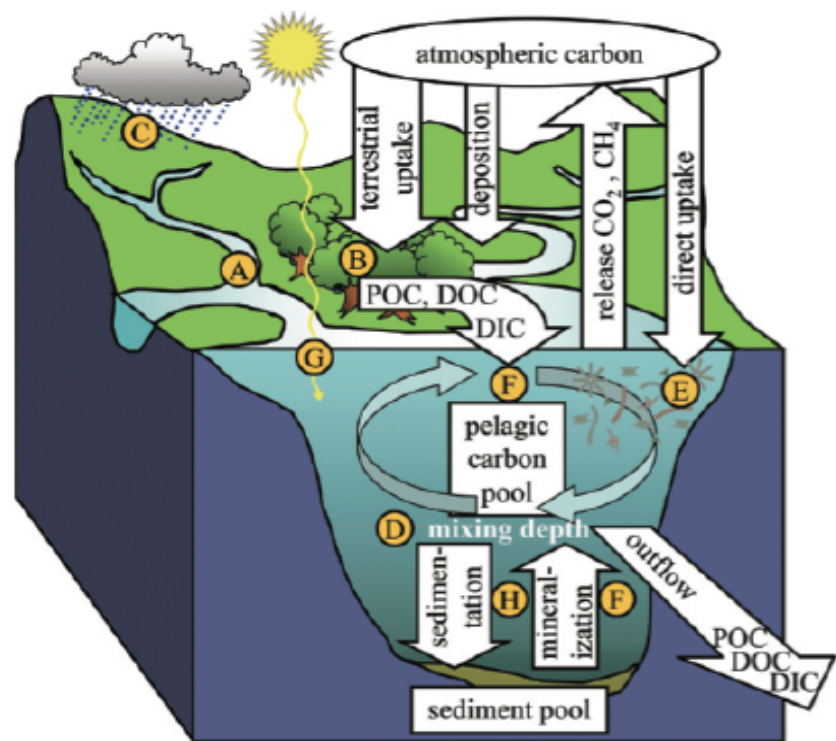


Схема углеродного цикла в пресноводных экосистемах

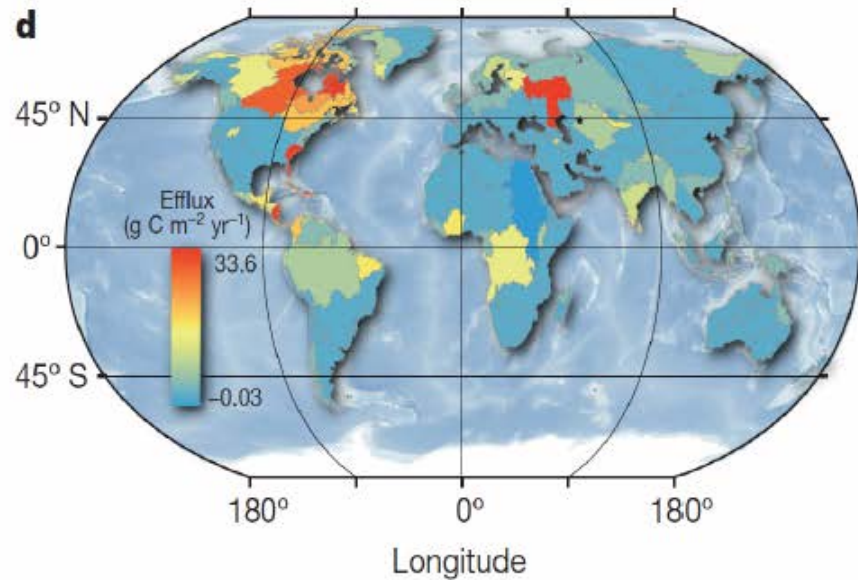
(Bastviken et al. 2011)

Latitude	Fluxes												Area (km ²)
	Total open water			Ebullition			Diffusive			Stored			
	Emiss.	n	CV	Emiss.	n	CV	Emiss.	n	CV	Emiss.	n	CV	
<i>Lakes</i>													
>66°	6.8	17	72	6.4	17	74	0.7	60	37				288,318
>54°–66°	6.6	5	155	9.1	9	60	1.1	271	185	0.1	217	2649	1,533,084
25°–54°	31.6	15	127	15.8	15	177	4.8	33	277	3.7	36	125	1,330,264
<24°	26.6	29	51	22.2	28	54	3.1	29	97	21.3	1		585,536*
<i>Reservoirs</i>													
>66°	0.2 [†]												35,289
>54°–66°	1.0	24	176	1.8	2	140	0.2	4	93				161,352
25°–54°	0.7 [‡]												116,922
<24°	18.1	11	87										186,437
<i>Rivers</i>													
>66°	0.1	1											38,895
>54°–66°	0.2 [†]												80,009
25°–54°	0.3	20	302										61,867
<24°	0.9 [‡]												176,856
Sum open water	93.1	116		55.3	71		9.9	397		25.1	254		
Plant flux	10.2												
Sum all	103.3												

- Общая эмиссия метана из пресноводных экосистем составляет 50% эмиссии от болот (IPCC, 2022)
- Вклад в парниковый эффект метана и углекислого газа, выделяемого пресноводными источниками, примерно одинаков

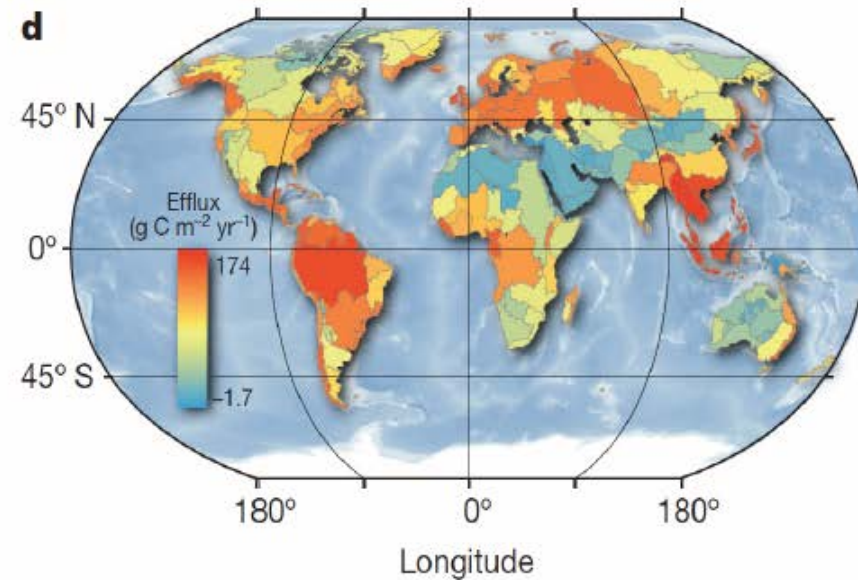
Эмиссия углекислого газа водоемами и водотоками

Raymond et al., 2013, Nature



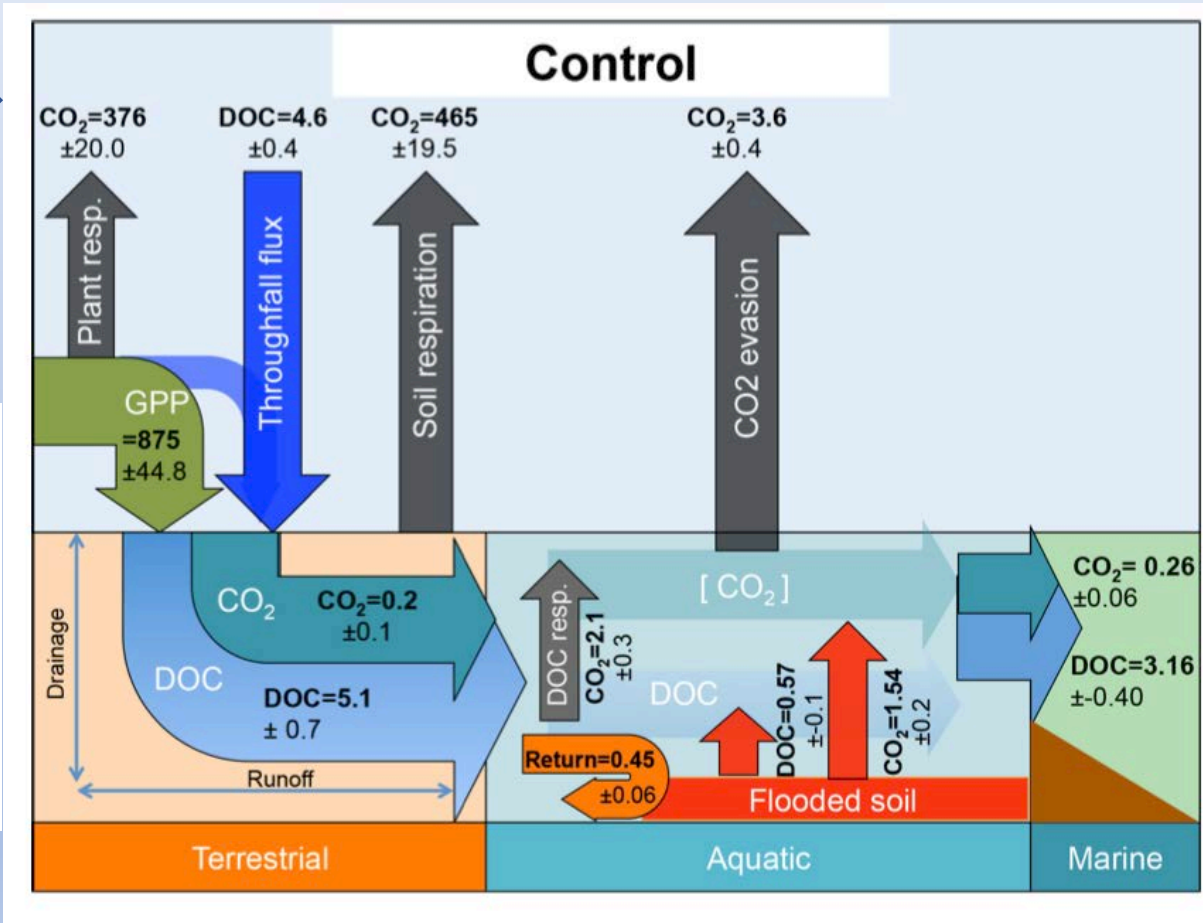
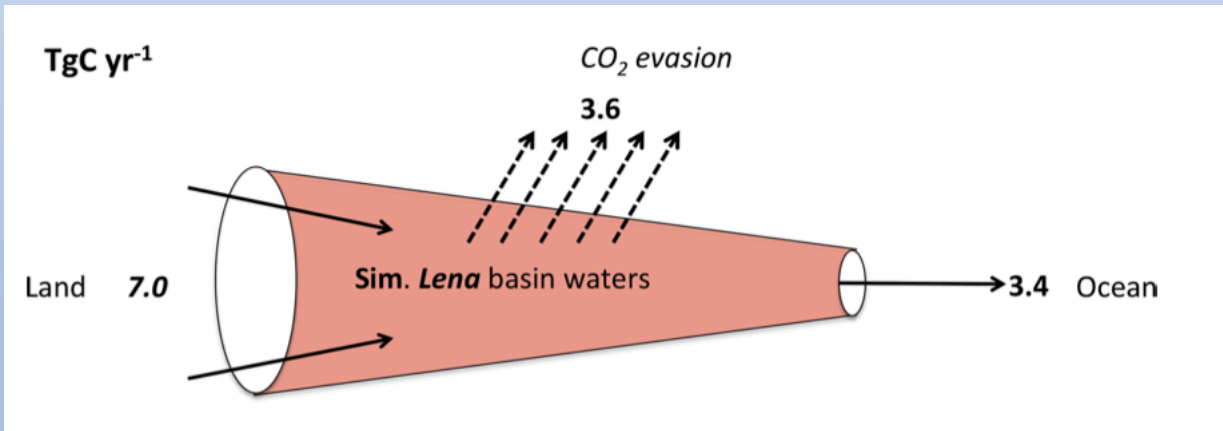
Водоемы

- глобальная эмиссия CO_2 водами суши составляют 2.1 Пг С год⁻¹
- эмиссия водоемами 0.3 Пг С год⁻¹, реками – 1.8 Пг С год⁻¹

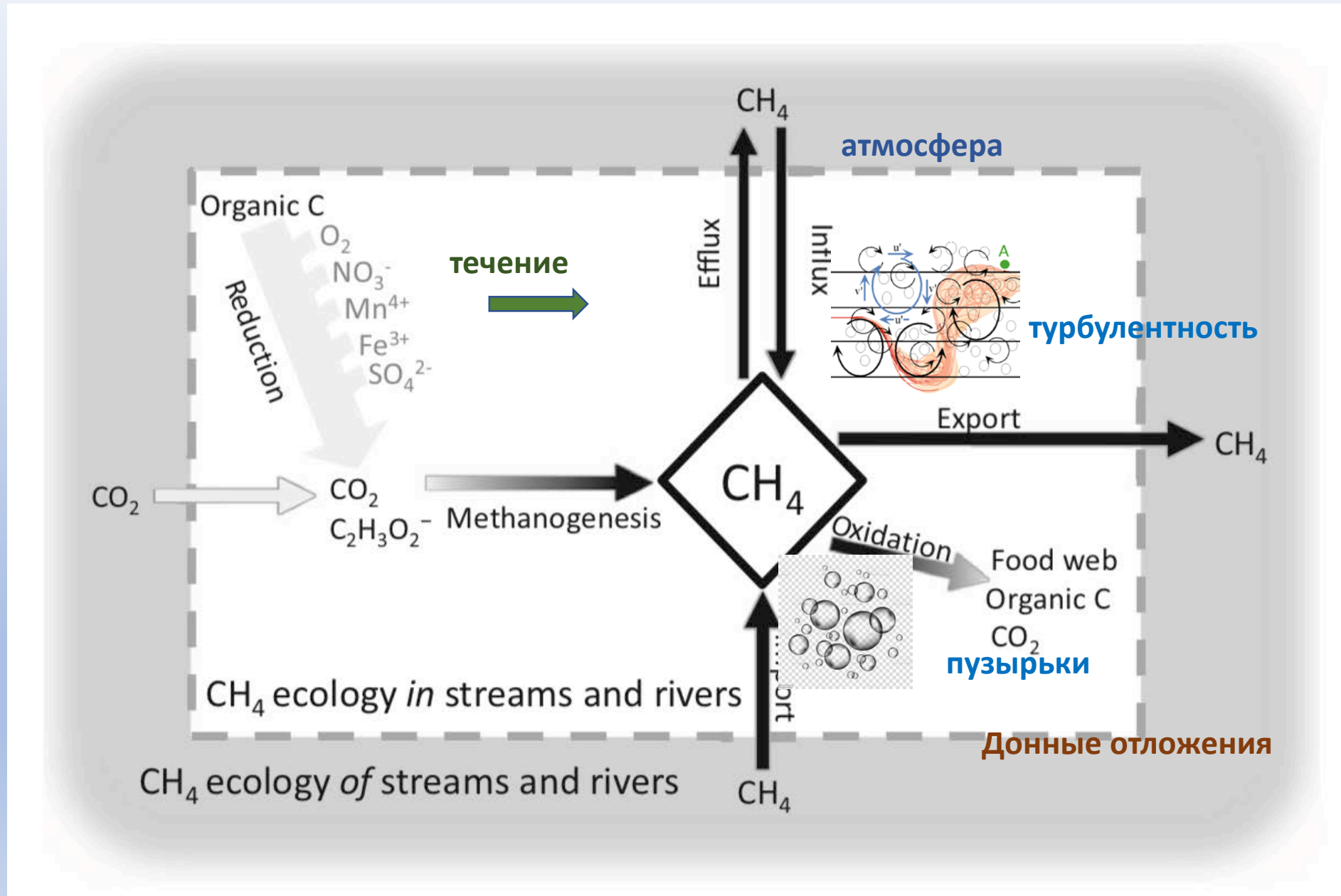


Водотоки

Углеродный баланс р. Лена по данным модели ORCHIDEE MIST-LEAK

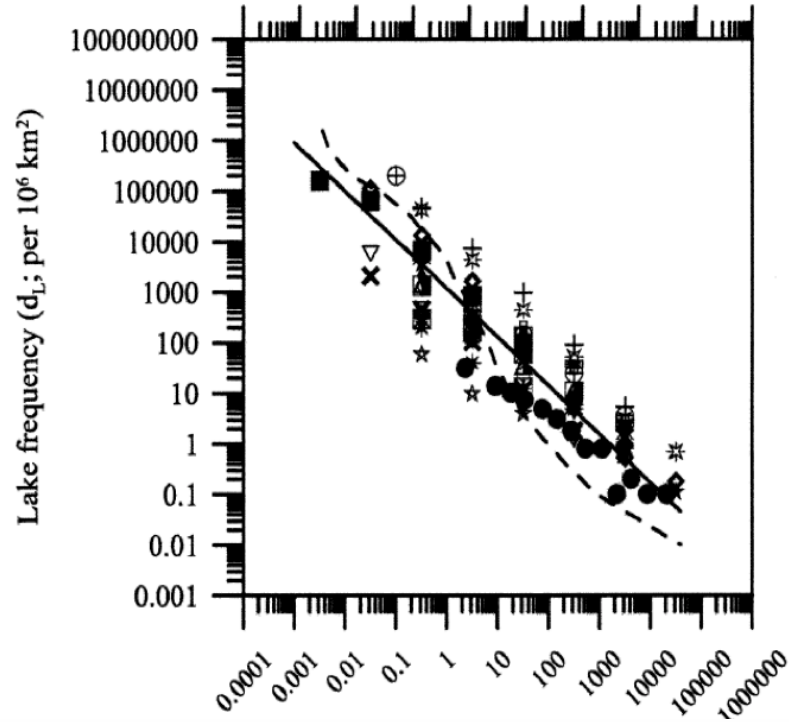


Биогеохимия и перенос метана в реках



Stanley et al.,
*Ecological
Monographs*,
2016

Распределение озёр по размерам (Downing et al., 2006)

