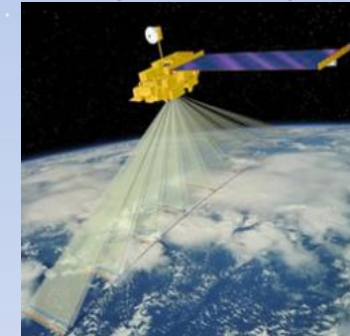




ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ И ПОТОКОВ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ

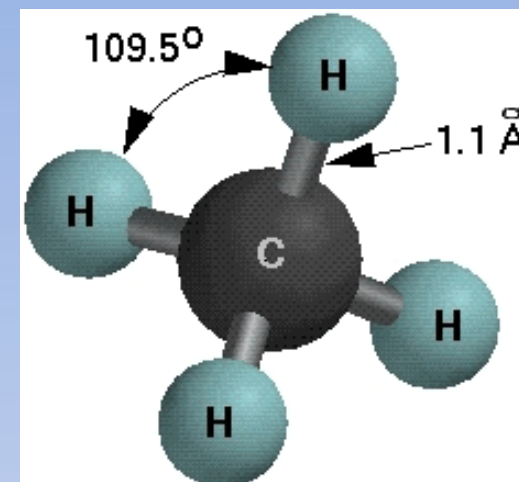
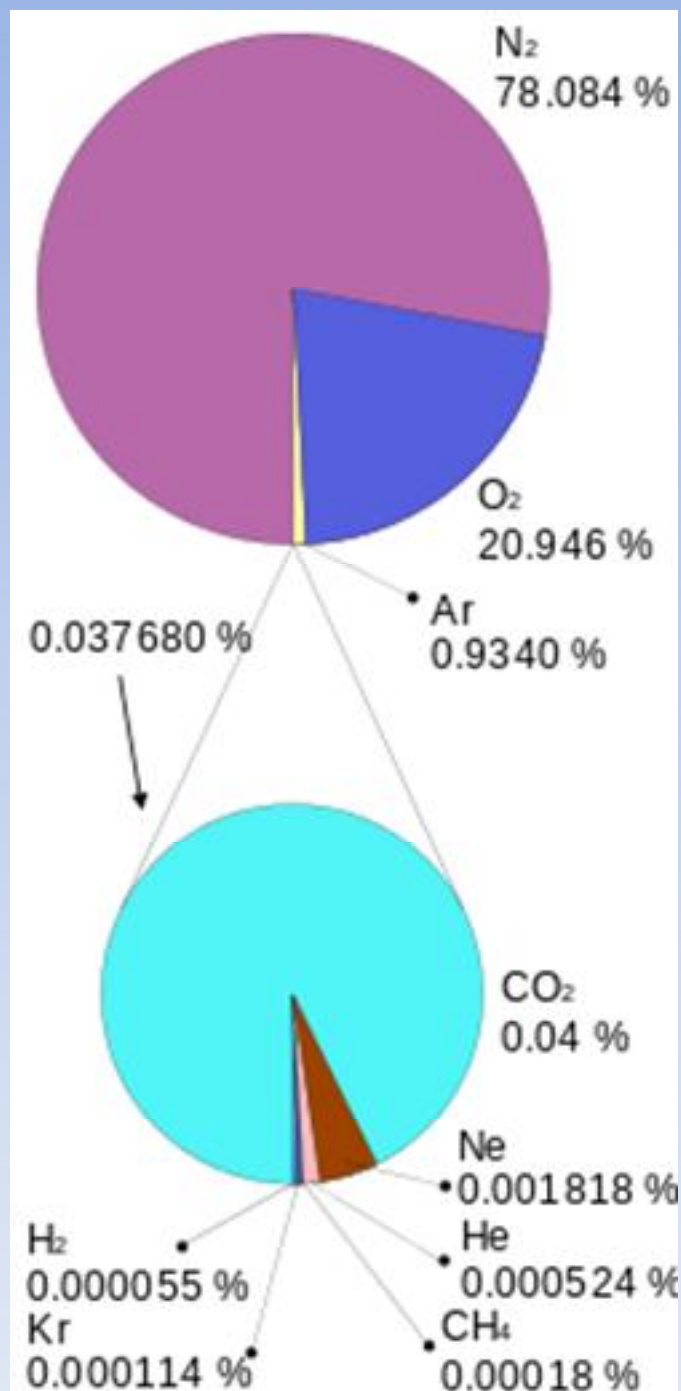


Ирина Репина

Институт физики атмосферы им. А.М.

Обухова РАН

Институт космических исследований РАН



- CH₄, простейший углеводород, бесцветный газ, без запаха
- Нетоксичен и неопасен для здоровья
- Основной компонент природного газа (77-99%), попутных нефтяных газов (31-90%)
- Метан в атмосфере был обнаружен Мигеотти в 1947 г. (Migeotte, 1948)
- Время жизни в атмосфере – 8-12 лет
- Концентрация метана в доленом отношении не зависит от высоты в пределах тропосферы, а затем быстро убывает, достигая на высоте 50 км около 300 ppb

Для определения концентраций метана используют долевые единицы (в этих единицах концентрация не зависит от температуры или давления)