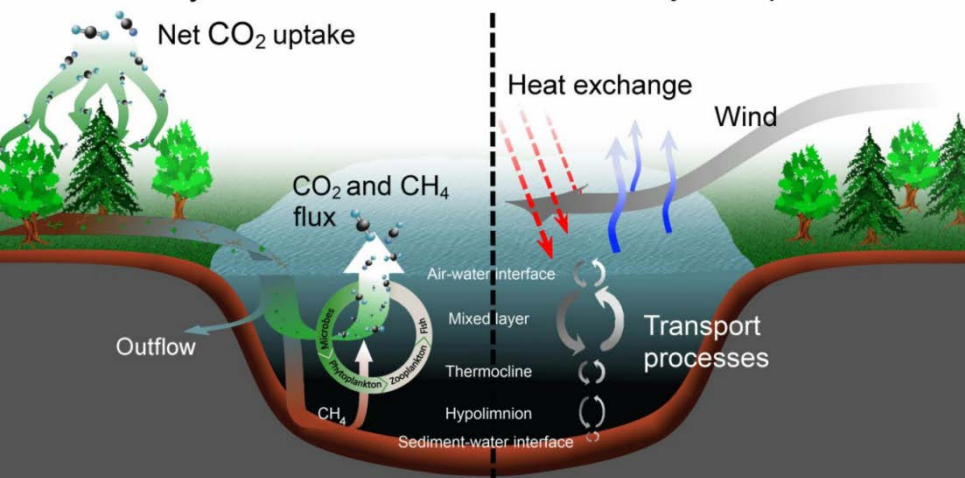


Площадь озёр разных размеров (Downing et al., 2006)

Площадь озера, км ²	Суммарная площадь, км ²
0.001 – 0.01	692,600
0.01 – 0.1	602,100
0.1 – 1	523,400
1 – 10	455,100
0.001 – 10	2,273,200
...	...
Все озёра	4,200,000

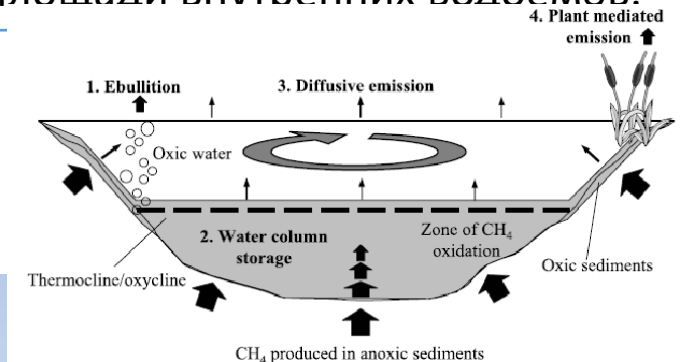
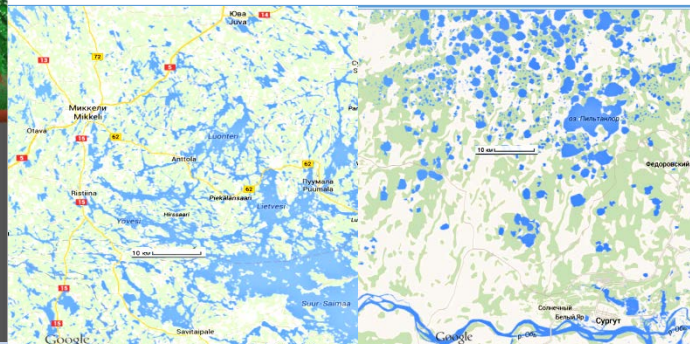
Озера

Carbon cycle

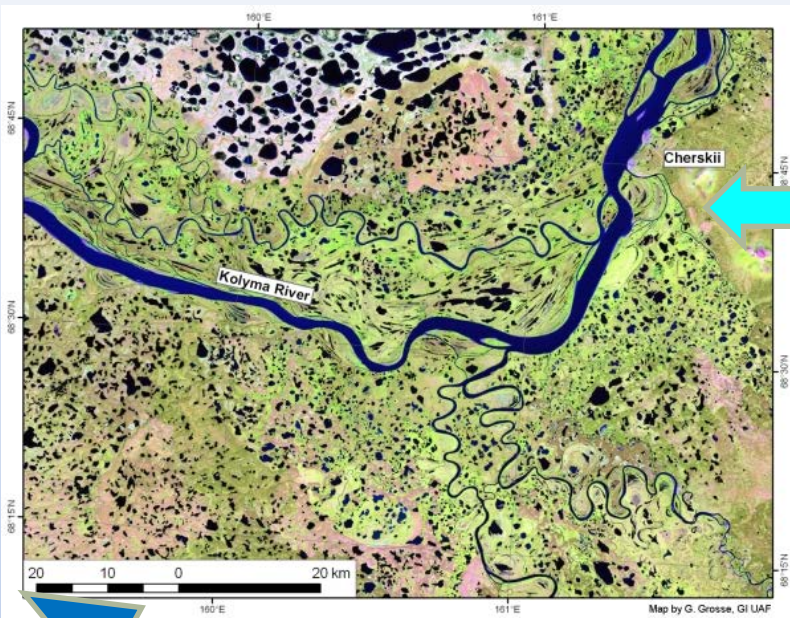


Physical processes

Общее количество озёр площадью менее 10 км² составляет 99,9% от количества внутренних водоемов на поверхности Земли, а их общая территория составляет 54% от общей площади внутренних водоемов.



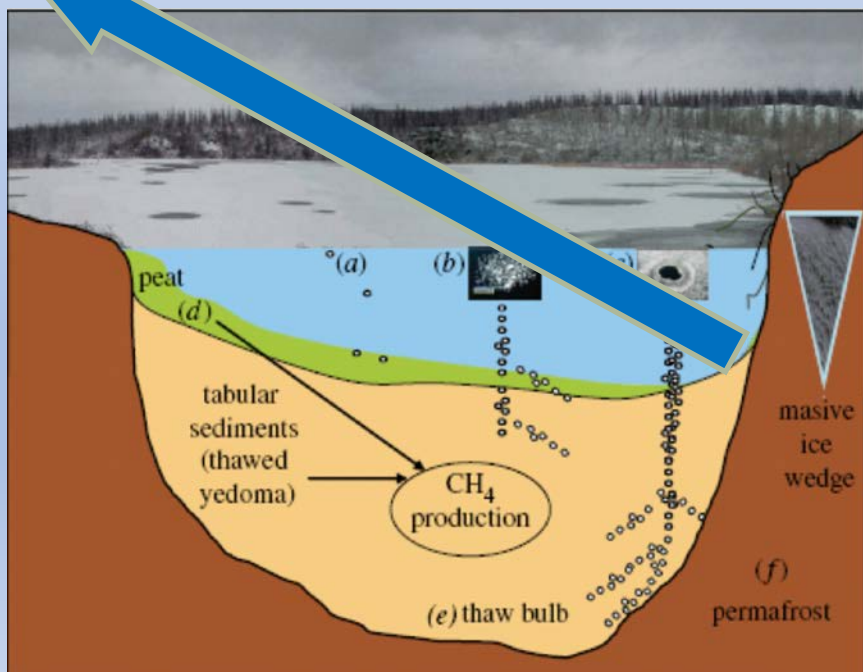
Эмиссия метана термокарстовыми озерами



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

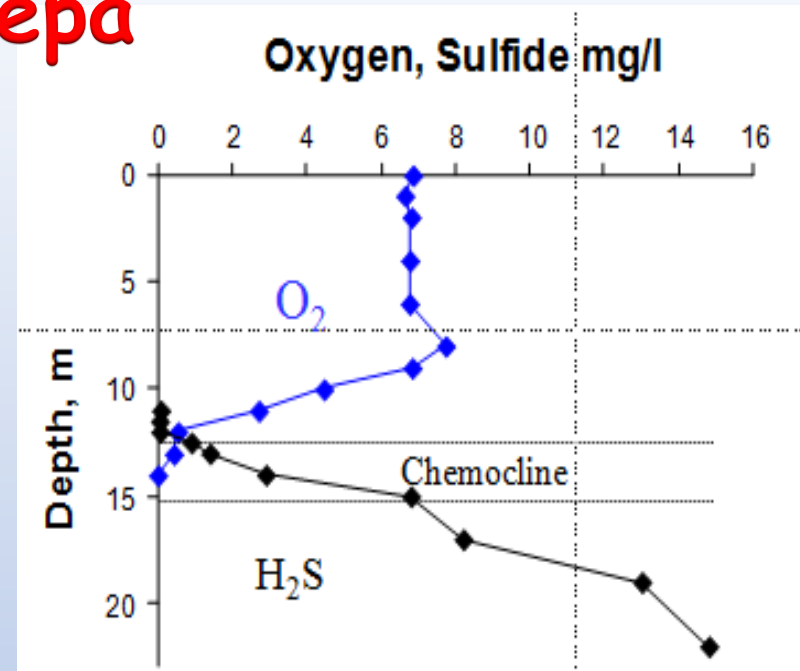
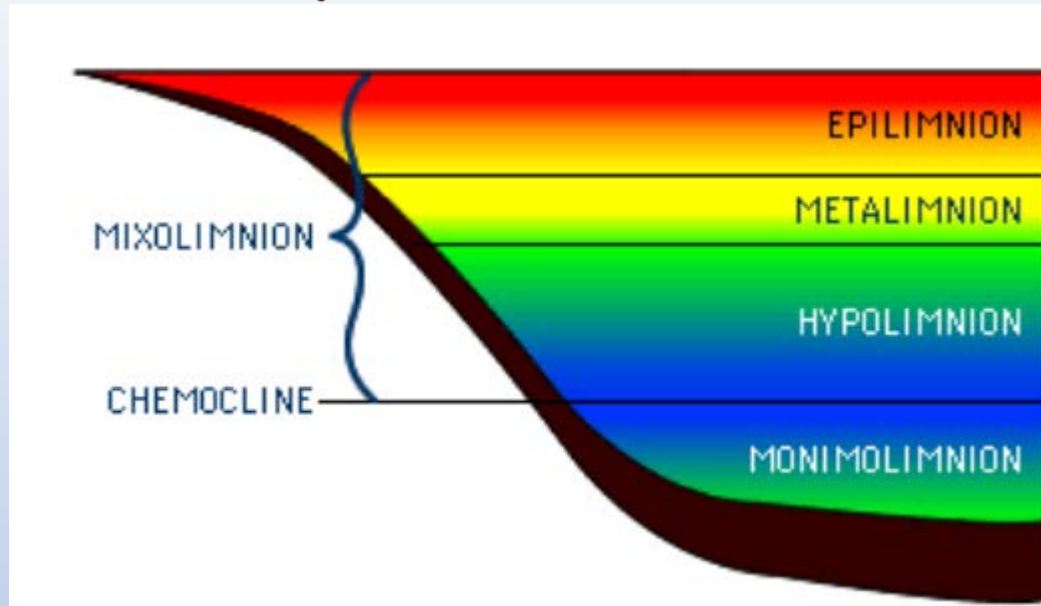


Интенсивный источник ("hotspot") – может быть источником значительную часть зимы



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

Меромиктические озера

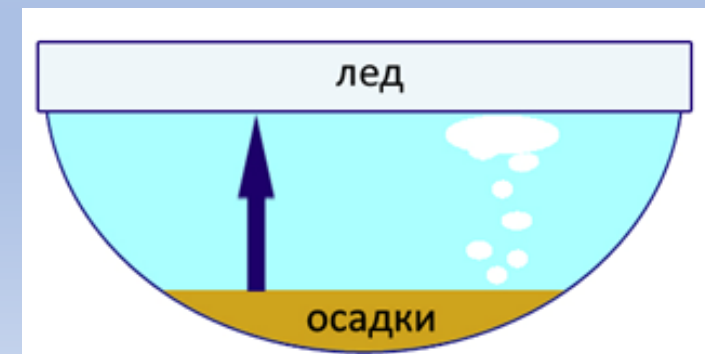


В монимолимнионе нет кислорода и накапливается сероводород. Многие из этих озер являются солеными, а в придонных слоях присутствует сульфатсодержащая вода.

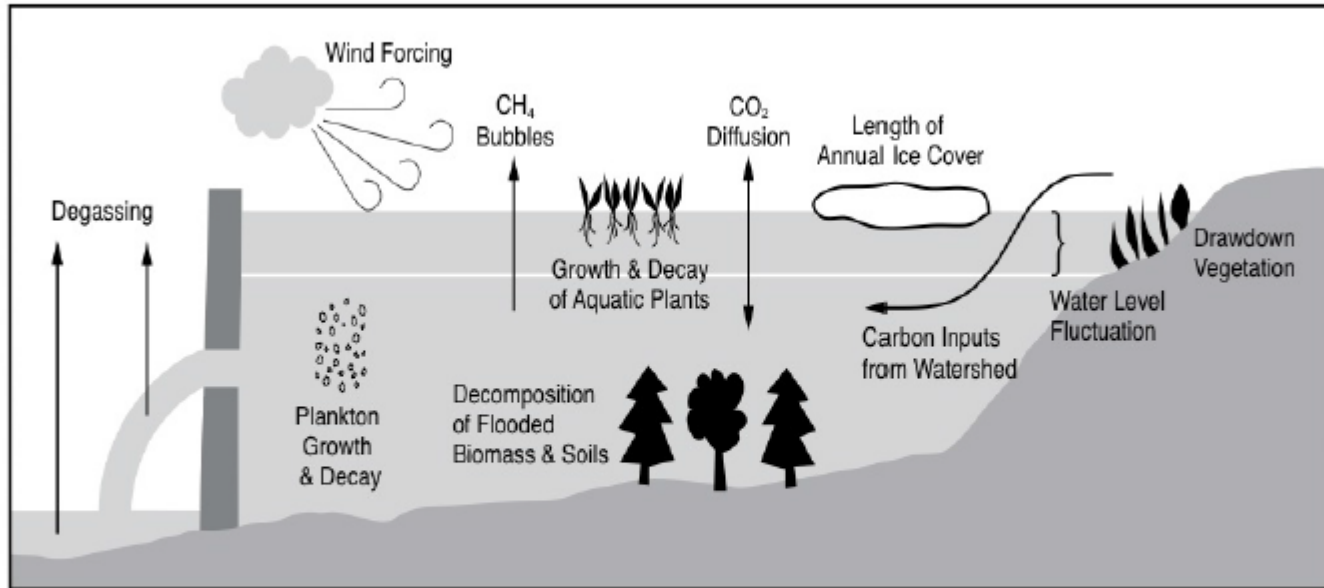
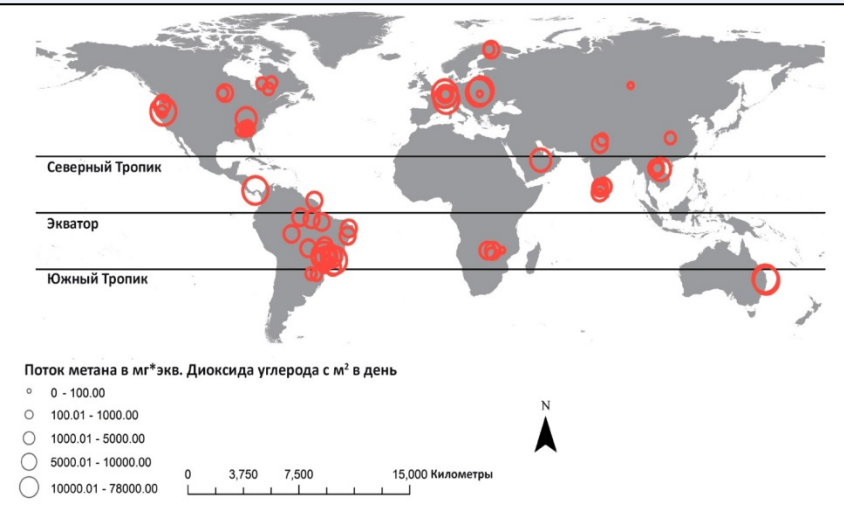
Органический углерод также концентрируется в придонном слое, и сильная стратификация препятствует его выносу на поверхность. Глубокие бескислородные воды содержат высокие концентрации метана, но, в отличие от других водных систем, метан практически не выходит из озера путем диффузии. Метан потребляется в основном в кислородно-бескислородной переходной зоне.

глубина, м	CH ₄ , мсmol/l
0.5	40.02
1	0.83
3	187.44
5	499.58
7	1534.08
7	1649.40
8	1700.31

Трехцветное	0.5 m	10-50
	7 m	1000-1800



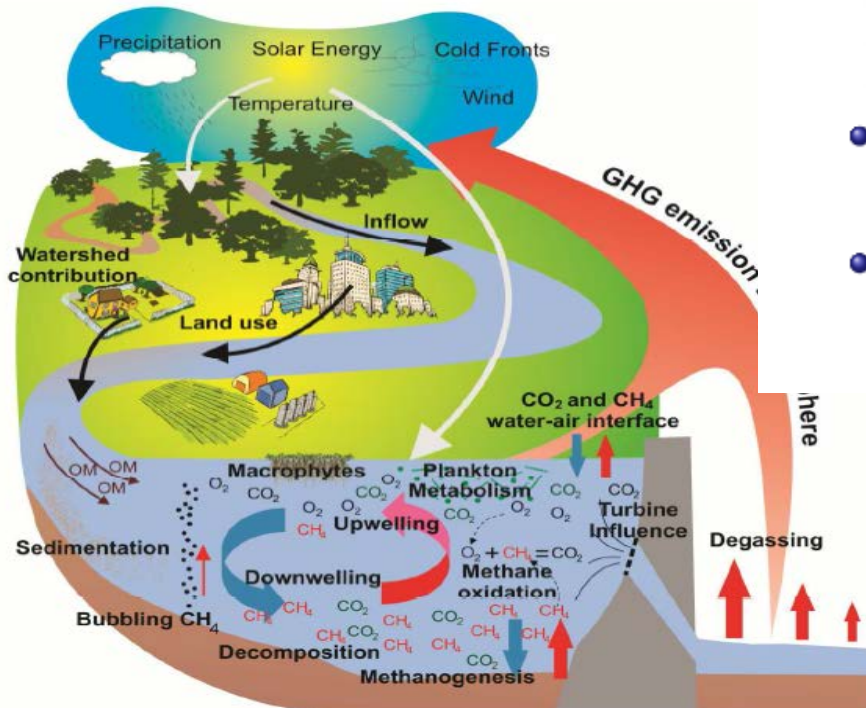
Эмиссия парниковых газов из водохранилищ



- Затопленные экосистемы подвергаются длительному разложению в преимущественно анаэробных условиях
- В отличие от естественных водоемов, имеется дополнительный путь для эмиссии метана в атмосферу – через турбины

Mendonça et al, 2012

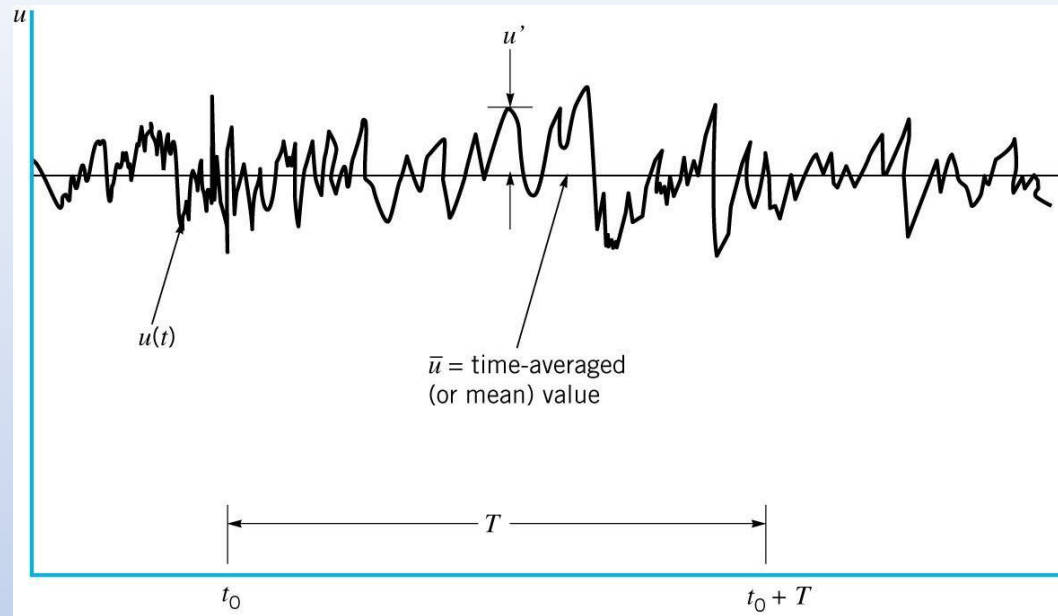
Водоохранилища гидроэлектростанций нашей страны ежегодно выбрасывают 4,65 млн тонн парниковых газов, в том числе 3,52 млн тонн метана и 1,13 млн тонн CO₂. При этом в донных отложениях ежегодно захоранивается 5,21 млн тонн парниковых газов.