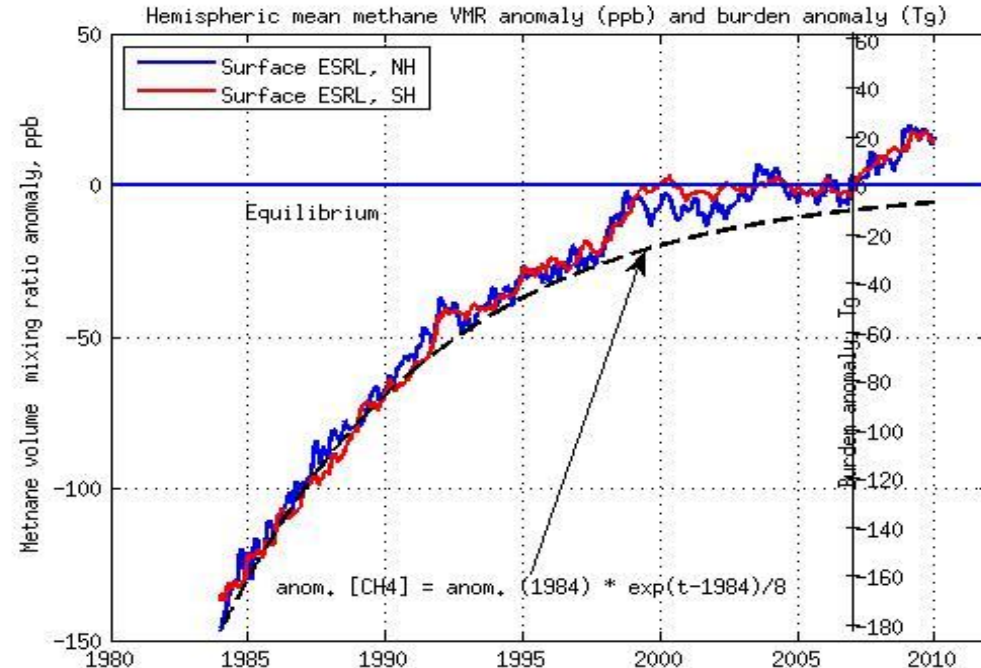
ppm - части на миллион

ppb – части на миллиард

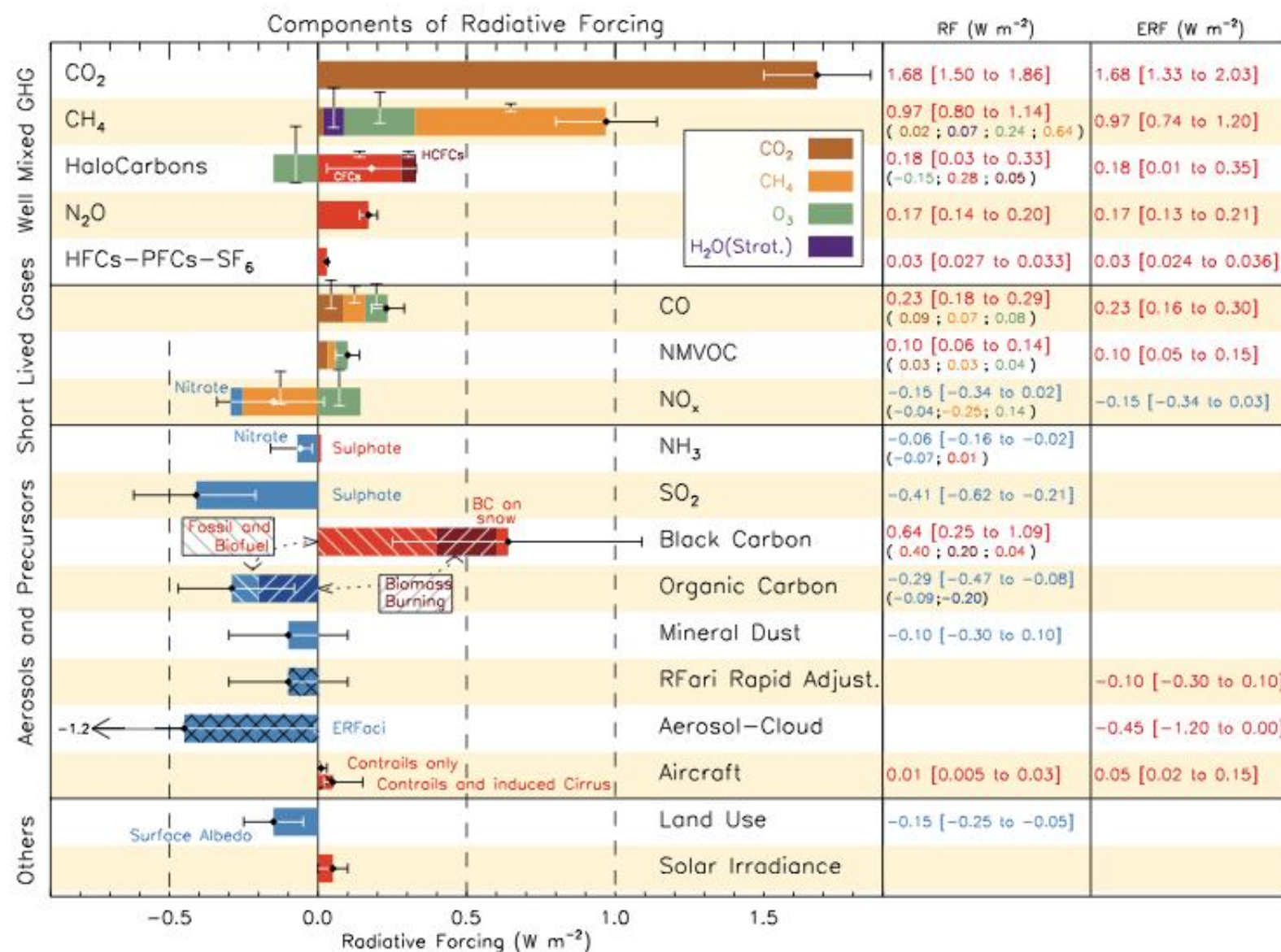
ppt – части на триллион

1 ppm примеси - из миллиона молекул воздуха одна молекула относится к примеси, или что в одном моле воздуха присутствует 10^{-6} молей примеси.

Средняя
концентрация
в атмосфере:
1.86 ppm



Факторы потепления/похолодания климата (IPCC, 2013)



Метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли в инфракрасной области спектра на длине волны 7,66 мкм.

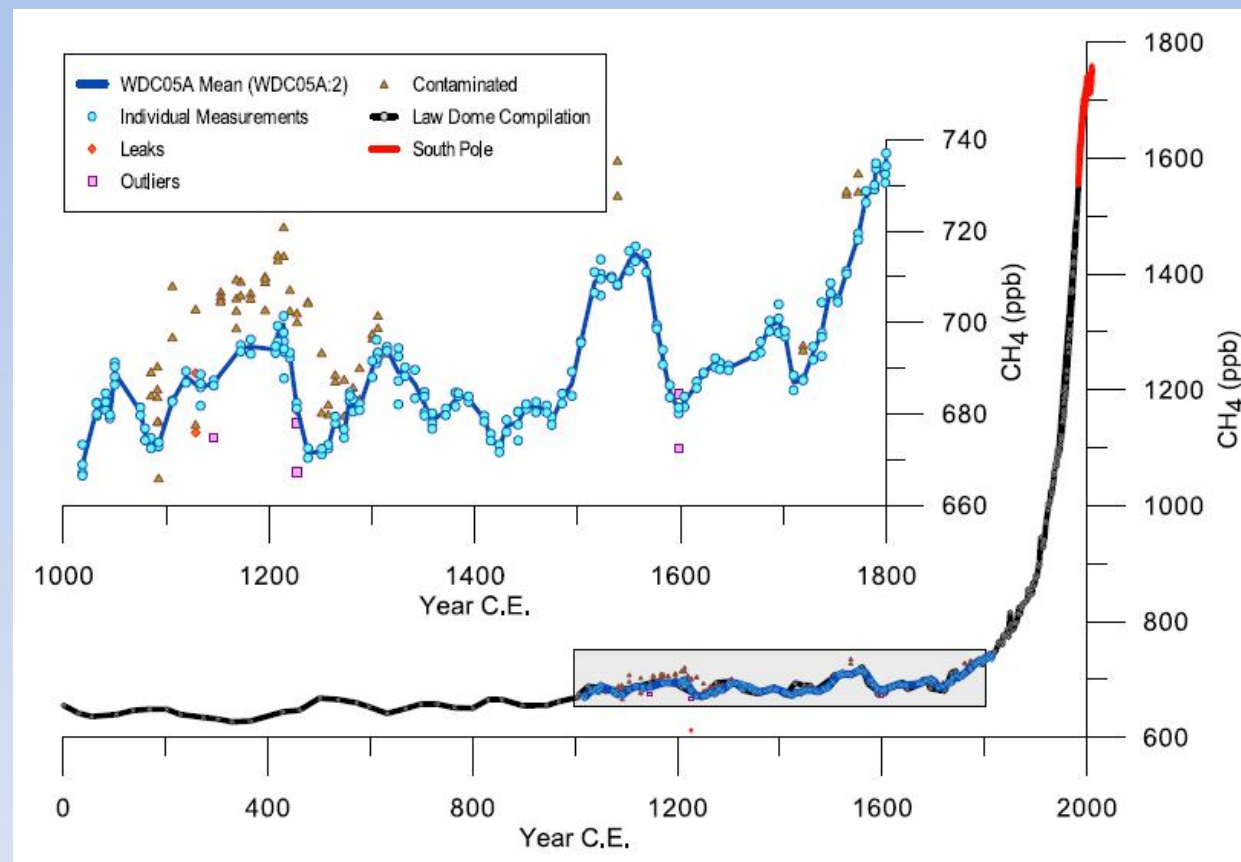
Вклад различных газов в парниковый эффект

Газ	H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CH ₄
Вклад в парниковый эффект, °C	20,6	7,2	2,4	1,4	0,8

1% прироста содержания метана дает вклад примерно в 25 раз более высокий, чем последствия от увеличения содержания двуокиси углерода на 1%.

Метан в 25 раза сильнее поглощает тепловую радиацию, чем углекислый газ.
Спектральные полосы метана менее интенсивны.

Метан – «темная лошадка» семейства парниковых газов



Название	Способ образования	Где образуется
Биогенный	в результате химической трансформации органического вещества	Пожары, мусорные свалки, рисовые чеки
Бактериальный или микробный	в результате деятельности бактерий	В донных отложениях болот и других водоемов, в результате процессов пищеварения в желудках насекомых и животных (преимущественно жвачных)
Термогенный	в результате термохимических процессов	в осадочных породах при их погружении на глубины 3-10 км, где осадочные породы подвергаются химической трансформации в условиях высоких температур и давлений
Абиогенный	в результате химических реакций неорганических соединений	на больших глубинах в мантии земли

Баланс метана в атмосфере (Тг/год)

Источники:

Антропогенные:

Уголь, промышленные выбросы	Газ	Продукты жизнедеятельности	Рис	свалки	Всего
47	63	90	31	55	286

Естественные

Лесные пожары	Болота	тундра	термитники	океан	Всего
50	104	90	23	19	239

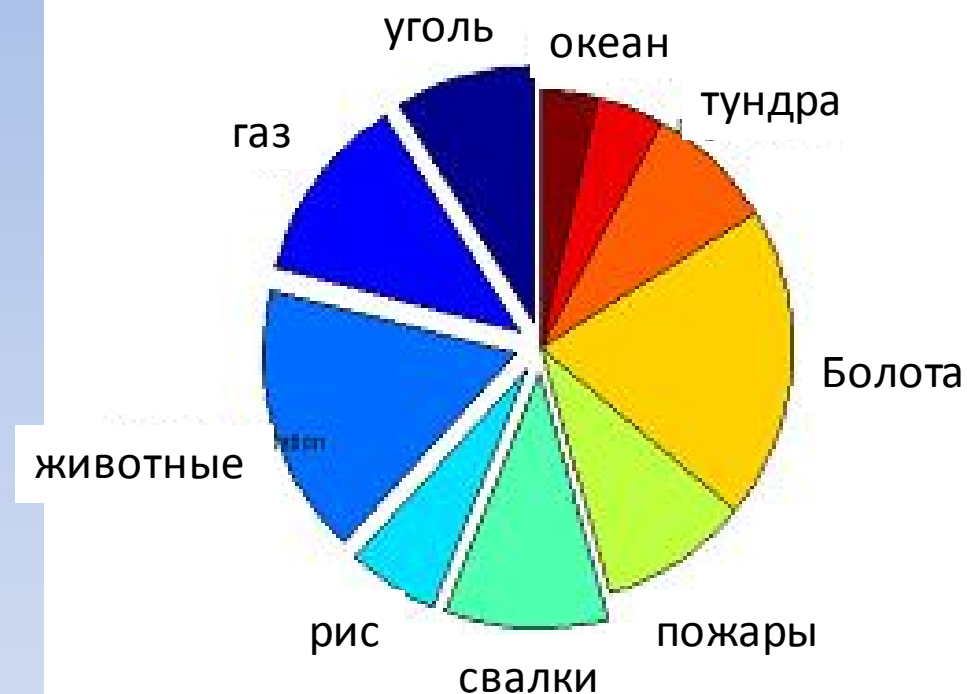
Итого: 525

Стоки:

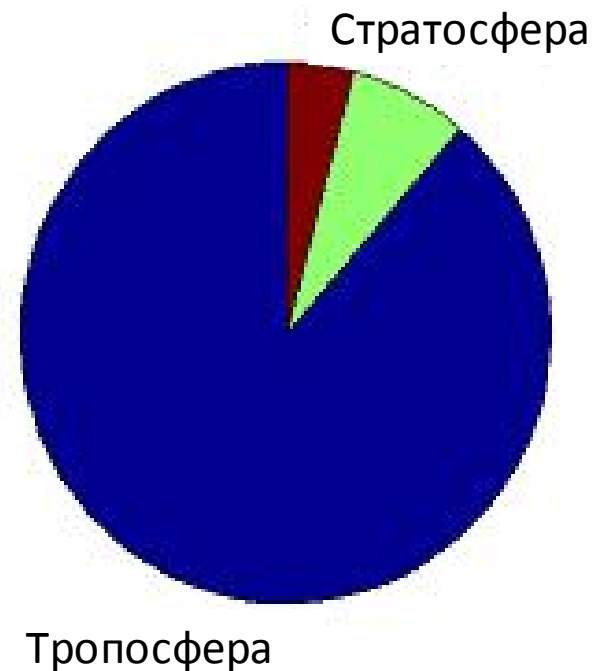
Поглощение в тропосфере	Поглощение в стратосфере	В почве
448	37	21

Итого: 506

Источники



Стоки



Основной современный источник метана – микробиологические процессы (болота, как естественные, так и искусственные рисовые поля), а также жвачные животные и свалки. Газовые факелы и угольные разработки – пример выделения древнего метана. Метан, выделяемый океаном (газогидраты), очень мал – только несколько процентов.

Источники и стоки метана в атмосфере

Источники:

Естественные

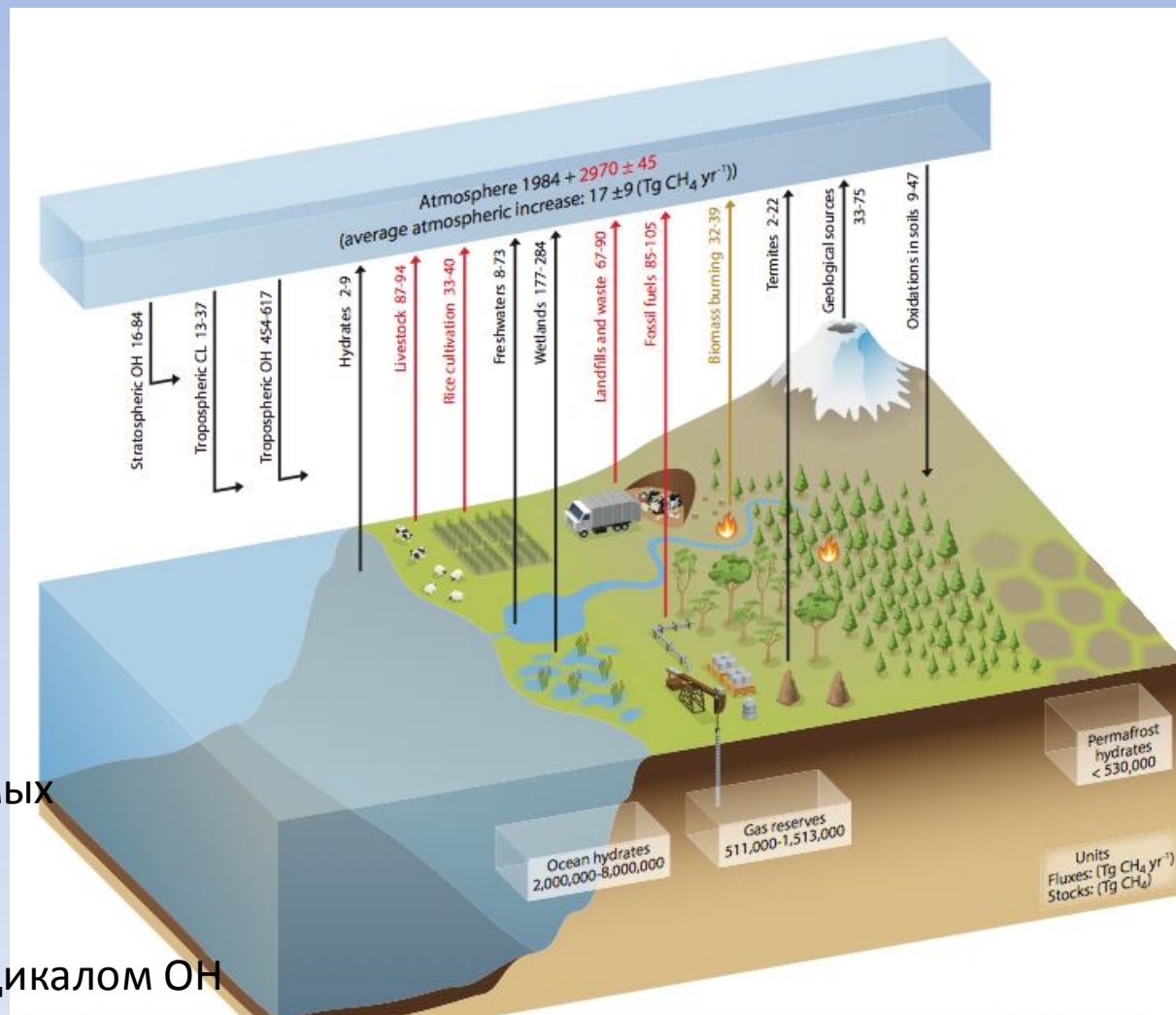
- Болота
- Озера
- Термитники
- Вулканы
- Лесные пожары
- Метаногидраты

Антропогенные

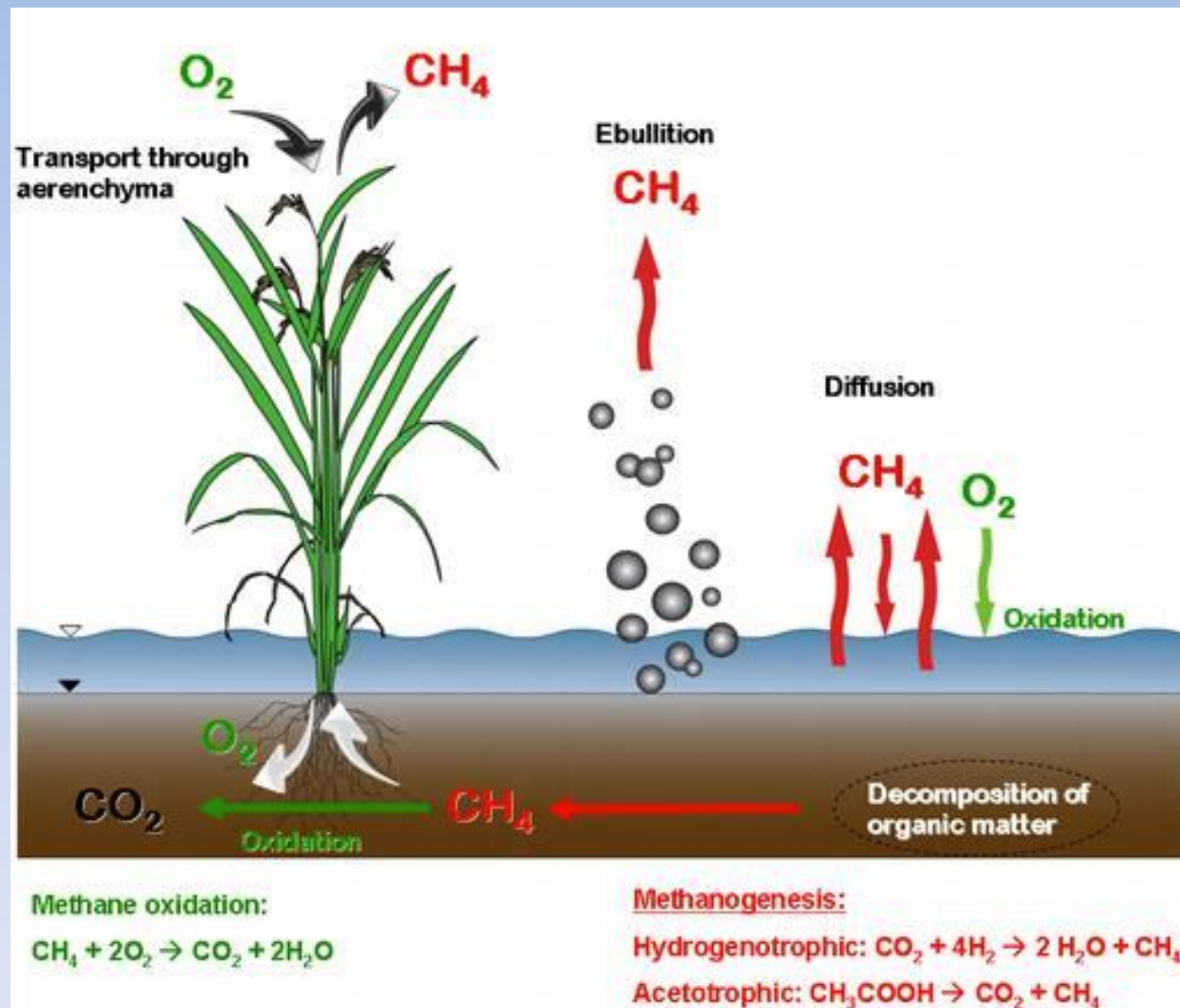
- Крупный рогатый скот
- Рисовые чеки
- Мусорные свалки
- Добыча полезных ископаемых