Методы определения эмиссий парниковых газов



Eddy Covariance (пульсационный метод)



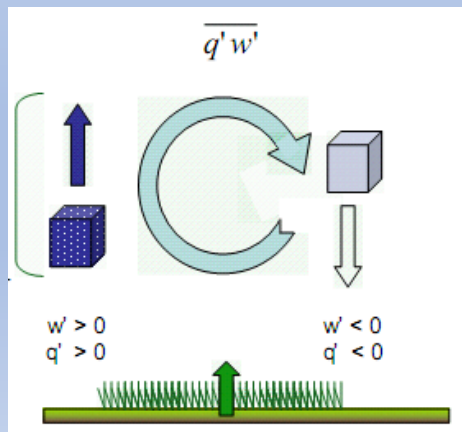
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(x, y, z, t) dt$$

$$u = \bar{u} + u'$$

Средние величины

Пульсации

Представление Рейнольдса: описание турбулентного течения как композиции средней и пульсационной составляющих



$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \bar{w})(x_k - \bar{x})]$$

Ковариация между отклонениями (пульсациями) температуры, влажности, скорости ветра, концентрации вещества и вертикальной скорости ветра определяют потоки тепла, влаги, количества движения и вещества.

Пульсационный метод определения турбулентных потоков

Измеряемые величины
 q, c, T, U, V, W
 10-20 Hz

$$s' = s - \bar{s}$$

$$\tau = -\rho_0 [\mathbf{i}\overline{u'w'} + \mathbf{j}\overline{v'w'}] = \rho_0 u_*^2 \quad \text{- ПОТОК ИМПУЛЬСА}$$

$$H = c_p \rho_0 \overline{w'T'} \quad \text{- Поток тепла}$$

$$L_E = \rho_0 \overline{w'q'} L_s \quad \text{- Поток скрытого тепла}$$

$$F = \overline{w'c'} \quad \text{- Поток газа}$$



$$\tau = \rho C_D u_z^2$$

$$H = \rho c_p C_H u_z (T_0 - T_z)$$

$$L_E = L_s C_E u_z (q_0 - q_z)$$

$$C_D = \left(\frac{u_*}{u_z} \right)^2 \quad \text{- Коэффициент сопр.}$$

$$C_H = \frac{\overline{w'T'}}{u_z (T_0 - T_z)} \quad \text{- Число Стентона}$$

$$C_E = \frac{\overline{w'q'}}{u_z (q_0 - q_z)} \quad \text{- Число Дальтона}$$

Параметр шероховатости

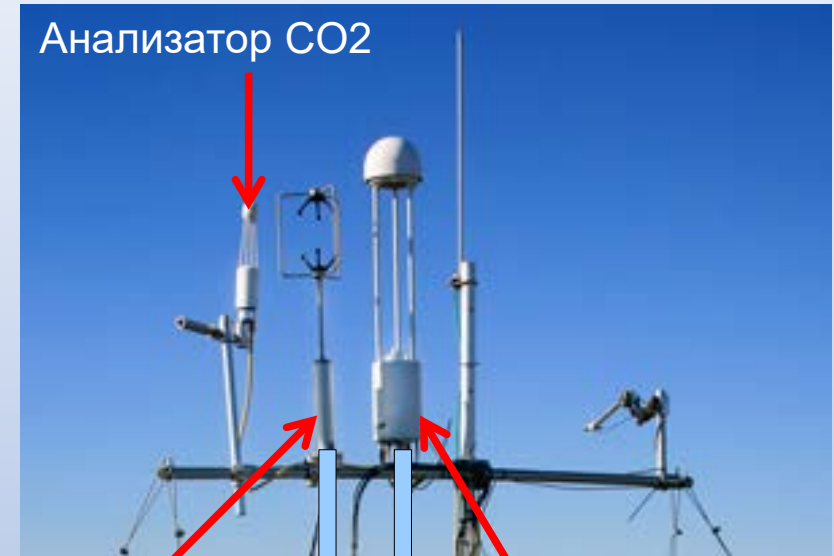
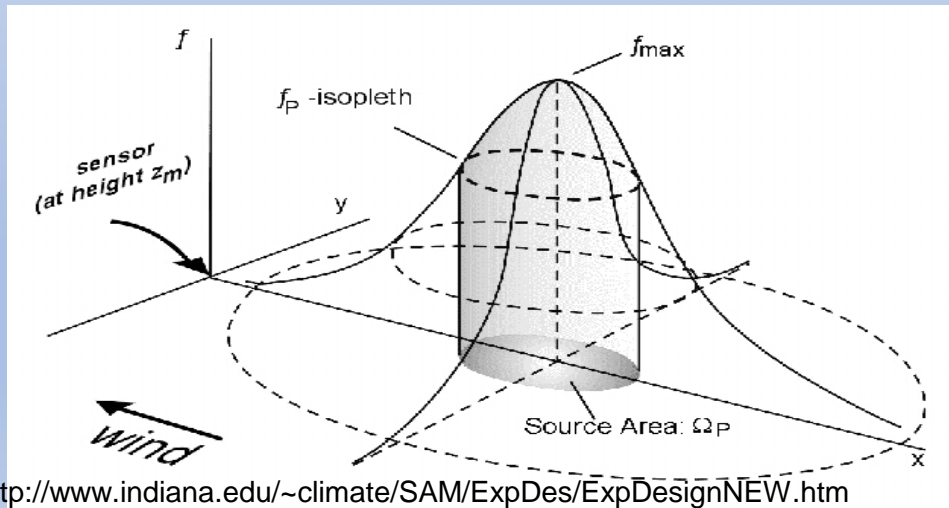
$$z_0 = z \exp\left(-\frac{\kappa}{\sqrt{C_{Dn}}}\right)$$

Масштаб Монина-Обухова

$$L = -\frac{u_*^3 \rho c_p}{\kappa \beta H} \quad \beta = \frac{g}{T}$$

Метод прямых 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»**



Программные пакеты для расчета потоков по пульсационному методу

- EDIRE (University of Edinburgh, UK)
- ALTEDDY (Alterra)
- ECPack (University of Wageningen)
- TK3 (University of Bayreuth, Germany)
- EddySoft (Max-Planck-Institute Jena, Germany)
- Eth-flux (Technical University Zürich, Swiss)
- ECO2S* (IMECC-EU Univ. of Tuscia, Italy)
- EddyPro* (www.Licor.com)
- EddyUH* (University of Helsinki, Finland)

* = open source

Теория подобия Монина-Обухова



Турбулентный режим на всех участках спектра, кроме интервала диссипации, полностью определяется тремя размерными параметрами:

$$u_* = \left(-\overline{u'w'}\right)^{1/2} \quad \frac{Q}{c_p \rho} = \overline{w'T'} \quad \frac{g}{T_0}$$

$$L = -\frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{T_0} \frac{Q}{c_p \rho}} \quad V = \frac{u_*}{\kappa} \quad T_* = -\frac{1}{\kappa u_*} \frac{Q}{c_p \rho}$$

$$\zeta = z/L$$

$$\left(\frac{z}{T_*}\right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \left(\frac{z}{u_*}\right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}, q(z) = f(\zeta)$$

$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{\kappa z} \phi\left(\frac{z}{L}\right)$$

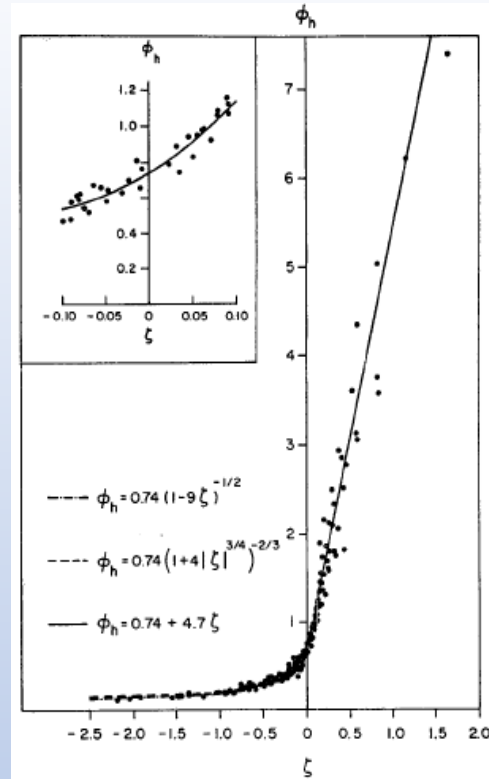
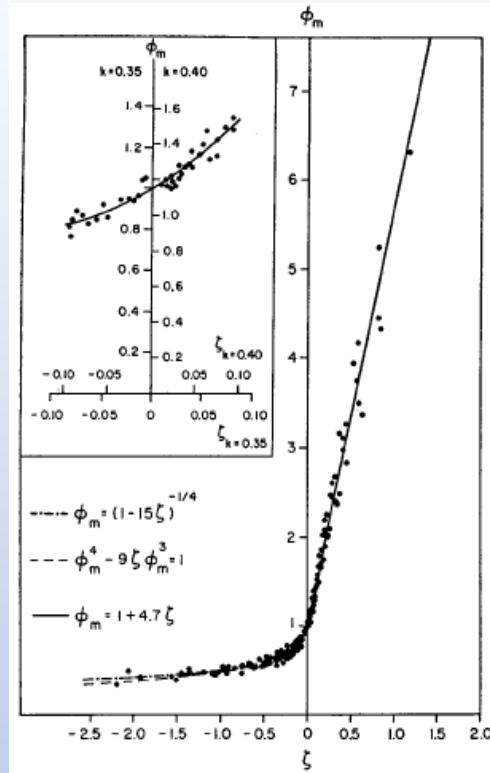
$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0u}}\right) - \Psi_u\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_u\left(\frac{z_{0u}}{L}\right) \right]$$

$$T - T_s = \frac{T_*}{\kappa_T} \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0T}}\right) - \Psi_T\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_T\left(\frac{z_{0T}}{L}\right) \right]$$

$$H \equiv \rho c_p u_* T_* \quad \tau \equiv \rho u_*^2$$

z_{0u} Параметр аэродинамической шероховатости

z_{0T} Параметр термической шероховатости



$$\phi_m(z/L) = (1 - 19.3z/L)^{-1/4}, \quad -2 < z/L < 0,$$

$$\phi_m(z/L) = 1 + 6z/L, \quad 0 < z/L < 1,$$

$$\phi_H(z/L) = 0.95 (1 - 11.6z/L)^{-1/2}, \quad -2 < z/L < 0,$$

$$\phi_H(z/L) = 0.95 + 7.8z/L, \quad 0 < z/L < 1.$$

Параметры аэродинамической и термической шероховатости

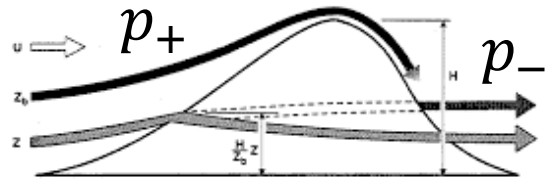


Figure 1. Schematic representation of the low-level flow behaviour parametrized in the new scheme (see text for details).

- Аэродинамическая шероховатость обычно задается как константа для каждого типа поверхности

- Термическая шероховатость обычно рассчитывается независимо от типа поверхности

$$\ln \left(\frac{z_0}{z_0 \theta} \right) = \begin{cases} -2.43, & \text{Re}_{z_0} \leq 0.111, \\ 0.83 \ln(\text{Re}) - 0.6, & 0.111 < \text{Re}_{z_0} \leq 16.3, \\ 0.49 \text{Re}_{z_0}^{0.45}, & \text{Re}_{z_0} > 16.3, \end{cases}$$

Где число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{z_0} = \frac{u_* z_0}{\nu} \quad (1)$$

- Для водной поверхности:

$$\frac{1}{\kappa T} \ln \left(\frac{z_0}{z_0 \theta} \right) = \begin{cases} -2, & \text{Re}_{z_0} \leq 0.1, \\ 4.0 \text{Re}_{z_0}^{1/2} - 4.2, & \text{Re}_{z_0} \geq 0.1 \end{cases}$$

- Поток импульса через шероховатую поверхность обусловлен перепадом давления и касательным напряжением.
- Тепловой поток обусловлен проводимостью (аналог тангенциального напряжения)

Термическая шероховатость

(Varentsov et al., BLM)

Измерения:

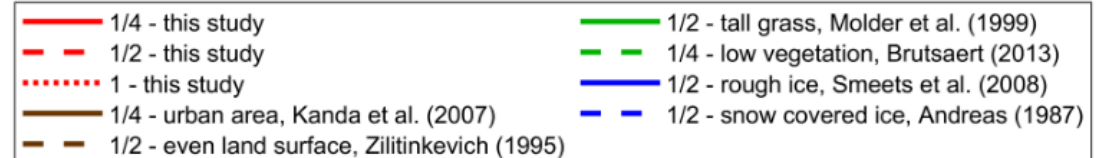
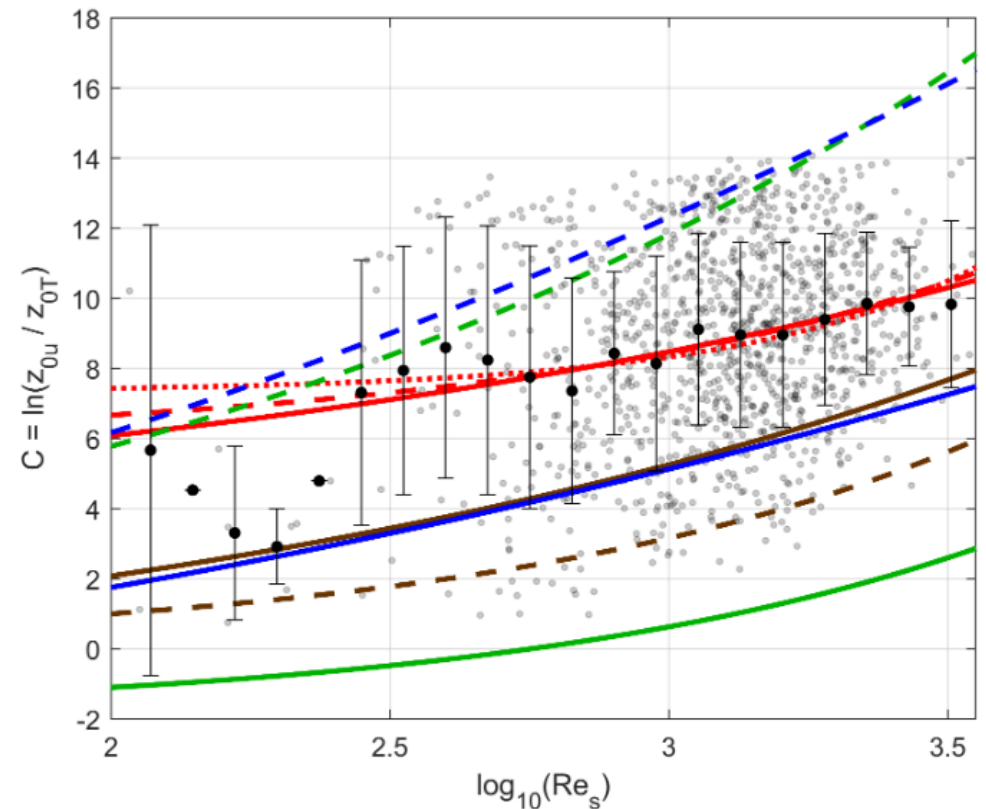
- Турбулентные потоки
- Скорость ветра
- температура



Из теории подобия МО:

$$z_{0u} = z \exp \left(-\frac{ku(z)}{u_*} + \Phi \left(\frac{z}{L} \right) - \Phi \left(\frac{z_{0u}}{L} \right) \right),$$