Стоки:

- Окисление в атмосфере радикалом OH
- Окисление в почвах



Как метан выделяется из болот

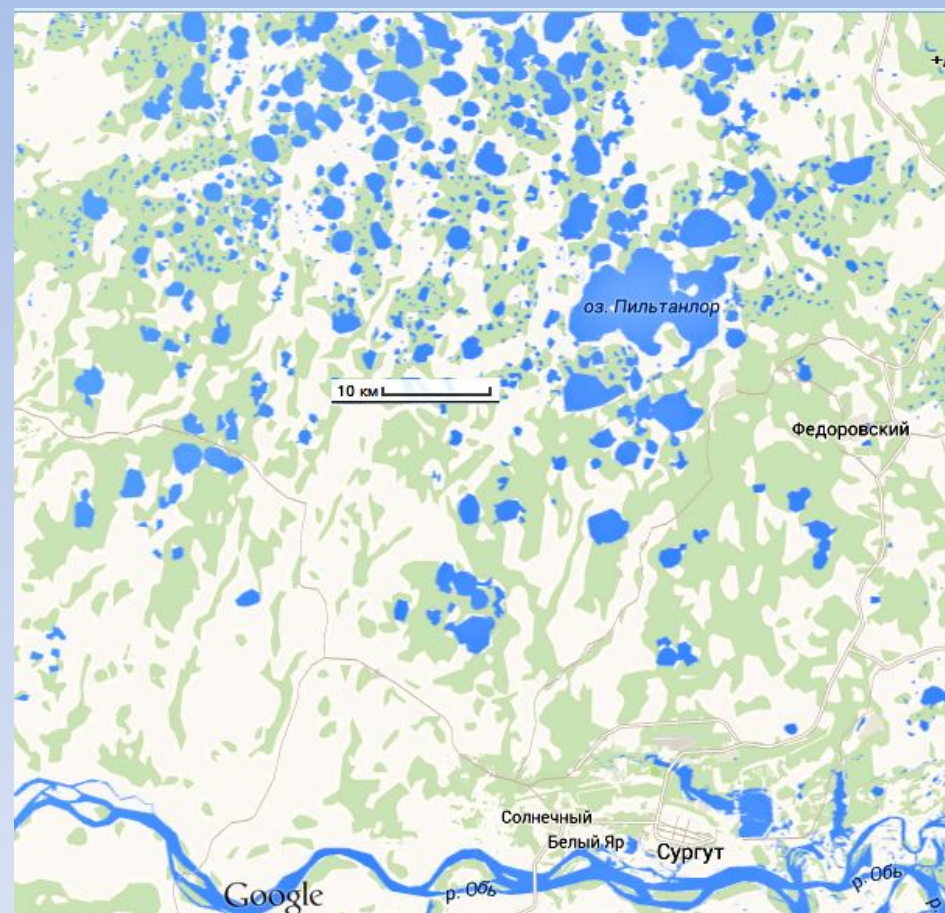
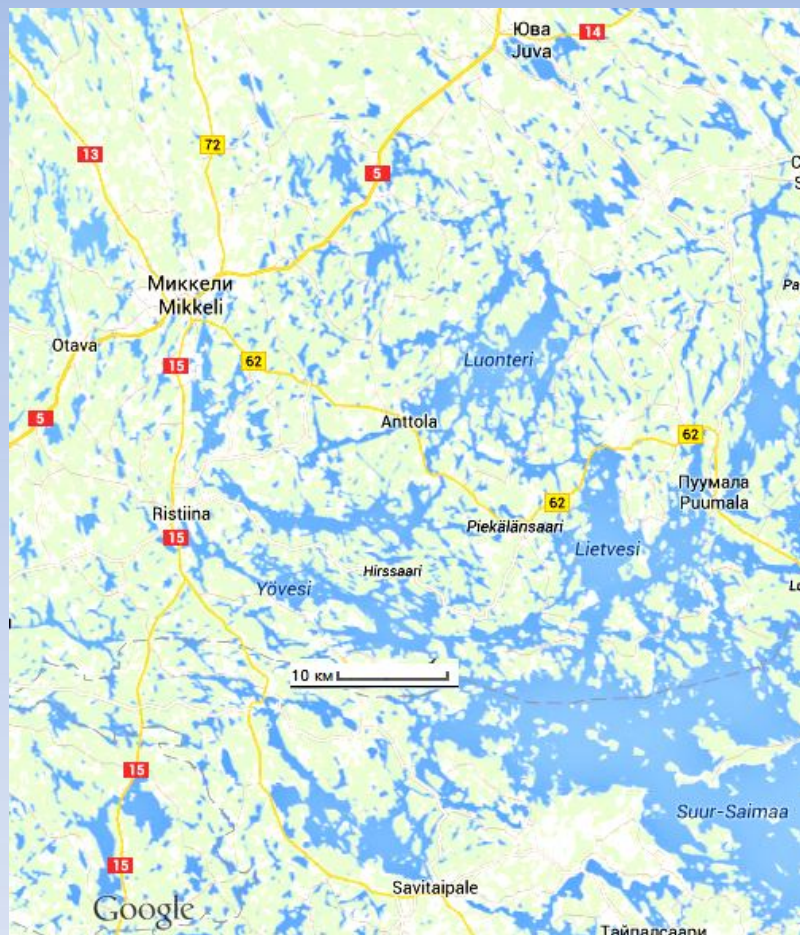


Едома



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)

Общее количество озер с площадью менее 10 км² составляет 99,9 % от числа внутренних водоемов на поверхности Земли, а их суммарная территория составляет 54% от общей площади внутренних водоемов



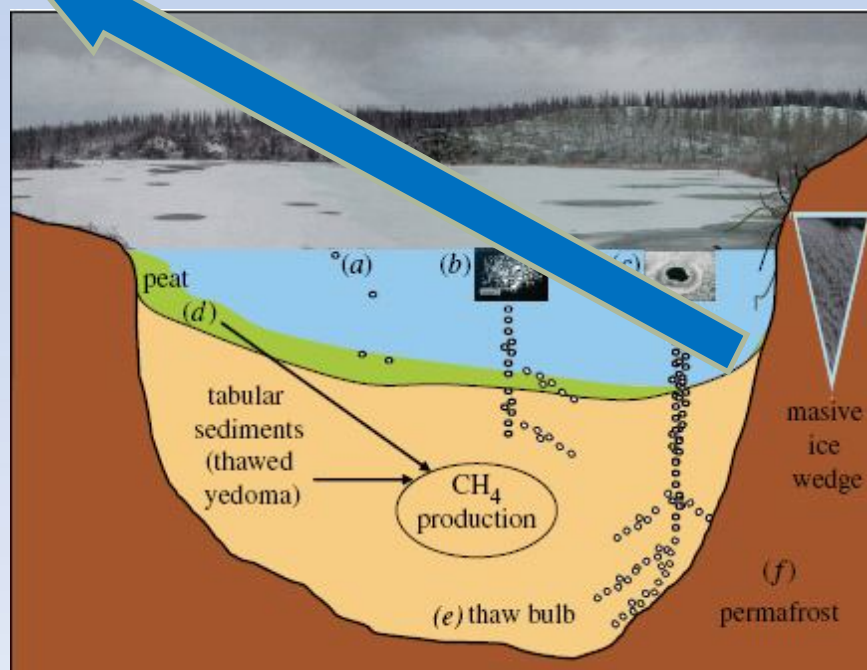
Эмиссия метана термокарстовыми озерами



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



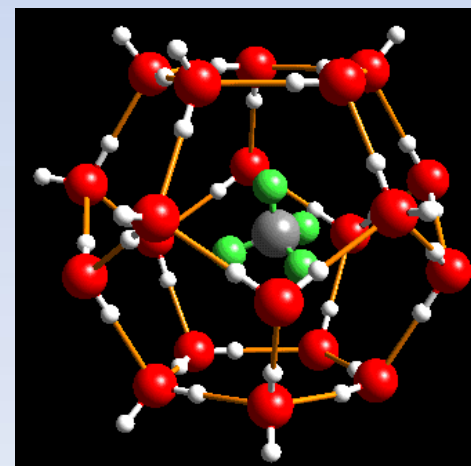
Интенсивный источник ("hotspot") – может быть источником значительную часть зимы



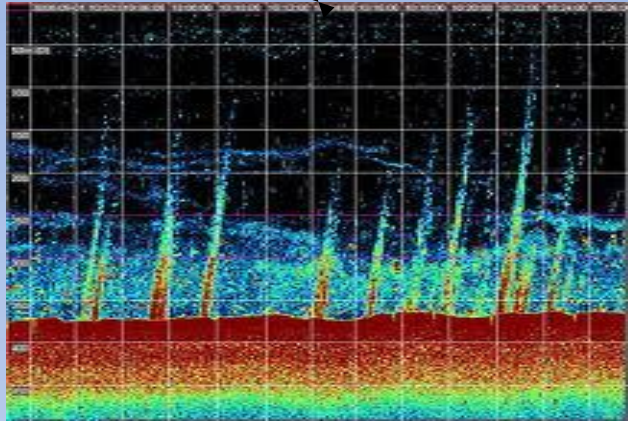
- 8 - 50% от антропогенной эмиссии метана в XXI веке в зависимости от сценария МГЭИК (К. Walter et al., 2006, *Nature*)

Метаногидраты

- ❑ Кристаллическая структура формируется молекулами воды, внутри каркаса которой находится молекула метана (обычно 1 моль CH_4 приходится на 5.75 молей H_2O)
- ❑ Устойчив при высоких давлениях и низких температурах
- ❑ 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 кг/м^3



Метаногидраты

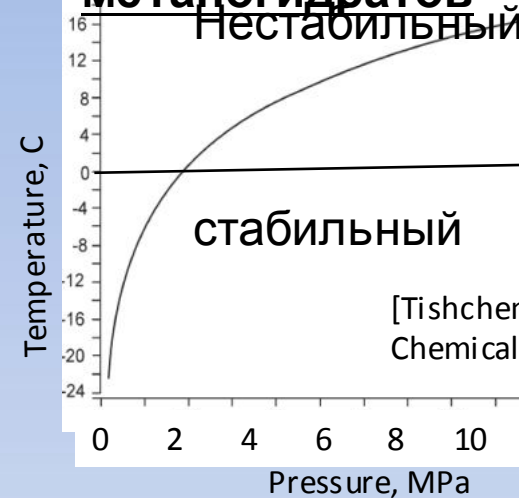


Пузырьки метана со дна океана
около Шпицбергена (Источник:
National Oceanography Centre,
Southampton)

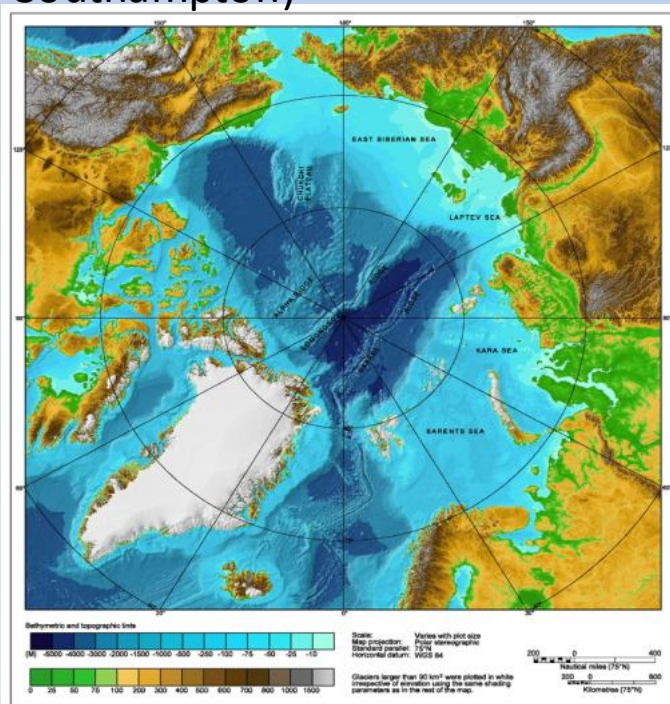


“Горючий
лед”

Фазовая диаграмма метаногидратов



[Tishchenko P., et al.,
Chemical Geology. 2005].

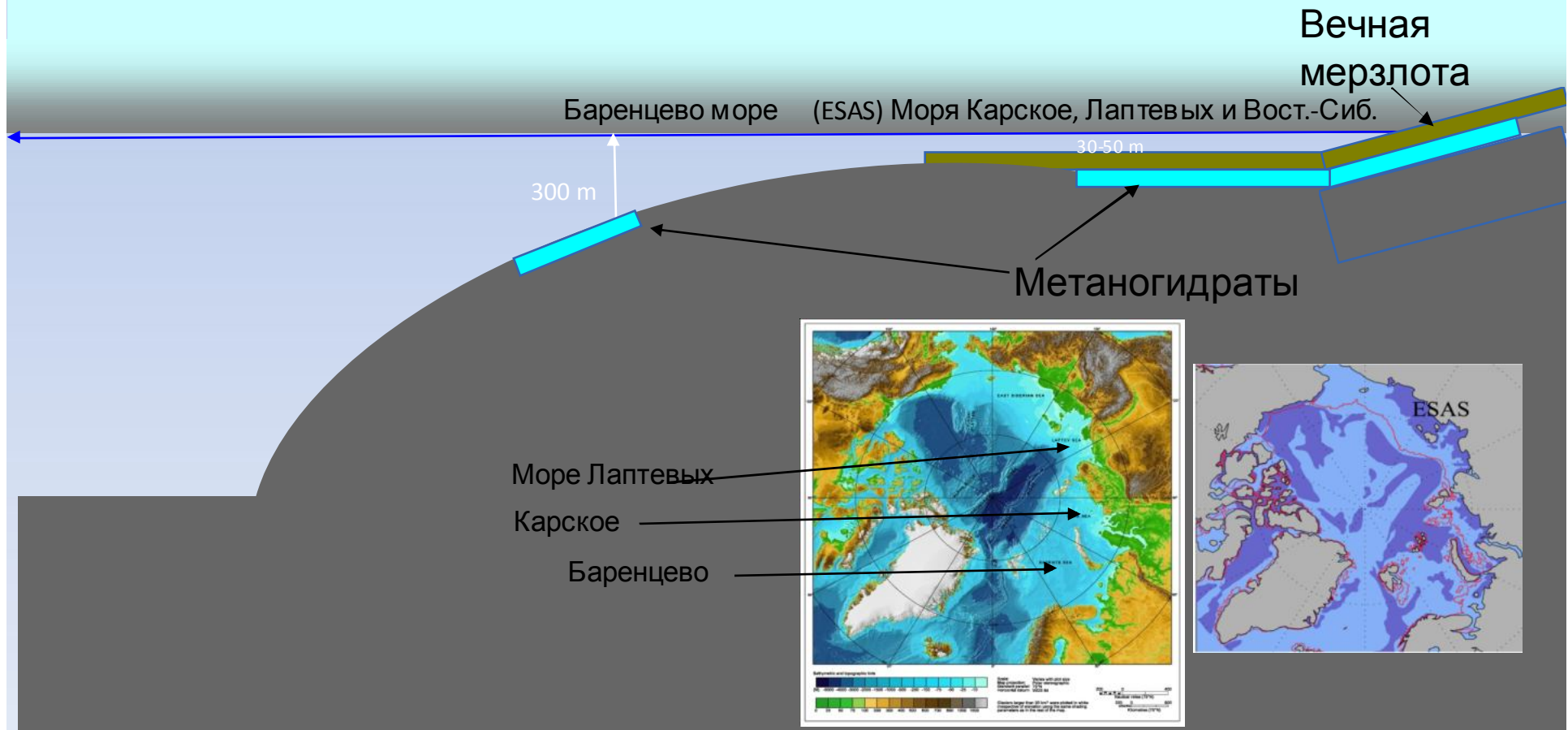


**Положение
метаногидратов по
расчетам
Соловьева и др., 1987**

Разрушение
метаногидратов
может привести к
выбросу **2000 Pg CH₄**:
**в глобальной
атмосфере ~5 Pg
CH₄**

Упрощенная схема метаногидратов в Арктике

Расчеты показывают, что метаногидраты могут находиться в стабильном состоянии либо на глубинах больше 300 м, либо под слоем вечной мерзлоты



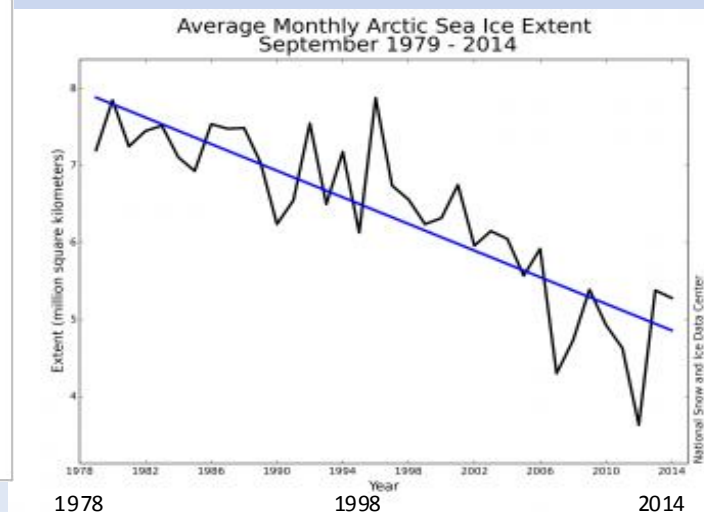
почему Арктика?