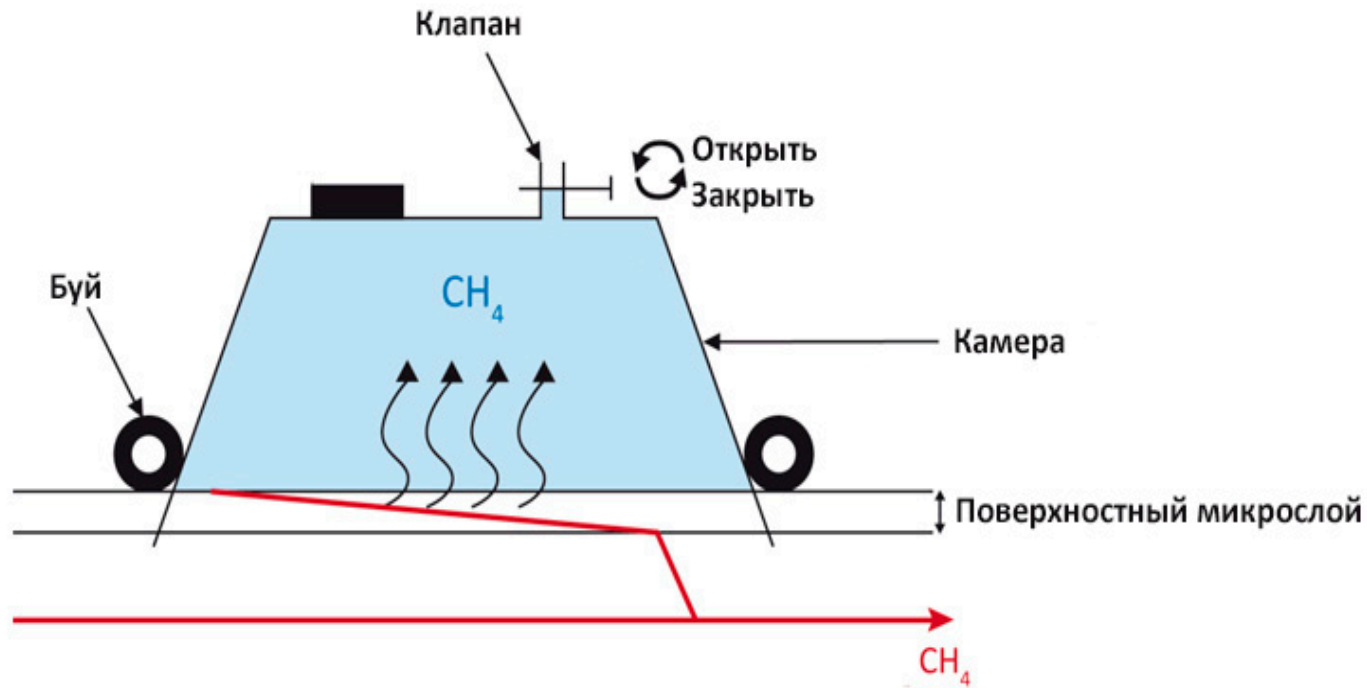
$$z_{0T} = z \exp \left(-\frac{k_T (\theta(z) - \theta_s)}{\theta_*} + \Phi_\theta \left(\frac{z}{L} \right) - \Phi_\theta \left(\frac{z_{0T}}{L} \right) \right)$$



- ❖ Рельеф местности плоский и подстилающая поверхность достаточно однородна, так что поля скорости ветра и температуры однородны по горизонтали
- ❖ Никаких резких изменений погоды не происходит, и в течение интервалов времени, в которых естественный суточный ход погоды мало заметен, поля скорости ветра и температуры статистически стационарны.



Камерный метод (метод закрытых камер)



$$F_{\text{CH}_4} = (C_{t_2} - C_{t_1}) * W / F(t_2 - t_1)$$



Изменение концентрации метана в камере со временем

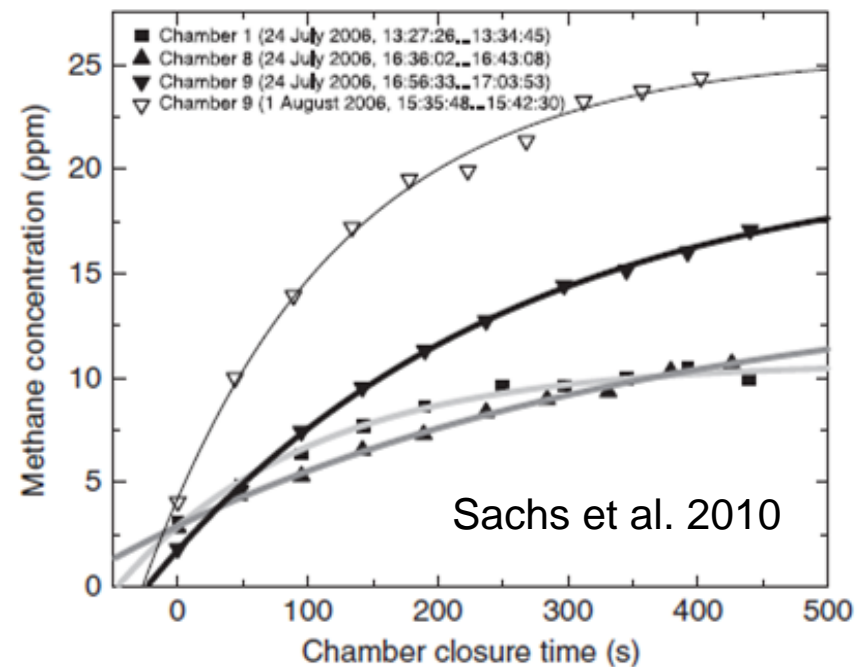
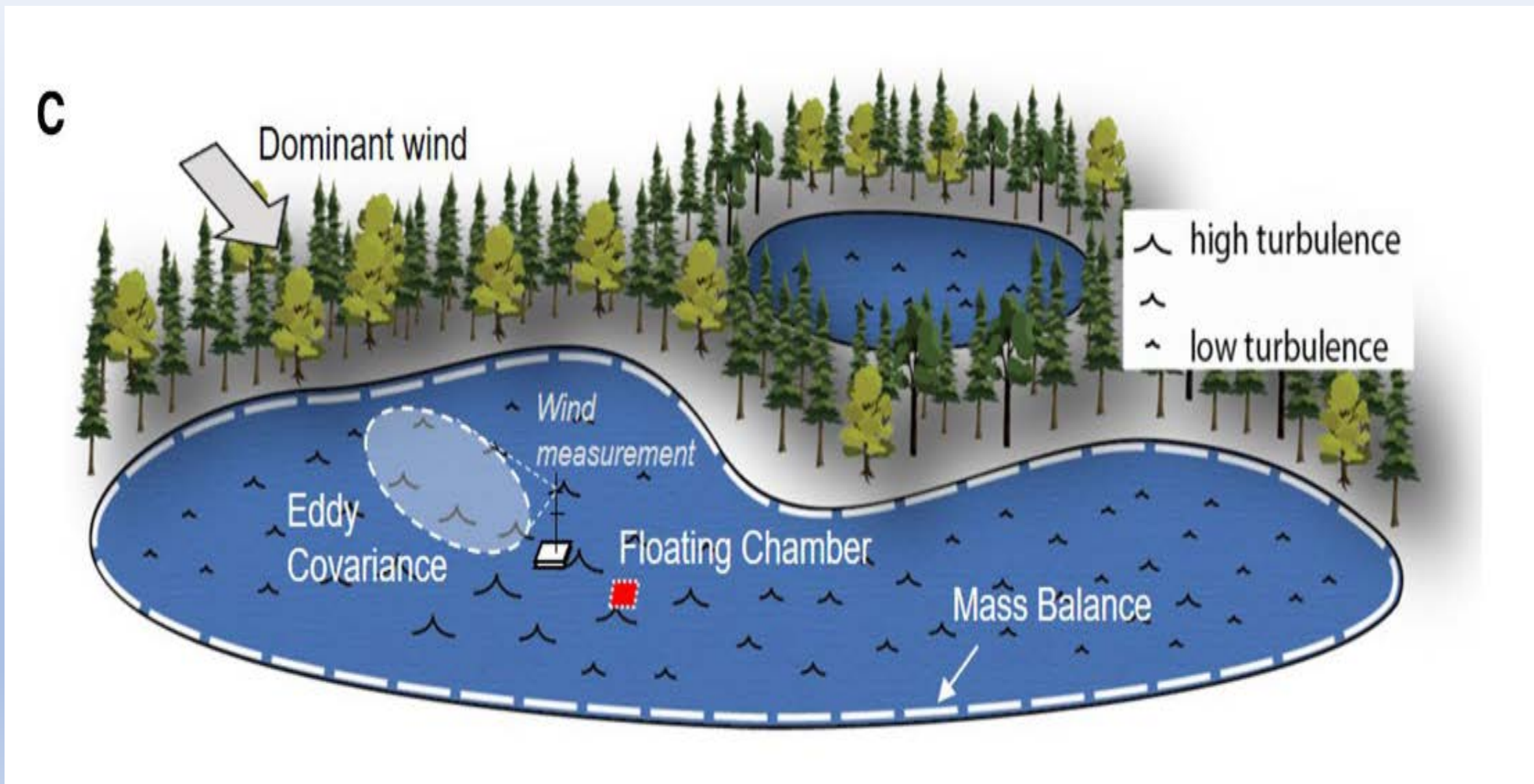


Fig. 4. Examples for nonlinear evolution of CH_4 concentration in the closed chamber headspace for different microsites and dates. The exponential fits of the form $c\text{CH}_4 = \beta_1 + \beta_2 \exp(\beta_3 t)$ are also given for each concentration curve.

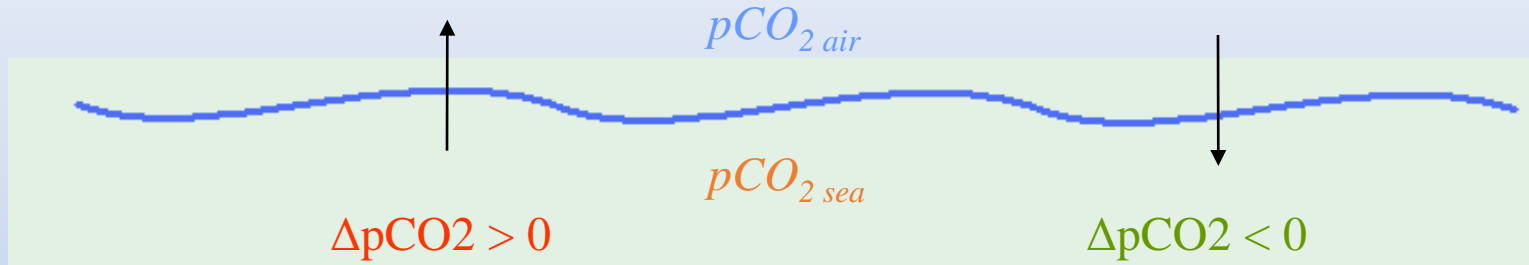
- Измерение **локальных** потоков газа на подстилающей поверхности (на данном микроэlemente ландшафта)

Камера изменяет поток в точке, а пульсационный метод – на некоторой области формирования потока



Поток CO₂ :

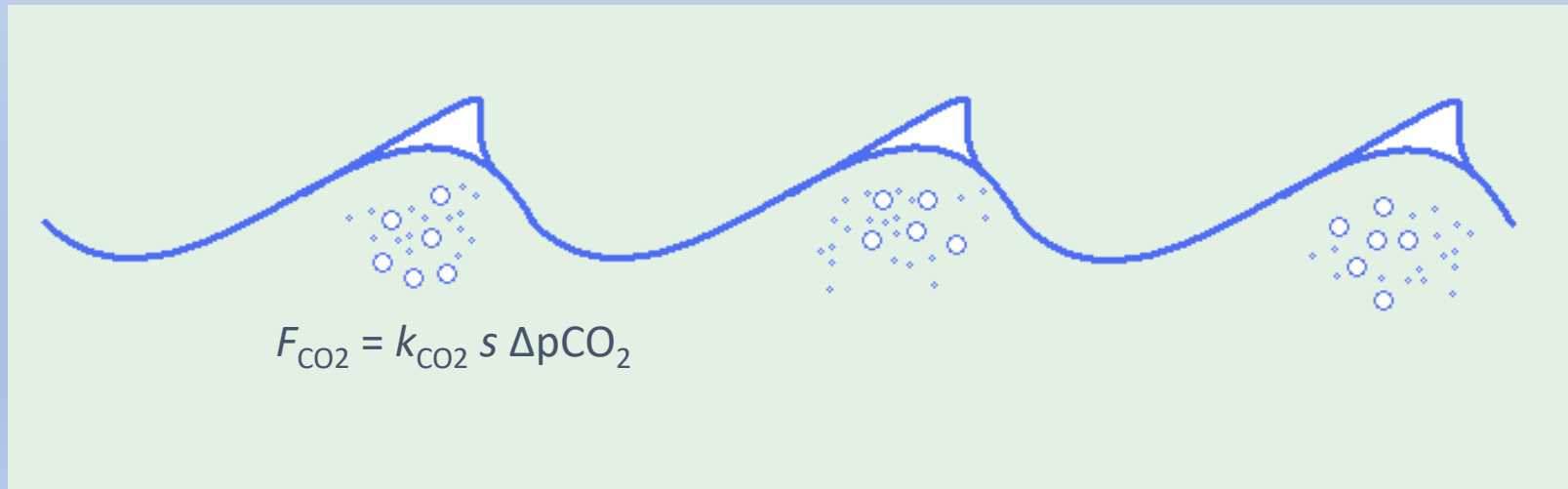
Поток CO₂ вызывается разницей парциальных давлений CO₂, ΔpCO₂:



$$\tau = \rho C_D u_z^2$$
$$H = \rho c_p C_H u_z (T_0 - T_z)$$
$$L_E = L_s C_E u_z (q_0 - q_z)$$

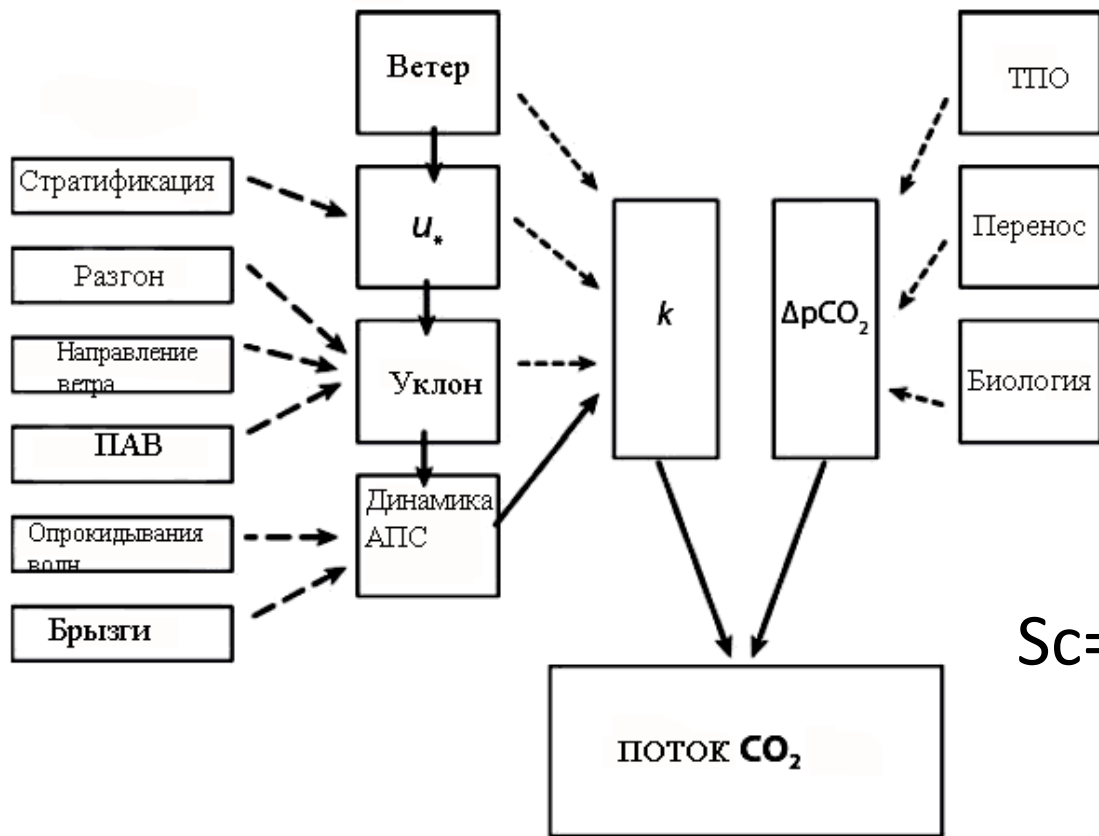
CO₂ скорость переноса газа:

- Зависит от скорости трения, пены и брызг.



K – коэффициент переноса
(зависит от скорости ветра и
коэффициента диффузии)

Необходимая информация:
концентрация газа на
поверхности и концентрация газа
в атмосфере



$$F_{\text{CO}_2} = ks(\Delta p\text{CO}_2)$$

$$k = 0.31u^2(S_c/660)^{-1/2}$$

Число Шмидта: $Sc = \nu/D$

Где ν кинематическая вязкость воды и D коэффициент диффузии газа. И ν и D имеют размерность $\text{м}^2/\text{с}$ так что число Шмидта безразмерное.