Скорость потепления Арктики в 2 раза
превышает скорость глобального
потепления

Температура



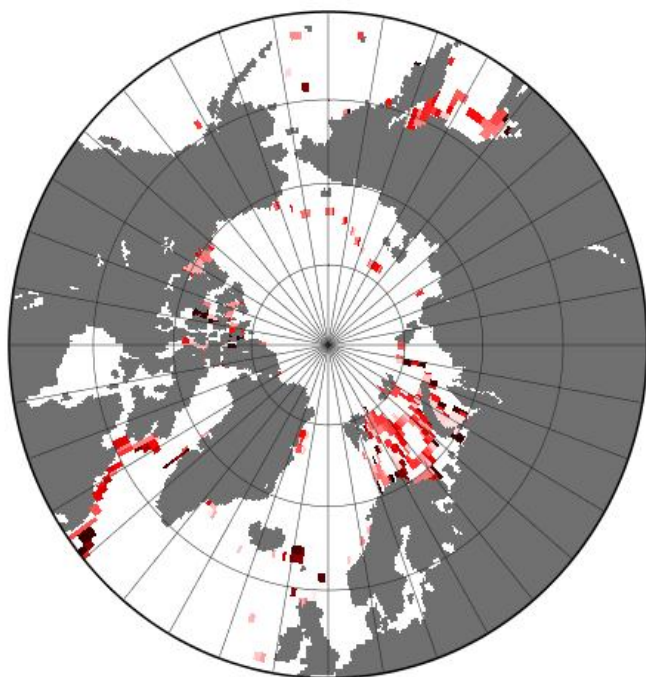
Площадь морского льда в сентябре



Оценки стабильности запасов субаквальных гидратов

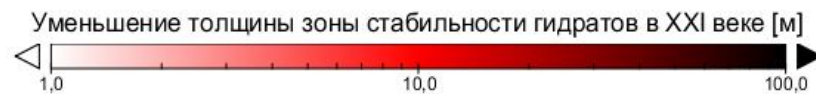
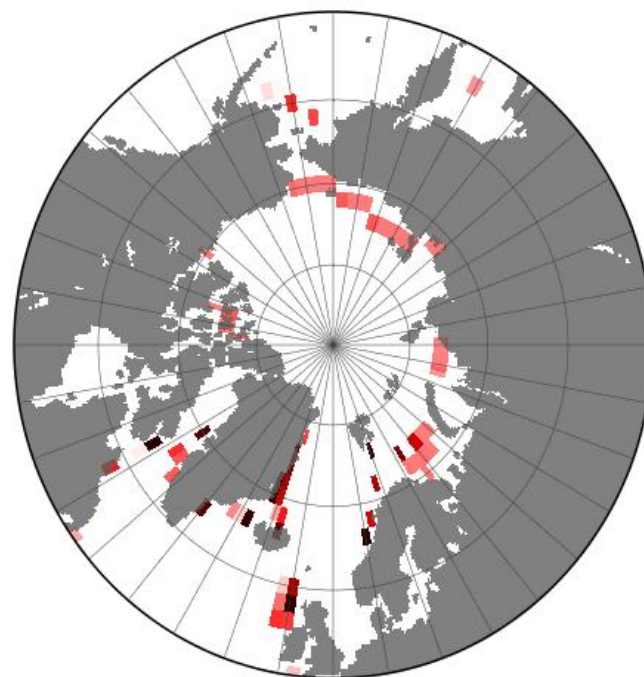
климатическая модель GFDL / модель донных отложений ИФА РАН

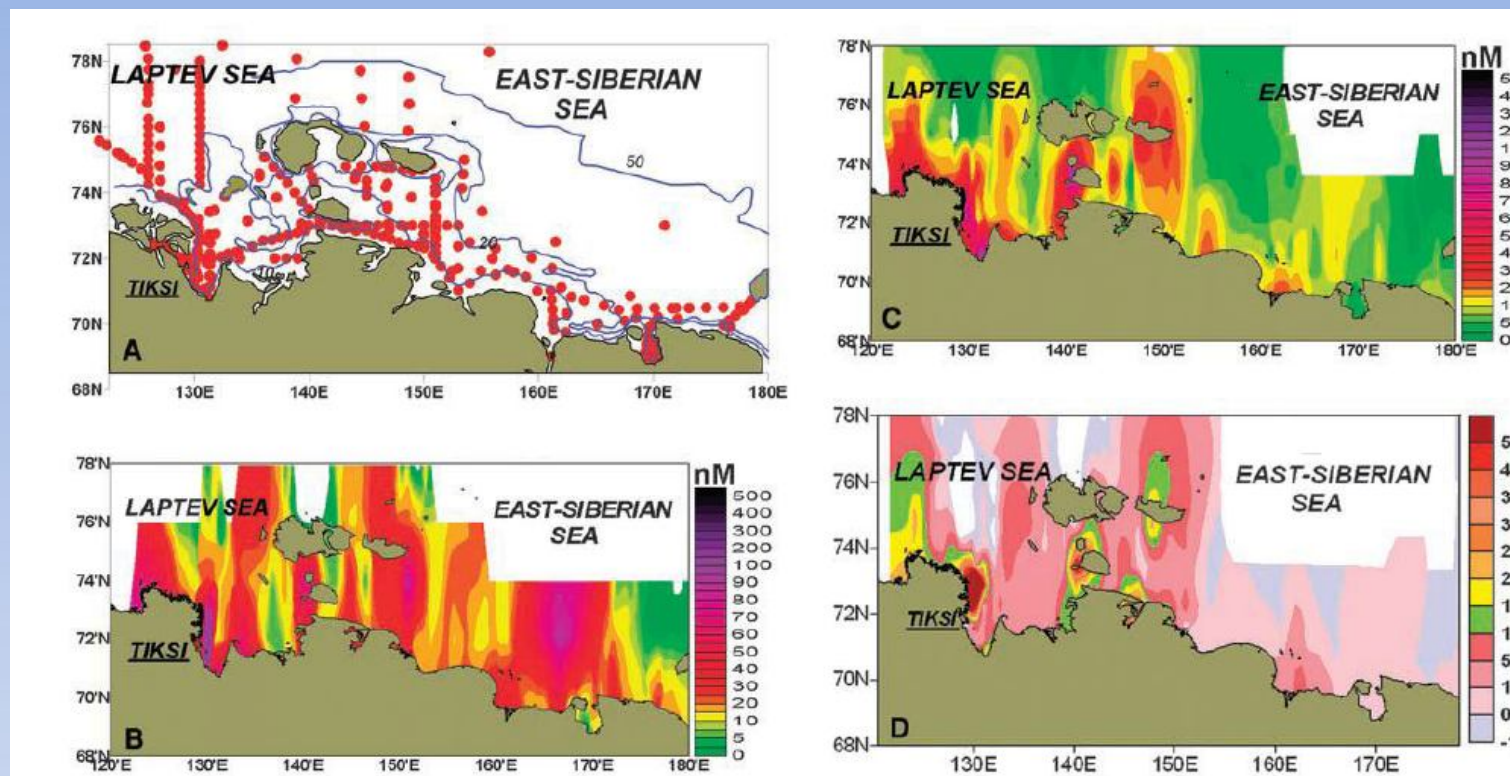
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2



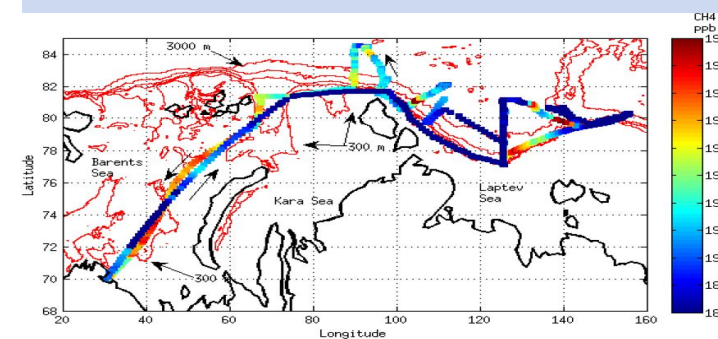
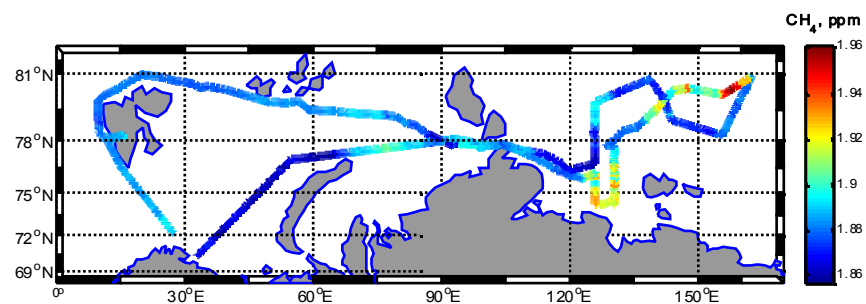
климатическая модель ИВМ РАН / модель донных отложений ИФА РАН