$Sc=600$ при температуре воды 20 градусов

$$K_c = K_{c600} [(Sc)^{-0.5}/(600)^{-0.5}]$$

$$\frac{k_{\text{CO}_2}}{k_x} = \left(\frac{Sc_{\text{CO}_2}}{Sc_x}\right)^{-2/3} \quad \text{for smooth surfaces } (U_{10} \approx 3 \text{ m s}^{-1})$$

and

$$\frac{k_{\text{CO}_2}}{k_x} = \left(\frac{Sc_{\text{CO}_2}}{Sc_x}\right)^{-1/2} \quad \text{for wavy surfaces}$$

Исследование газообмена с использованием беспилотных летательных аппаратов



1

50 cm

2

Order of magnet valve opening:

- 1 and A
- 2 and B
- 3 and C
- 4 and D
- 5 and E
- 6 and F

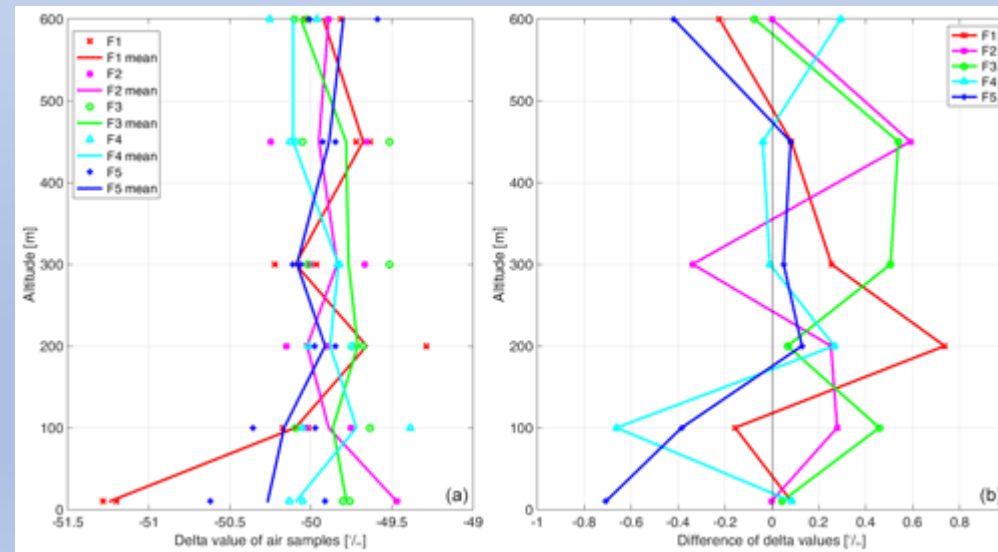
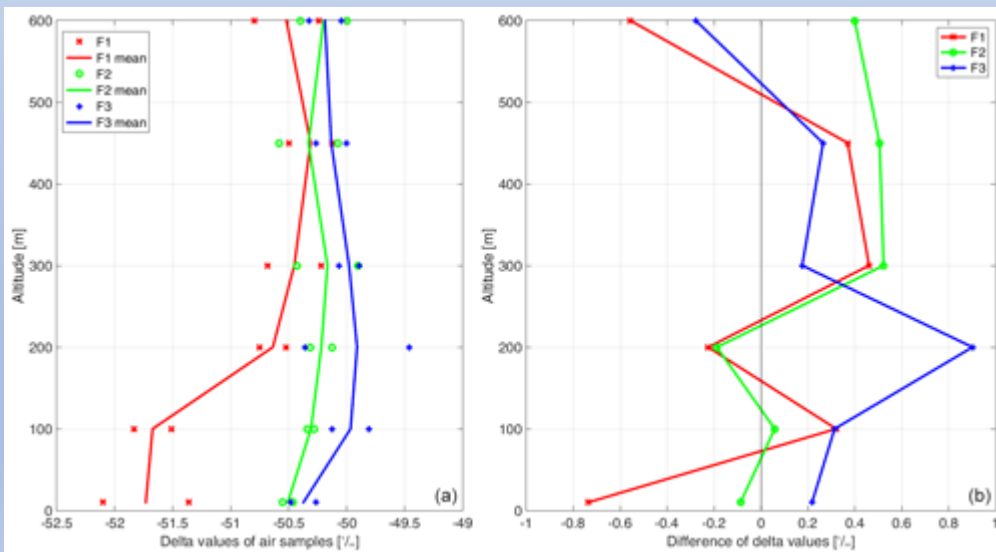
Glass bottles (Picture 3)

10 cm

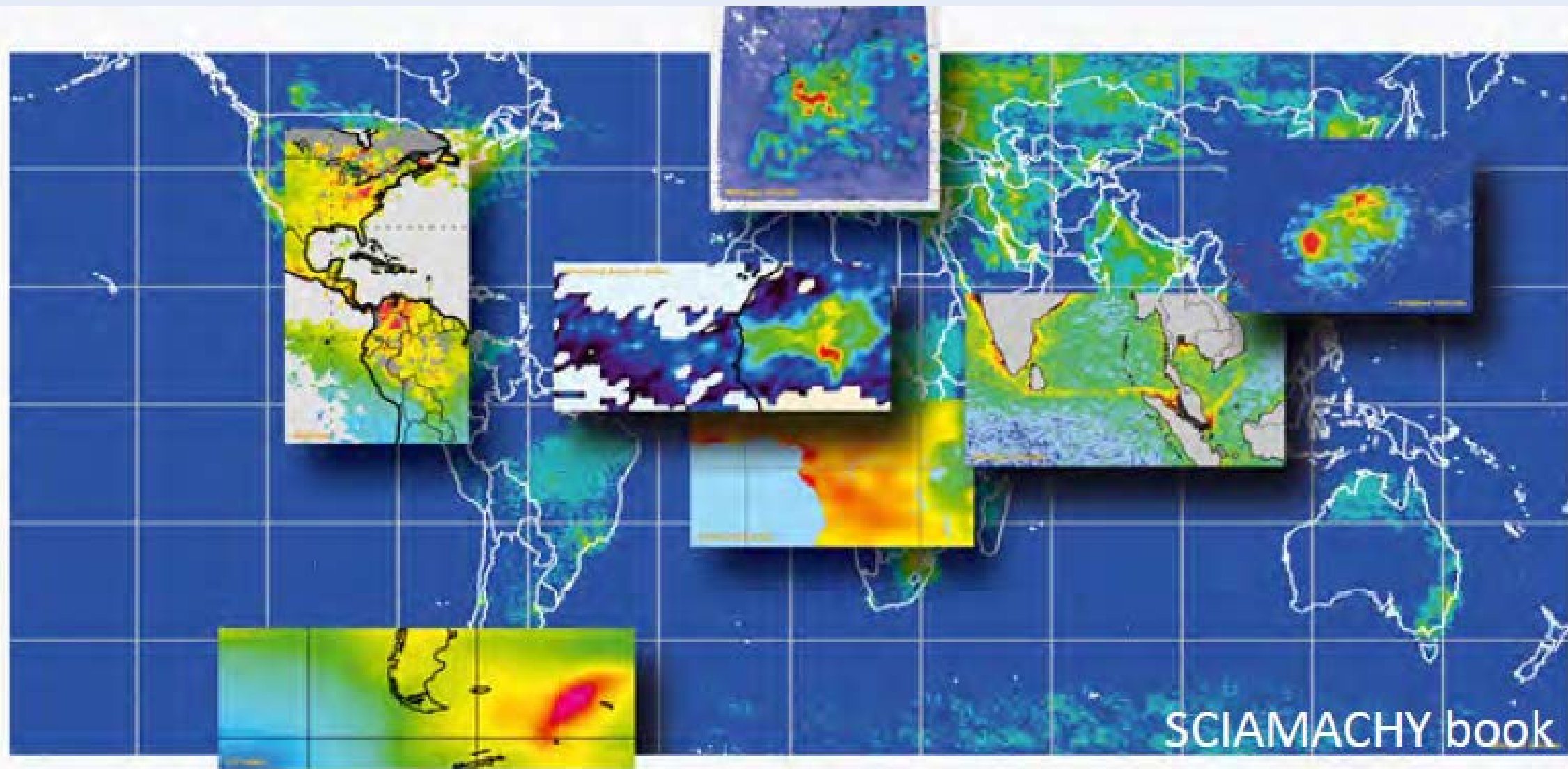
3

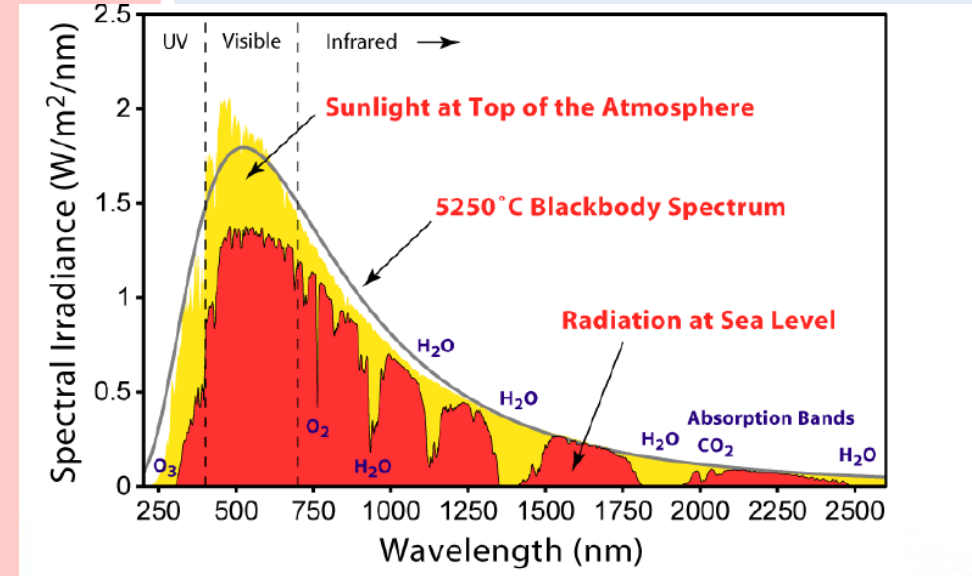
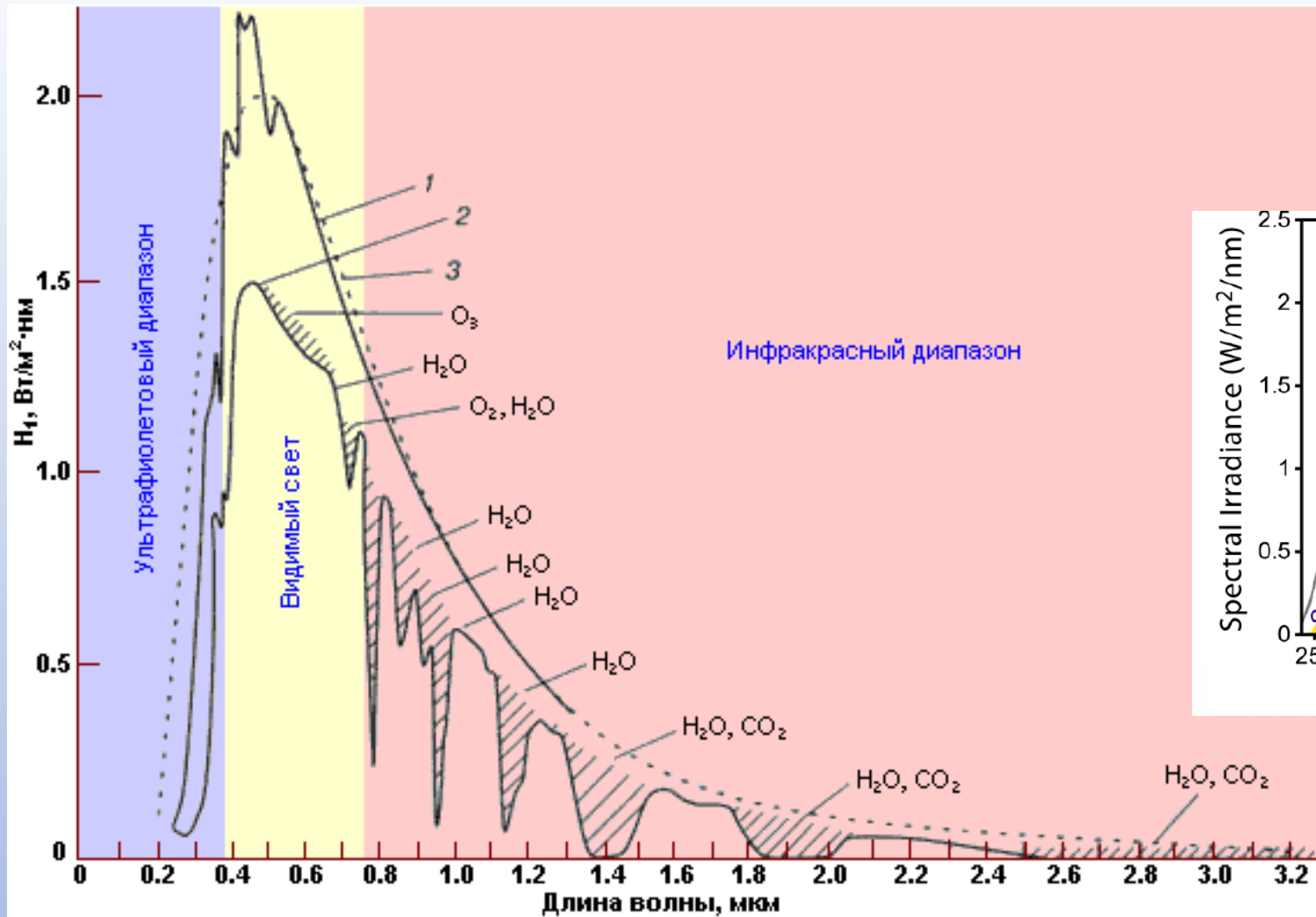
10 cm

Case	MPV	MPV	Magnet Valve
In Flight	Closed	Open	Closed
Sampling	Closed	Open	Open
Transport	Closed	Closed	Removed, after all MPV closed



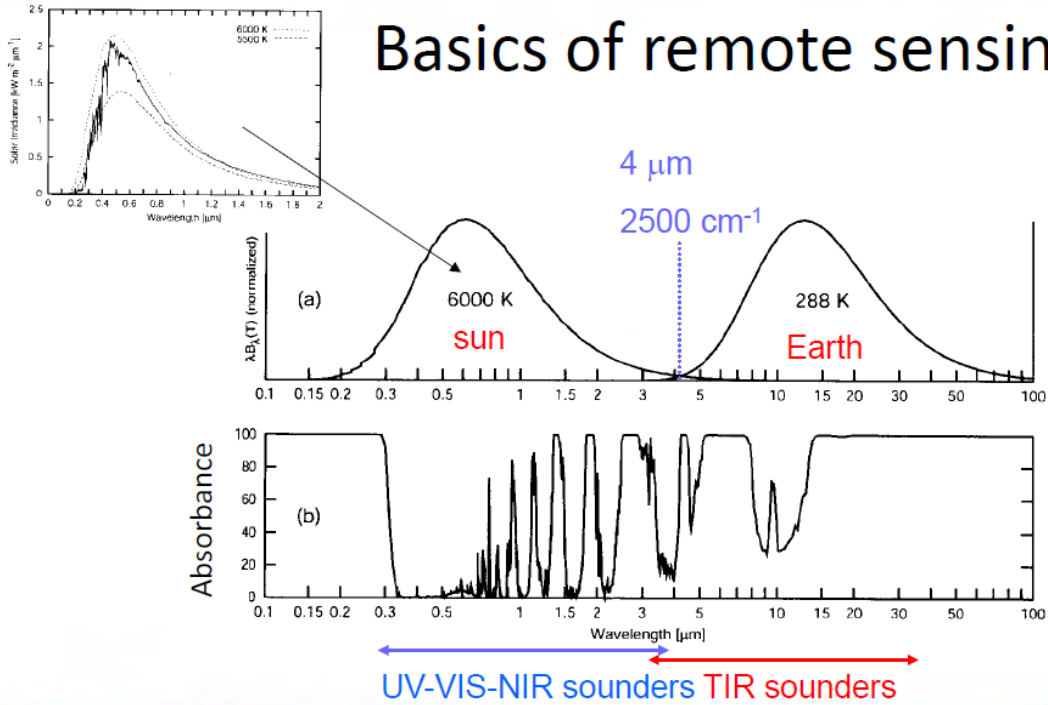
Дистанционное исследование состава атмосферы



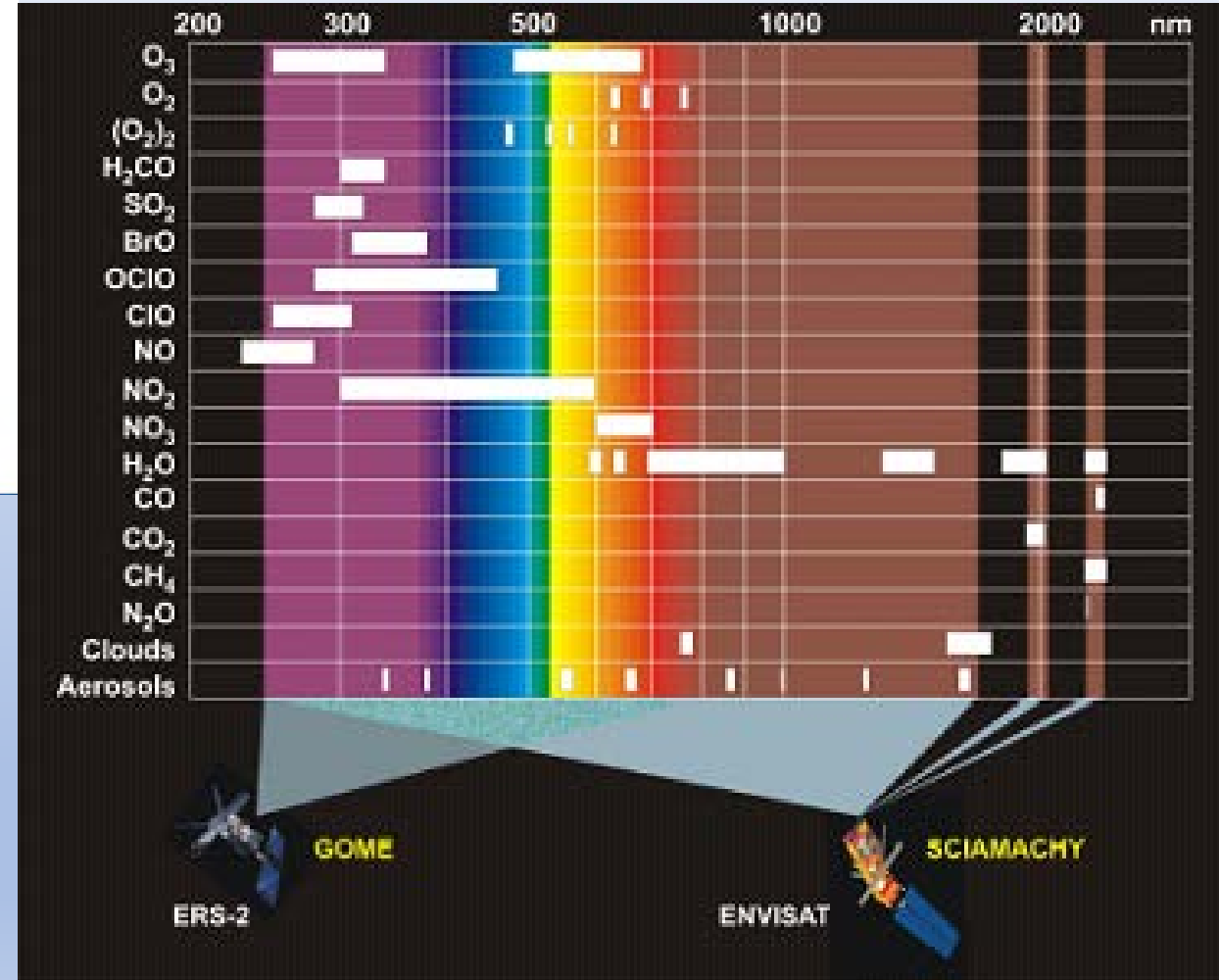


- В атмосфере солнечная радиация поглощается и рассеивается
- происходит сильное поглощение O_3 , O_2 , H_2O , CO_2 и др. газов
- для каждого газа существуют определенные линии поглощения.

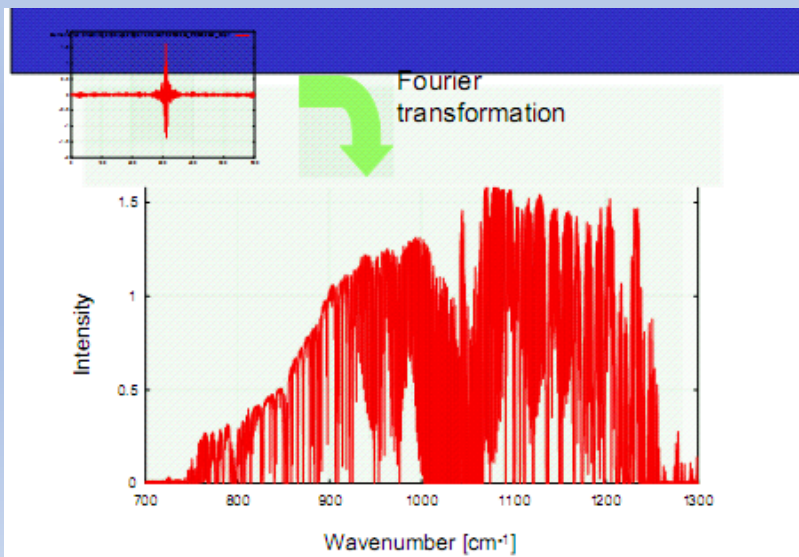
Basics of remote sensing (3)



Окна поглощения для разных газов



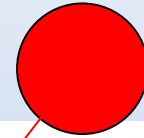
Метод определения концентраций газов



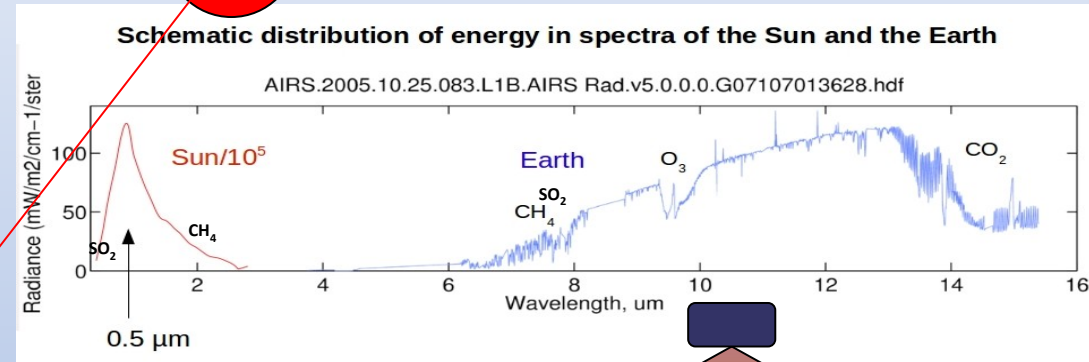
Два типа спутниковых спектрометров

$T \sim 6000 \text{ K}$

Излучение Солнца отраженное
от земной поверхности



Тепловое излучение земной
поверхности и атмосферы

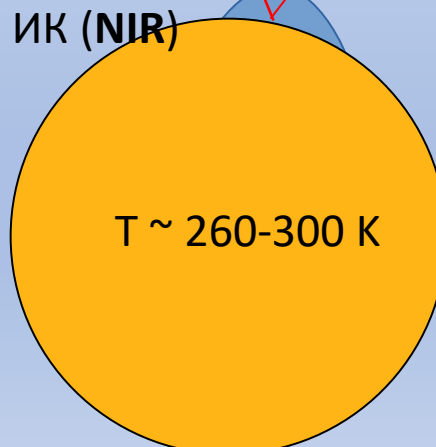


OMI, SCIAMACHY,
OMPS, etc



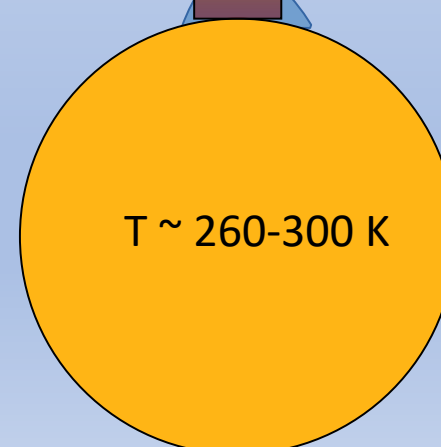
Коротковолновое
излучение ИК (SWIR)
или ближнее ИК (NIR)

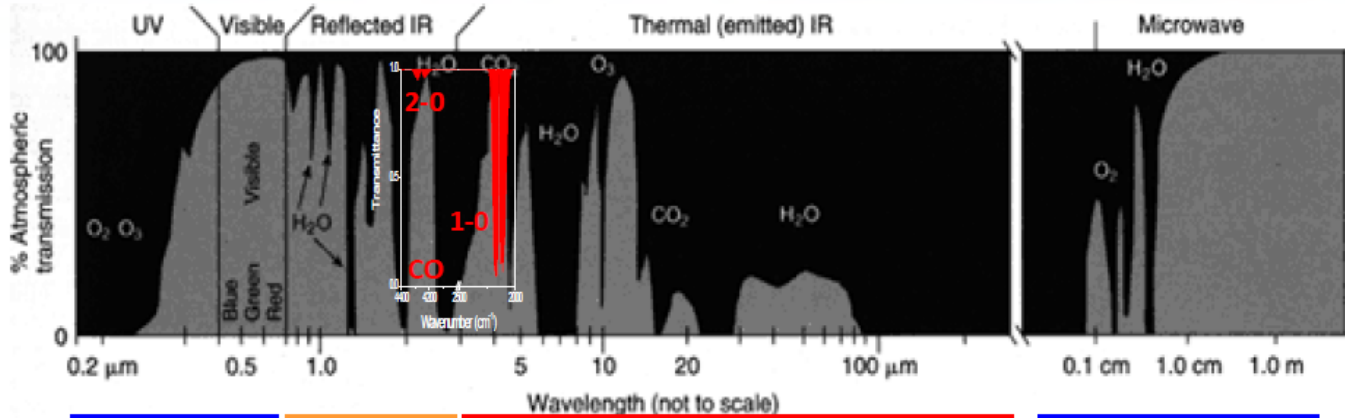
$T \sim 260\text{-}300 \text{ K}$



Тепловое излучение
ИК(TIR) AIRS, IASI, CrIS, etc

$T \sim 260\text{-}300 \text{ K}$





- | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>O₃
H₂O
NO₂
SO₂
H₂CO, C₂H₂O₂
IO
BrO</p> <p>GOME, GOME-2, SCIAMACHY,
OMI at nadir
SCIAMACHY, OSIRIS at limb</p> | <p>CO₂
CH₄
CO</p> <p>SCIAMACHY,
GOSAT, OCO at nadir</p> | <p>H₂O
CO₂
CH₄
N₂O
O₃
CO
HNO₃
NH₃
CFC11, CFC12, ...
CH₃OH, HCOOH, C₂H₂, C₂H₆, ...
+ isotopologues</p> <p>TES, AIRS, IASI, MOPITT
at nadir
MIPAS, ACE at limb</p> | <p>O₂
H₂O, OH, HO₂
HNO₃
HCl, BrO, ClO, HOCl
O₃
CO
HCN, CH₃CN</p> <p>DMR, MLS at limb</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

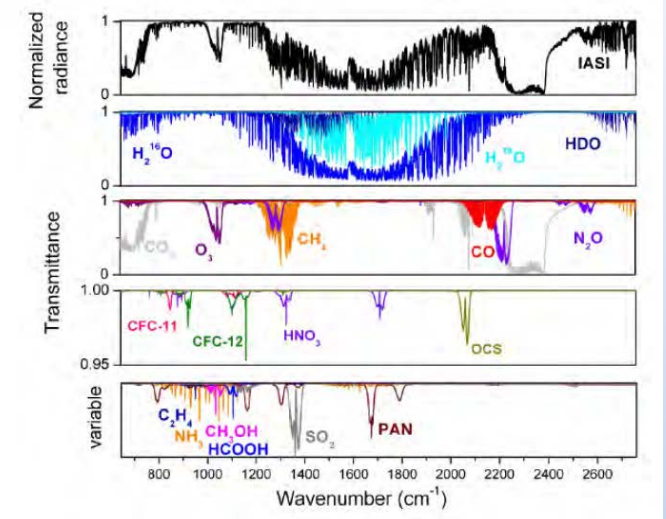
MetOp IASI

2005 2010 2015

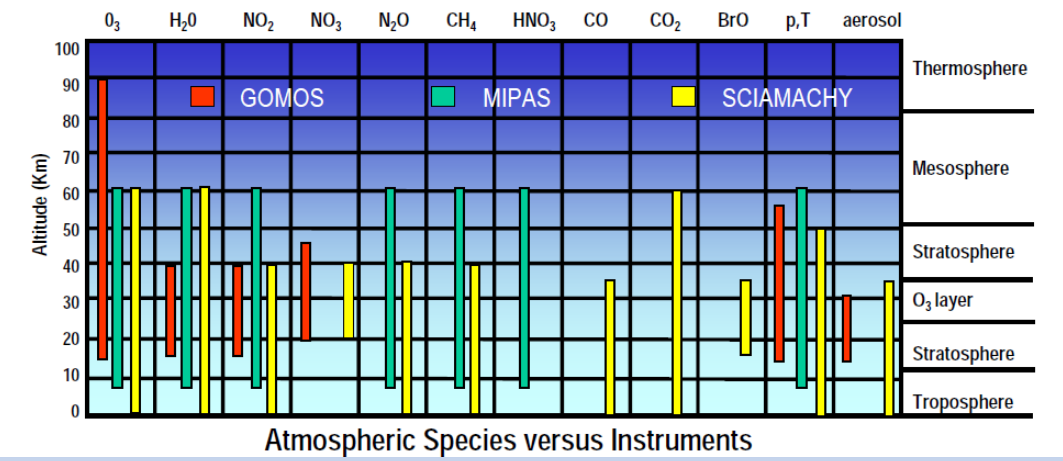
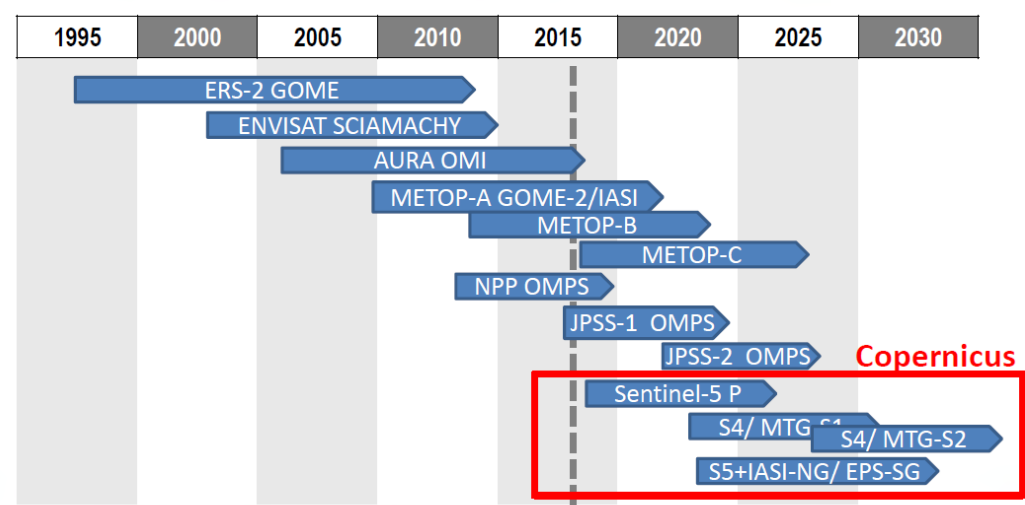
IASI-A IASI-B IASI-C

Infrared
Atmospheric
Sounding
Interferometer

- advanced thermal IR sounder.
- global measurements 2 times per day (at 9h30 and 21h30 local solar time)



- GOMOS → Global **O**zone Monitoring by Occultation of Stars
- MIPAS → Michelson Interferometric Passive **A**tmospheric **S**ounder
- SCIAMACHY → Scanning Imaging **A**bsorption **S**pectrometer for Atmospheric Cartography



Приборы работающие по Солнцу (SWIR, 1.8 μm или 2.3 μm , напр., SCIAMACHY) практически неработоспособны в Арктике из-за малой высоты Солнца (тем более полярной ночью) и/или низкой отражательной способности снега, воды и льда.

Приборы работающие по излучению Земли.

AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) /Aqua – это дифракционный спектрометр разработанный в НАСА (последняя версия данных № 6), на орбите с 2002 года.

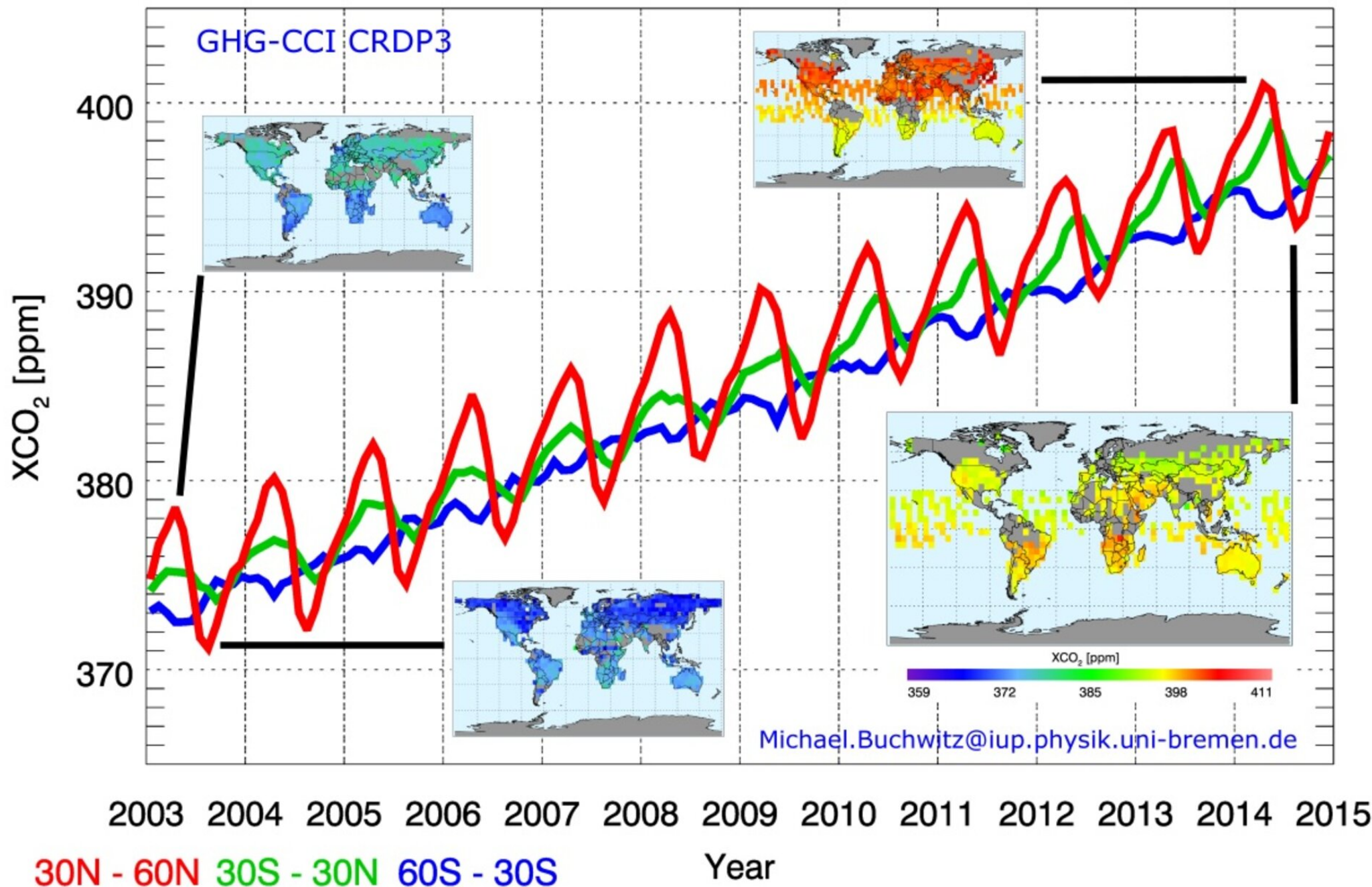
IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) /Metop-1 – интерферометр, созданный в Европе, на орбите с 2007 года, сейчас поступают данные с IASI-1 и IASI-2.