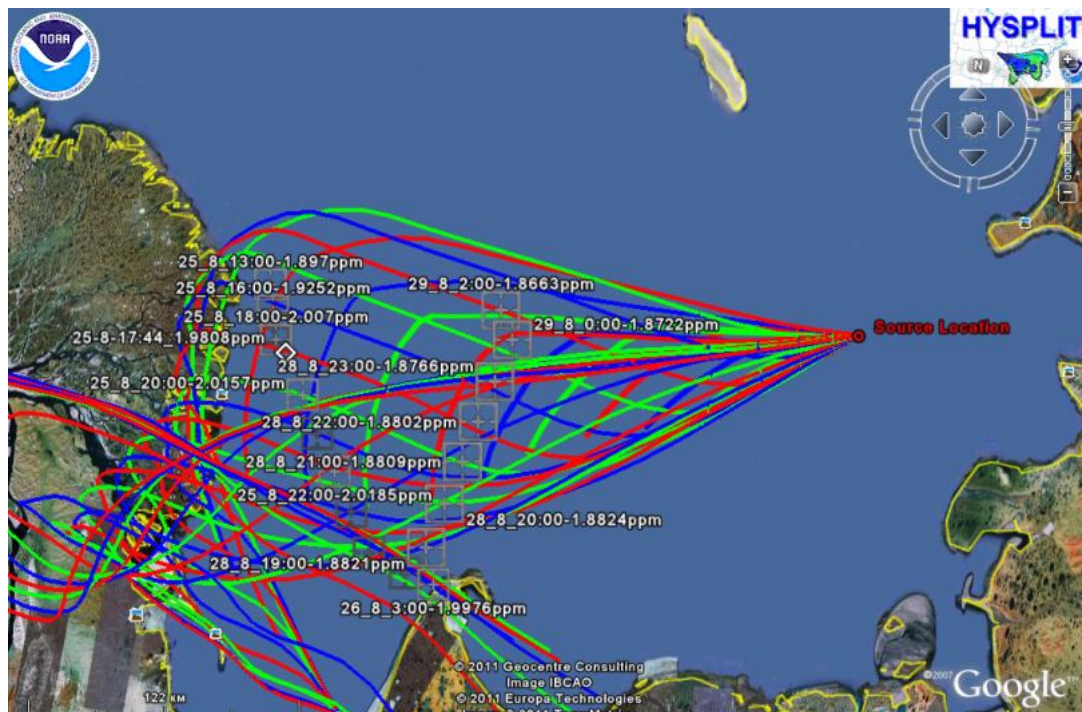
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2



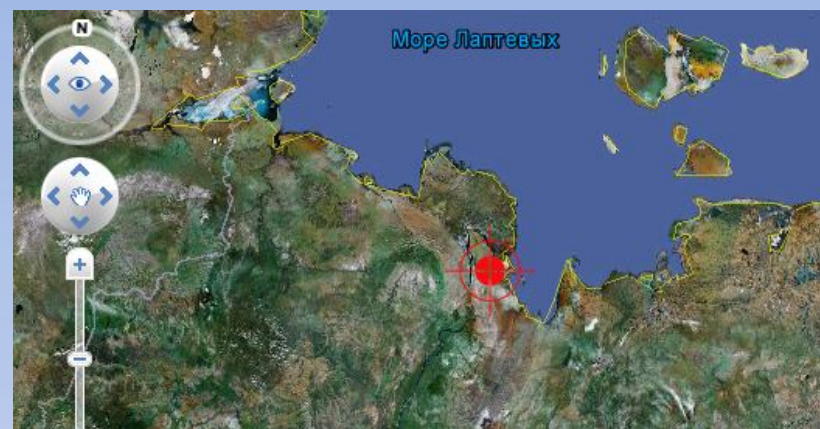
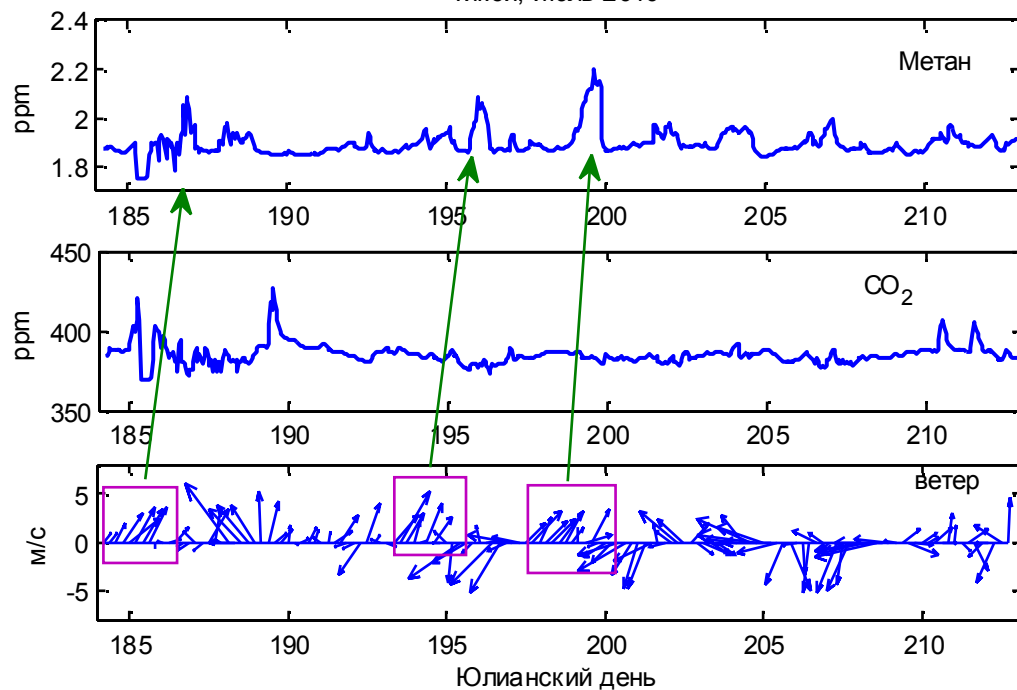


Shakhova et al, 2010





Тикси, июль 2010



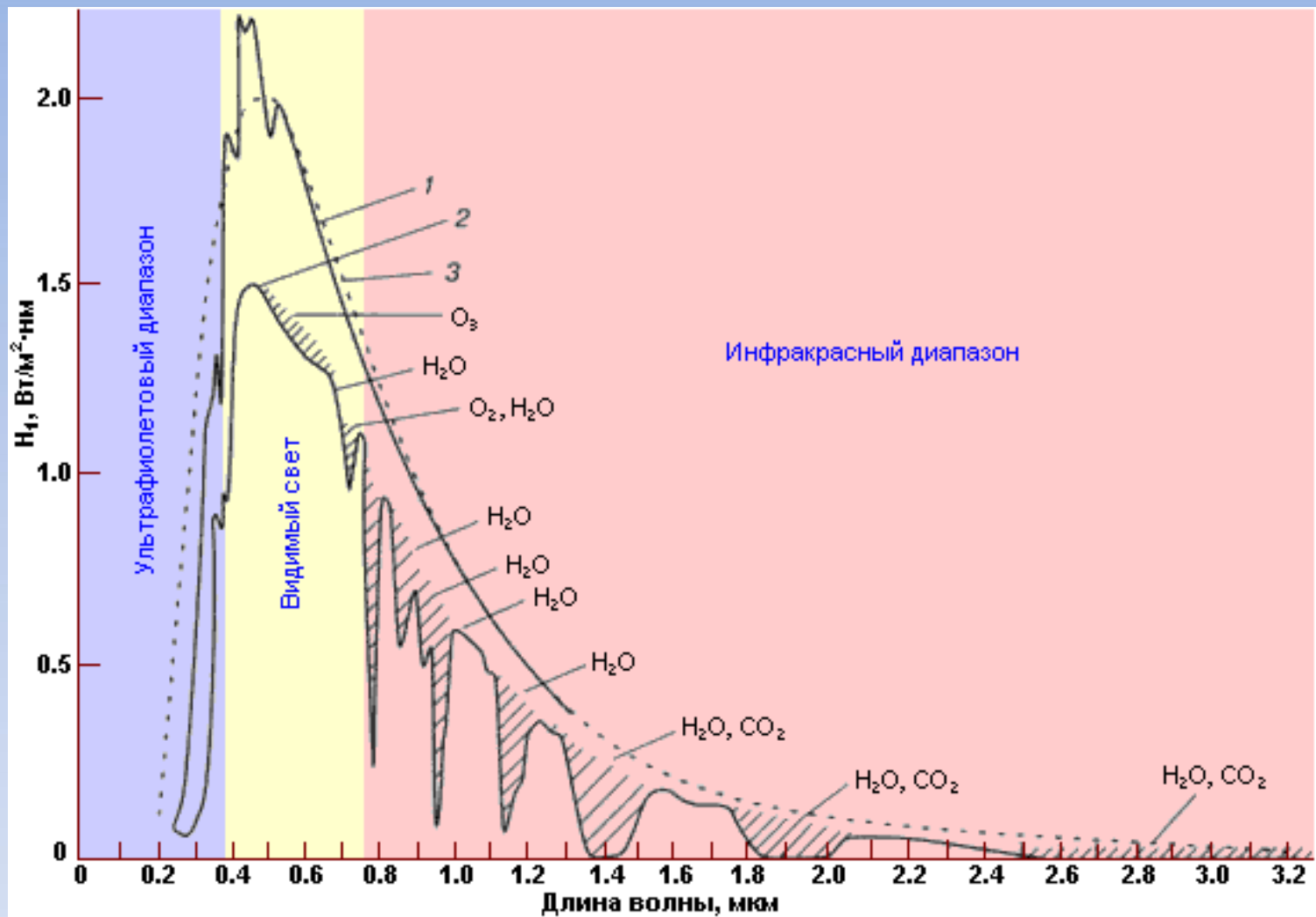
Обнаружено увеличение концентраций метана при ветре, направленном со стороны моря. По данным судовых наблюдений было рассчитано вероятное расположение источника метана в море Лаптевых. Наблюдалось регулярное увеличение концентраций метана при направлении ветра со стороны предполагаемого источника. Предполагаемая рассчитанная мощность источника 170 – 380 мг/м²/сут.