Cross-track Infrared Sounder (CrIS)/ JPSS-1 и JPSS-2

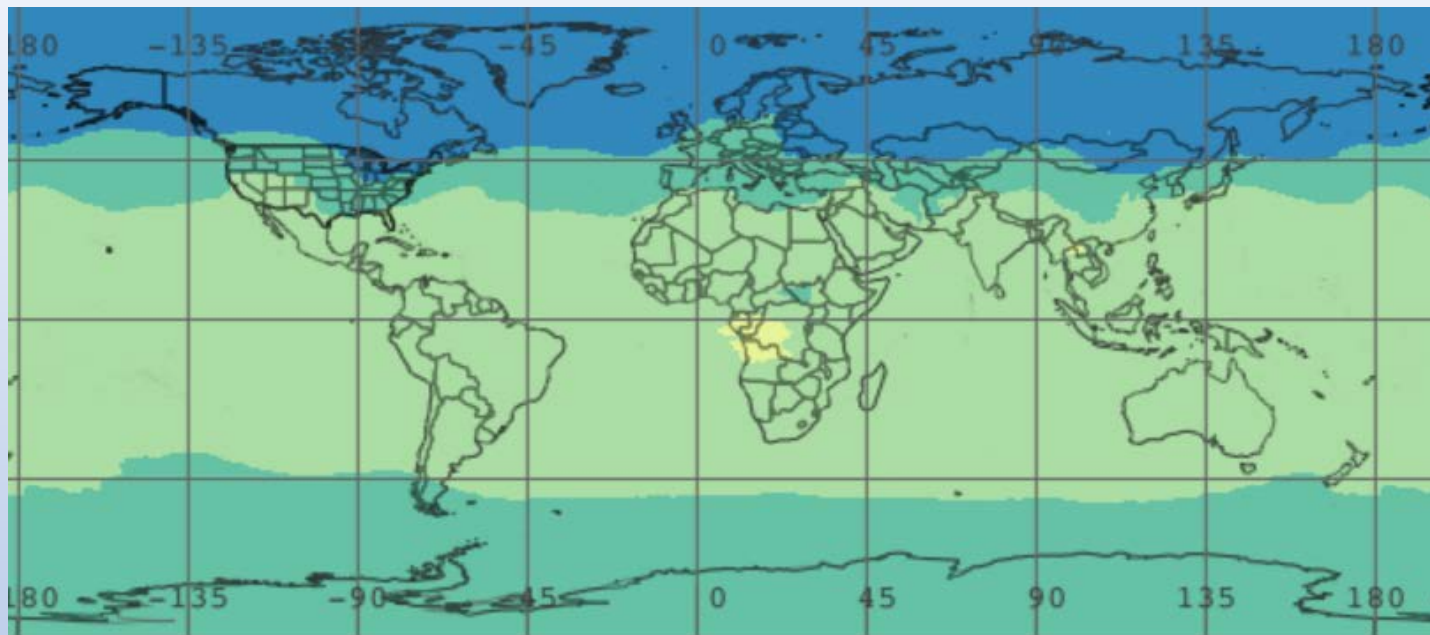
Спектральное разрешение AIRS $\sim 2 \text{ см}^{-1}$ Спектральное разрешение IASI $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$

У IASI лучшее спектральное разрешение, чем у AIRS, а также лучшая чувствительность в нижней части тропосферы (0-4 км.)

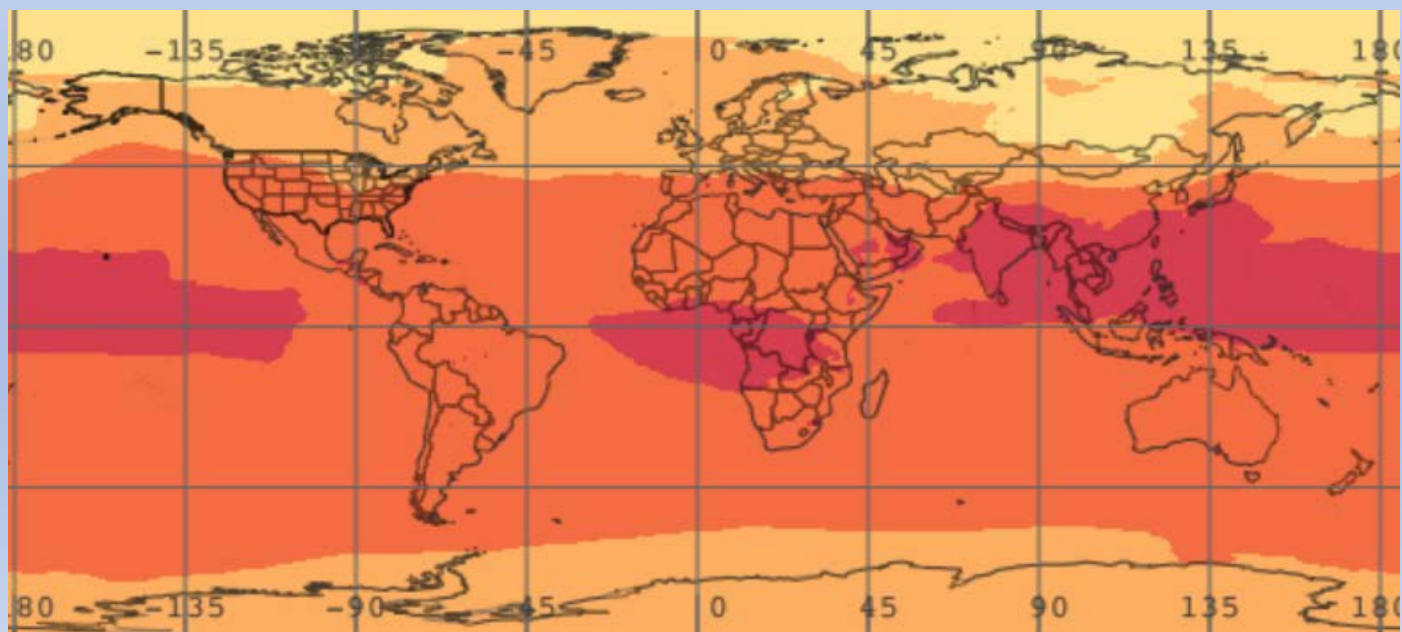
Carbon dioxide SCIAMACHY/ENVISAT & TANSO-FTS/GOSAT



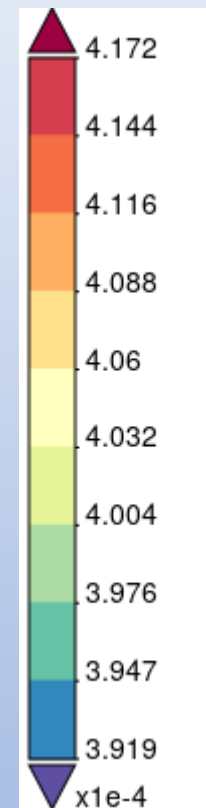
Time Averaged Map of Carbon dioxide, assimilated dry-air column average monthly 0.5 x 0.625 deg.
[GEOS-CHEM OCO2_GEOS_L3CO2_MONTH v10r] mol CO2/mol dry-air



Август 2015

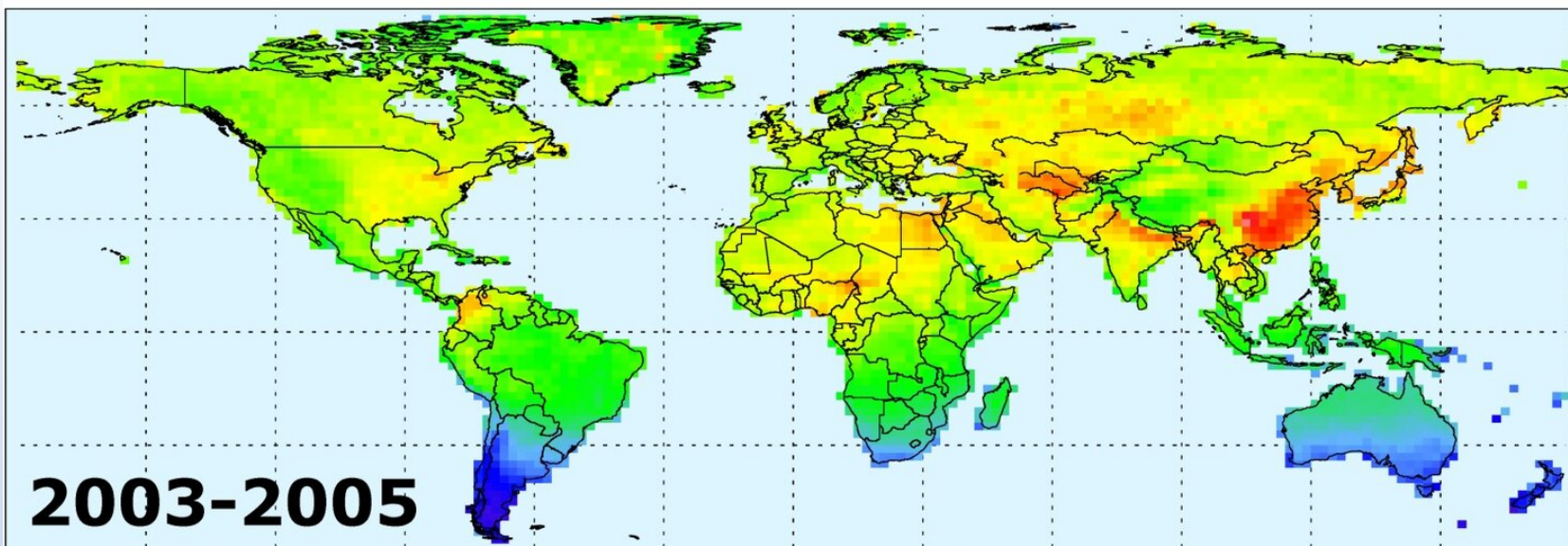


Август 2022

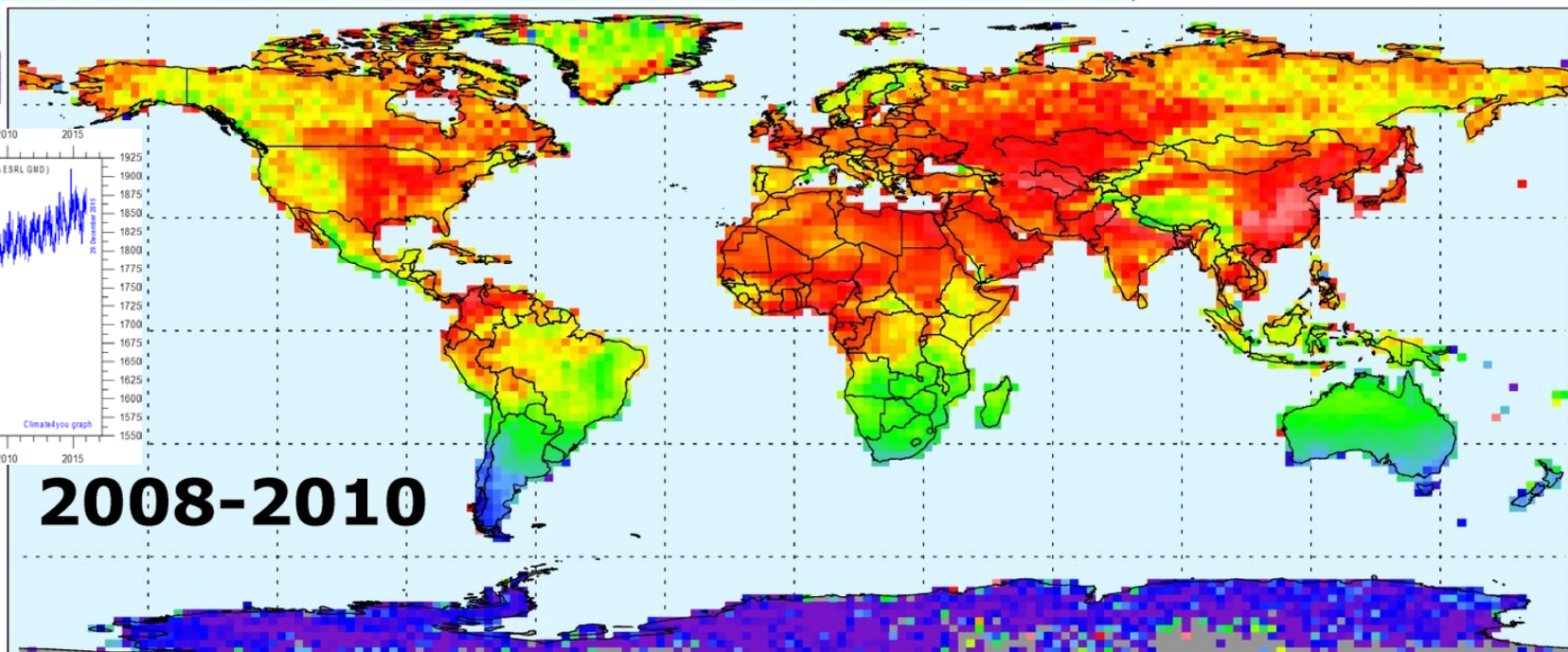


GHG-CCI

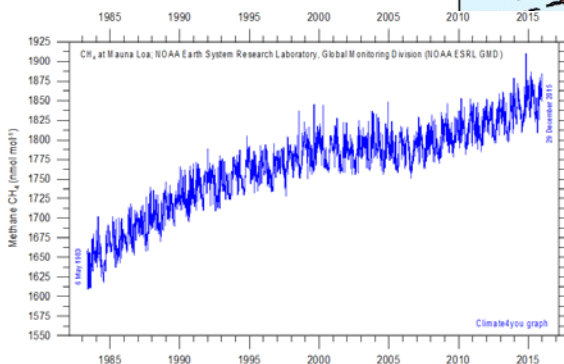
Methane
SCIAMACHY/ENVISAT



2003-2005



2008-2010

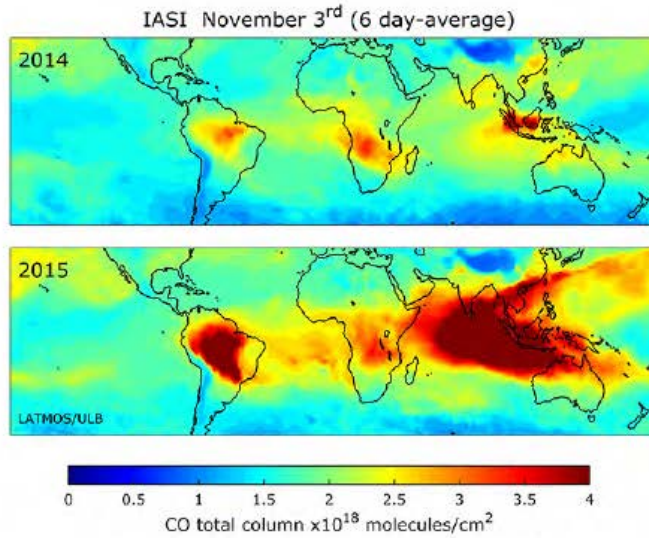


IUP, Univ. Bremen
SRON / JPL
ESA / DLR

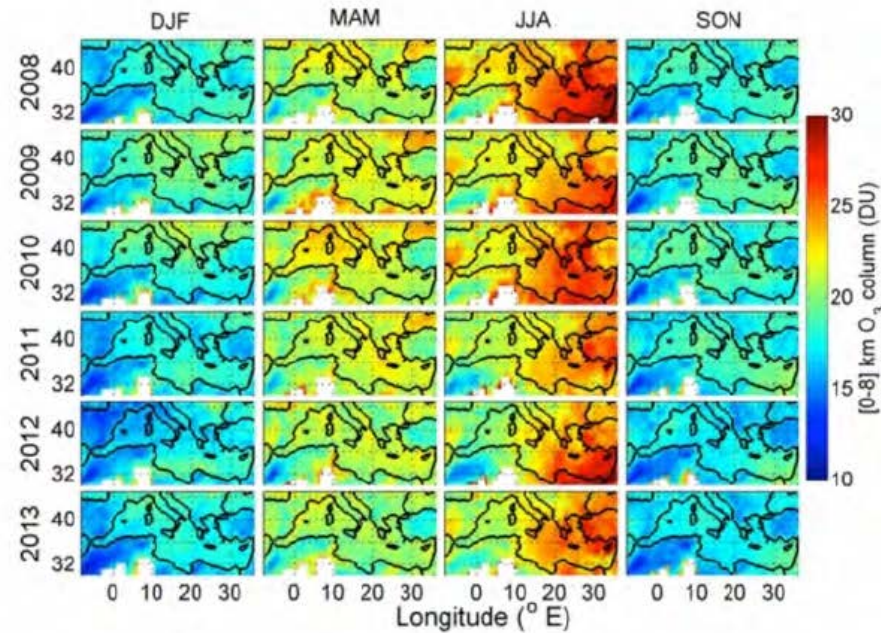
https://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/

XCH₄ [ppb]



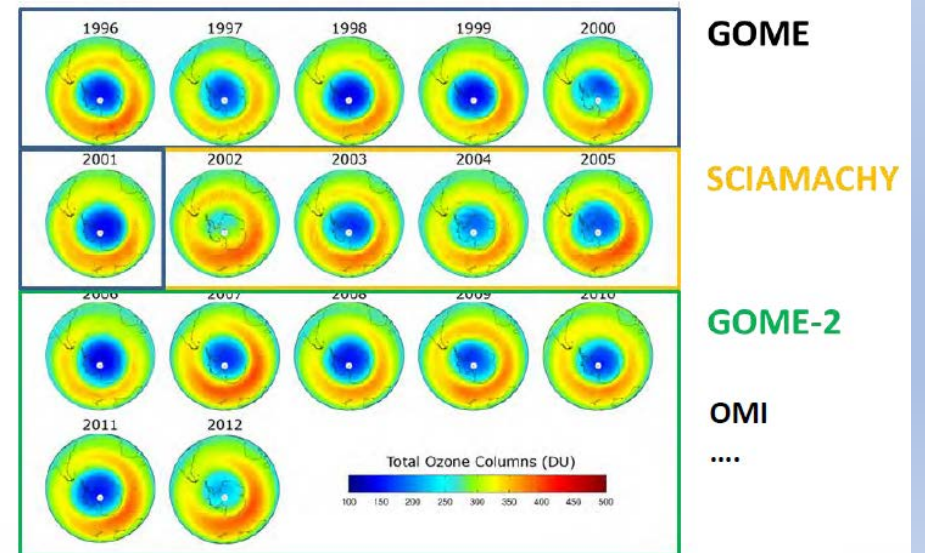


CO concentrations due to fires observed last fall over Indonesia

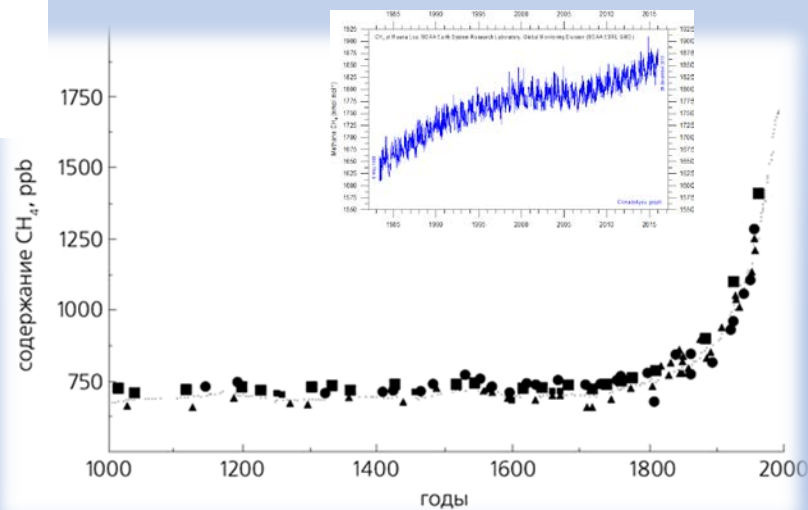
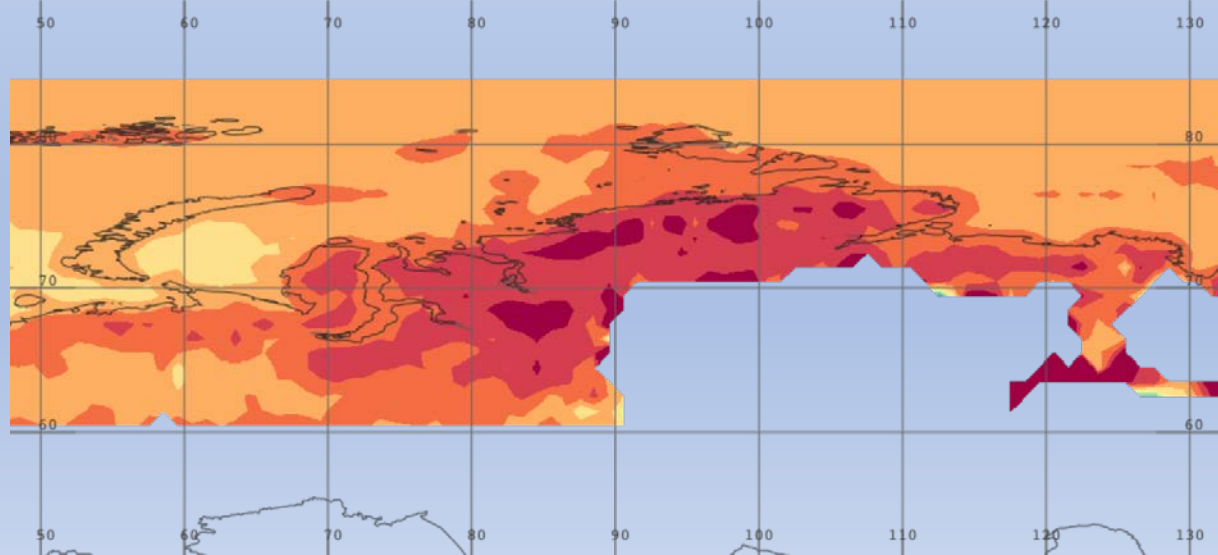
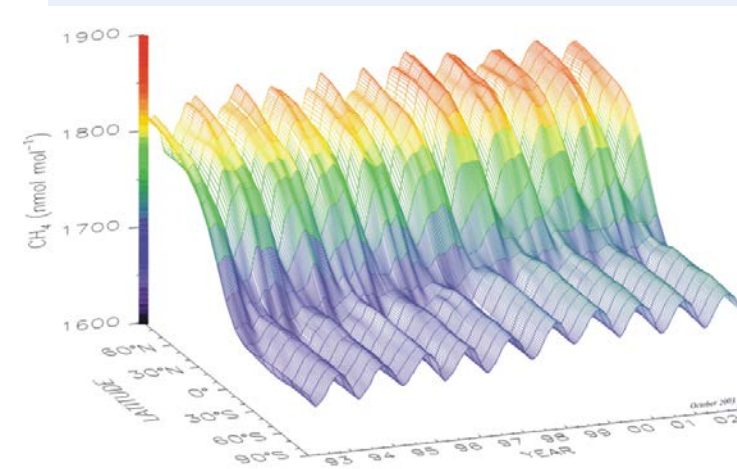
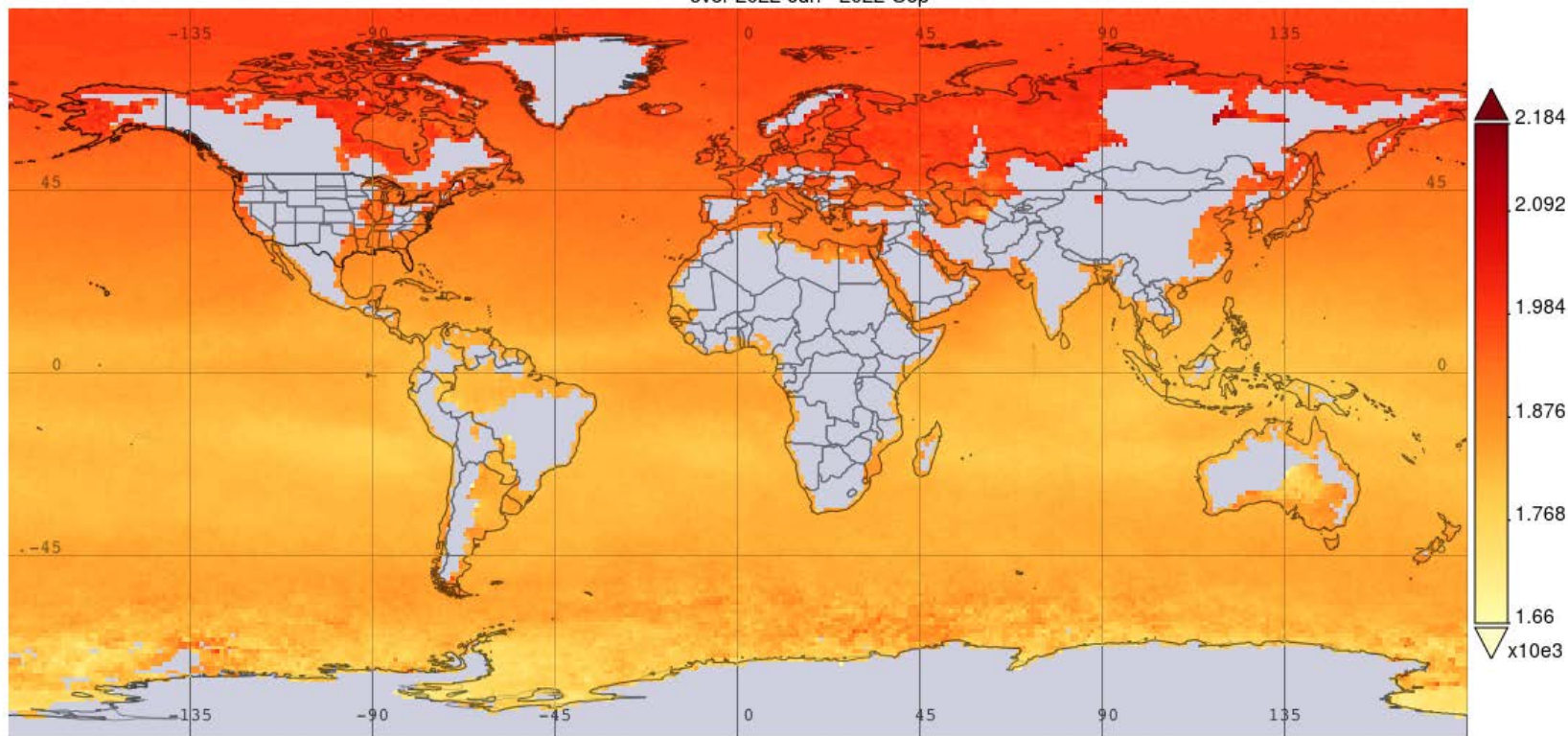


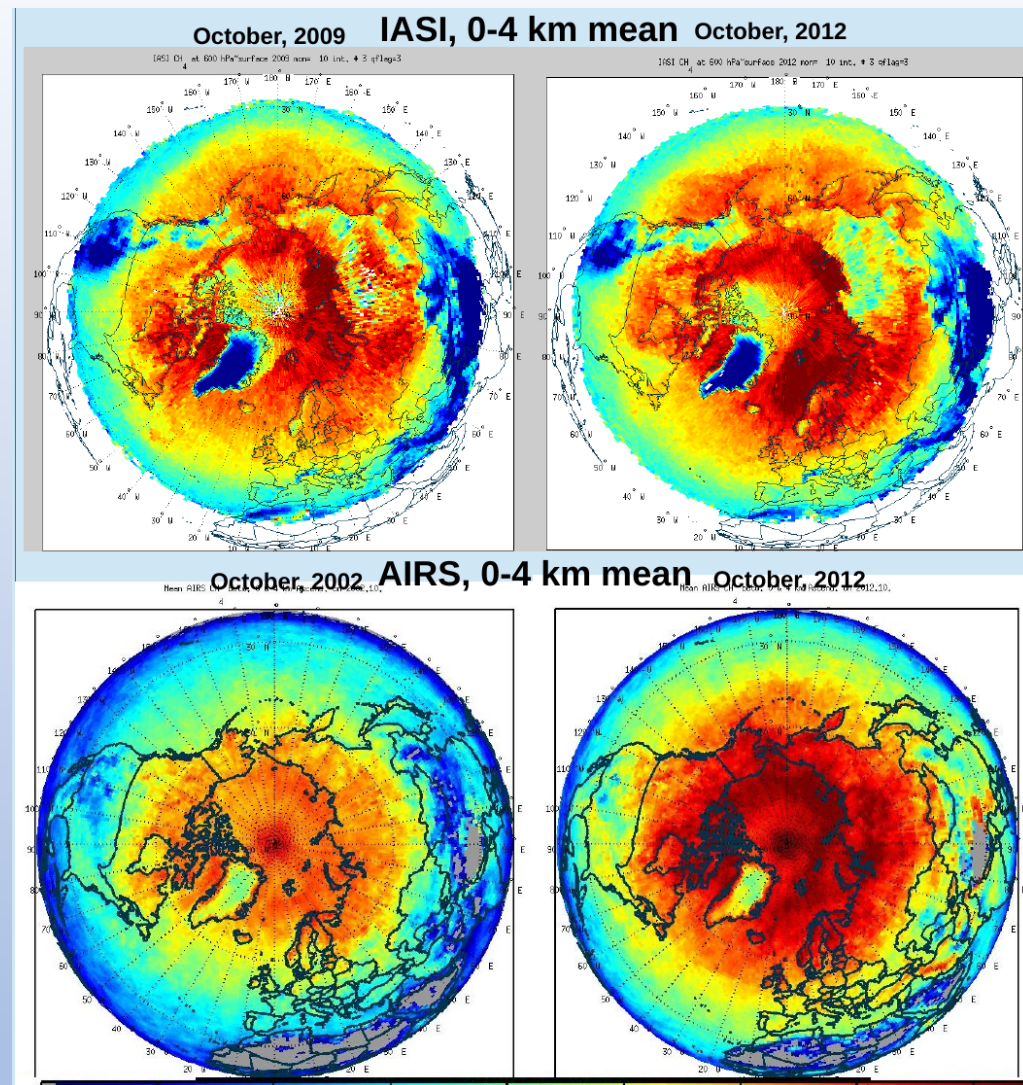
Mediterranean tropospheric ozone summer anomaly

Long-term ozone monitoring



Time Averaged Map of Methane, Mole Fraction in Air (Daytime/Ascending, AIRS-only) monthly 1 deg. @1000hPa [AIRS AIRS3STM v006] ppbv over 2022-Jun - 2022-Sep





Сравнение среднемесячных спутниковых снимков за октябрь 2009 (2002) и октябрь 2013

Возможно ли из спутниковых данных определять эмиссии? (потоки)

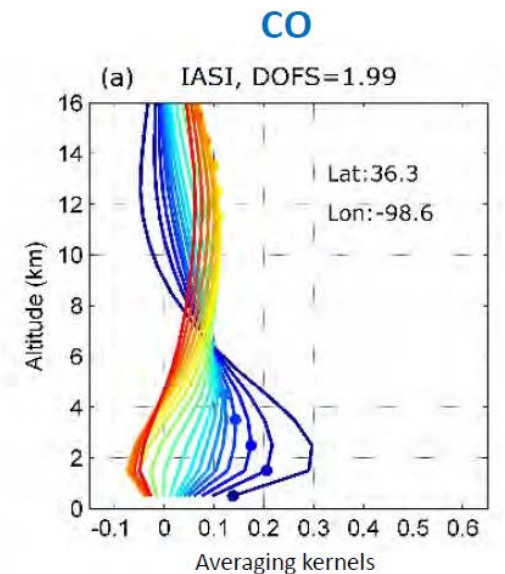
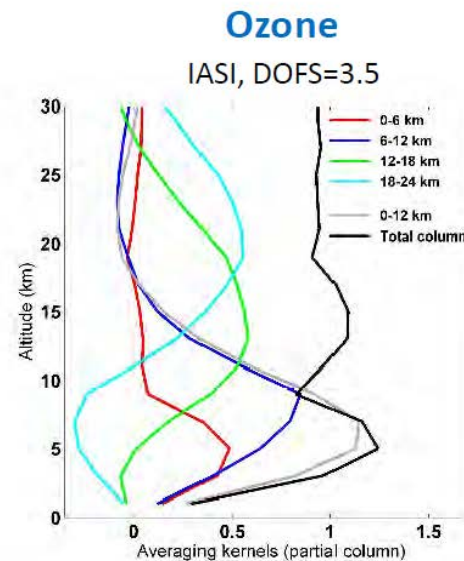
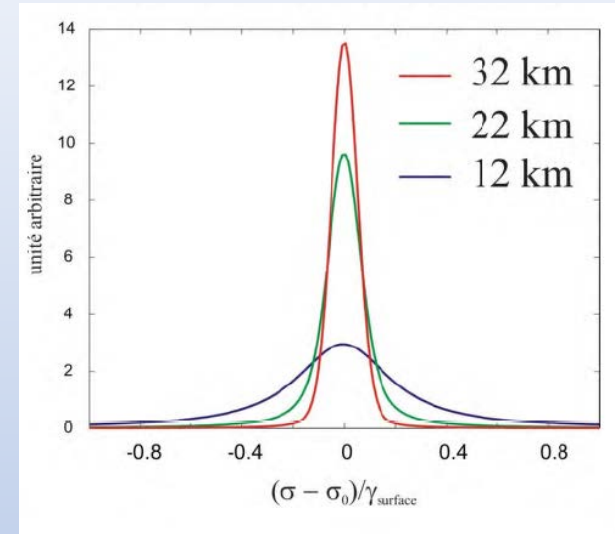
Информация о вертикальном профиле из TIR

Информация о высоте может быть получена из:

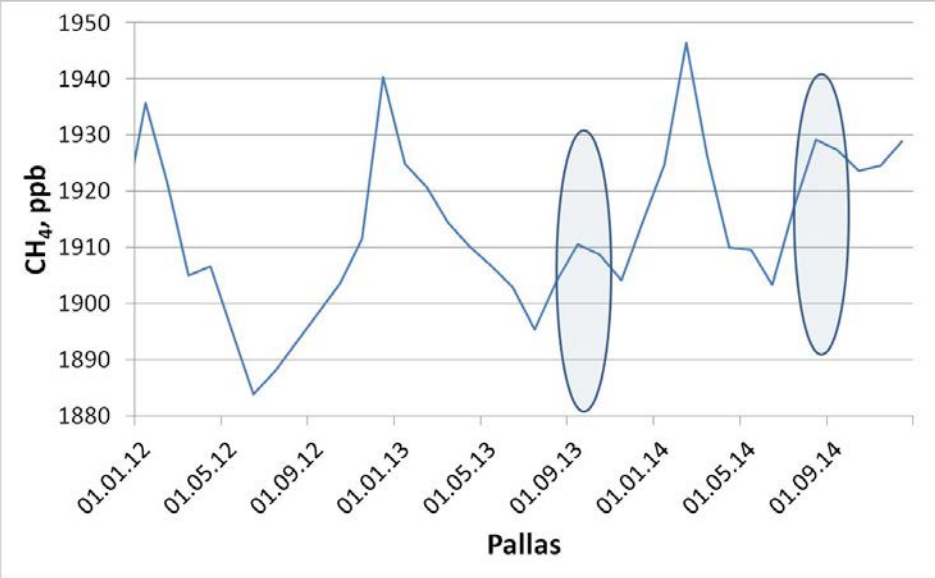
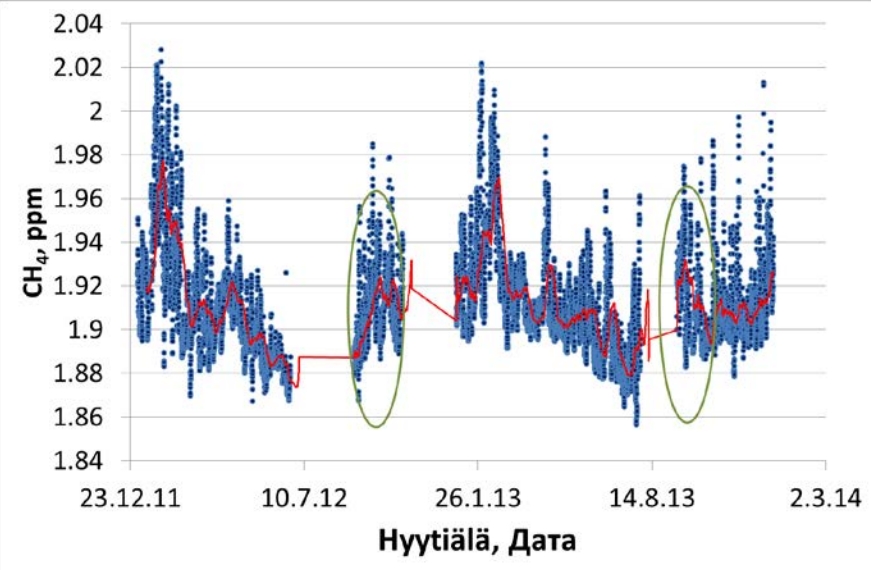
1. Изменение линий поглощения давлением
2. Температурная зависимость спектральной плотности линий

Информация о вертикальном профиле возможна до ~ 35 км макс.

Детали извлекаемой информации о профиле зависят от типа газа, соотношения сигнал/шум, спектрального разрешения прибора...



Эмиссия метана из спутниковых данных. (Yurganov et al., 2016). Максимум эмиссии наблюдается в октябре



Спасибо