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)

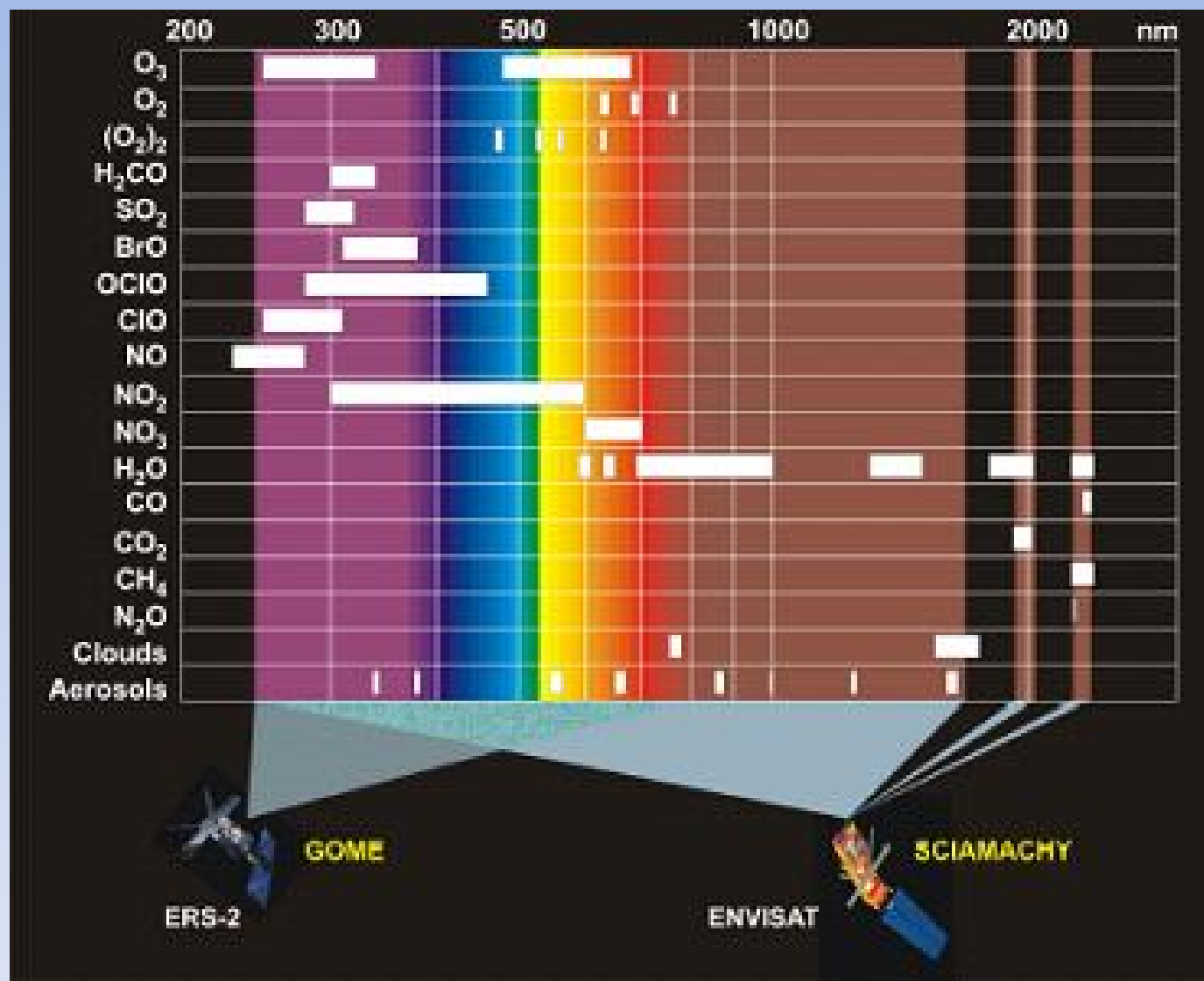
Аргументы «против»

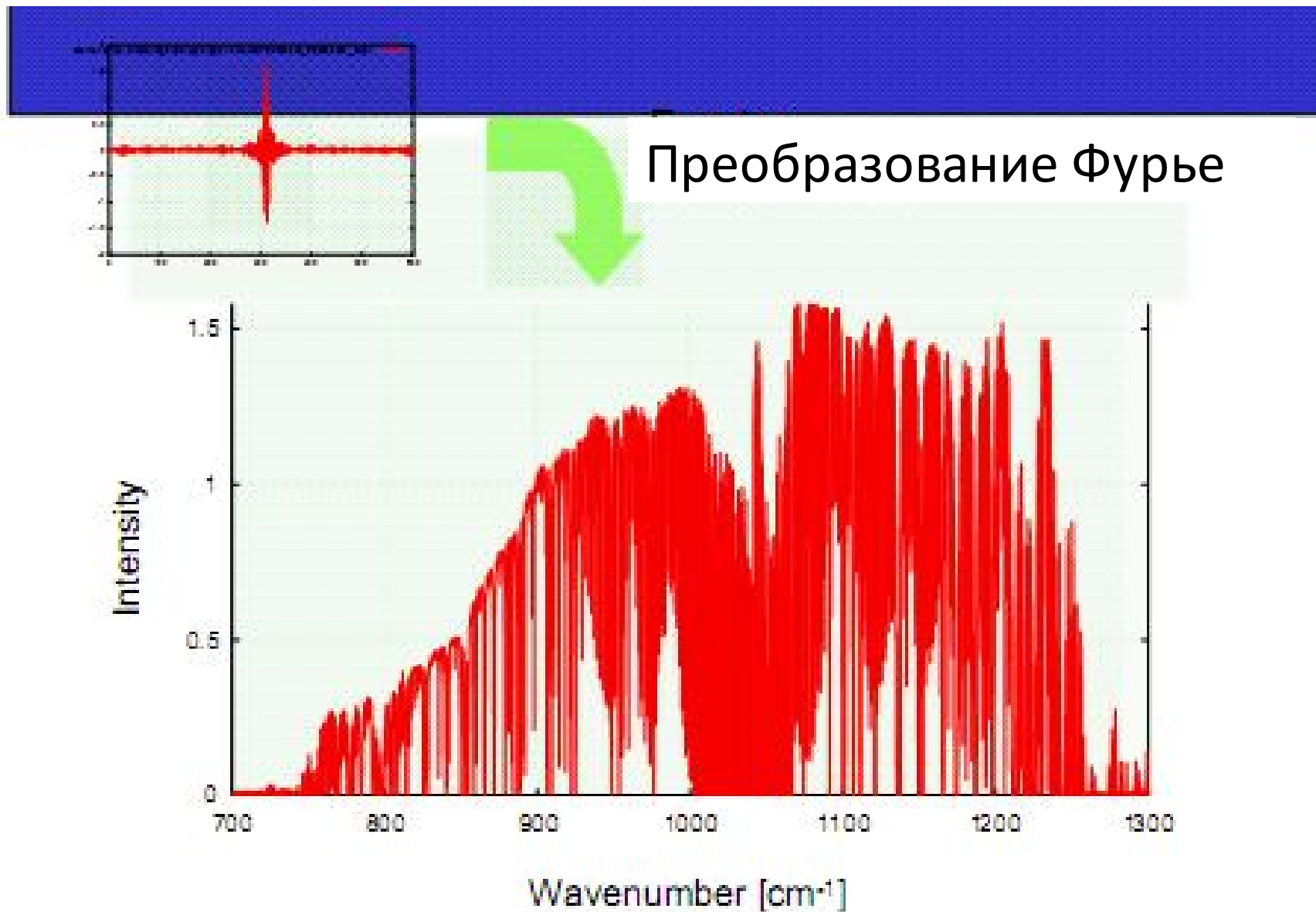
- Метаногидраты залегают (если залегают!) на глубине 200 м под шельфом, и потепление климата такой глубины достигнет очень нескоро (не в ближайшие ~100 лет) – это показывают данные моделирования
- Выделение метана также приурочено к устьям великих Сибирских рек, так что метан может происходить из разложения выносимого ими материала
- Очень мало данных о ФАКТИЧЕСКОМ распределении метана под океаном



- 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.

Окна поглощения для разных газов





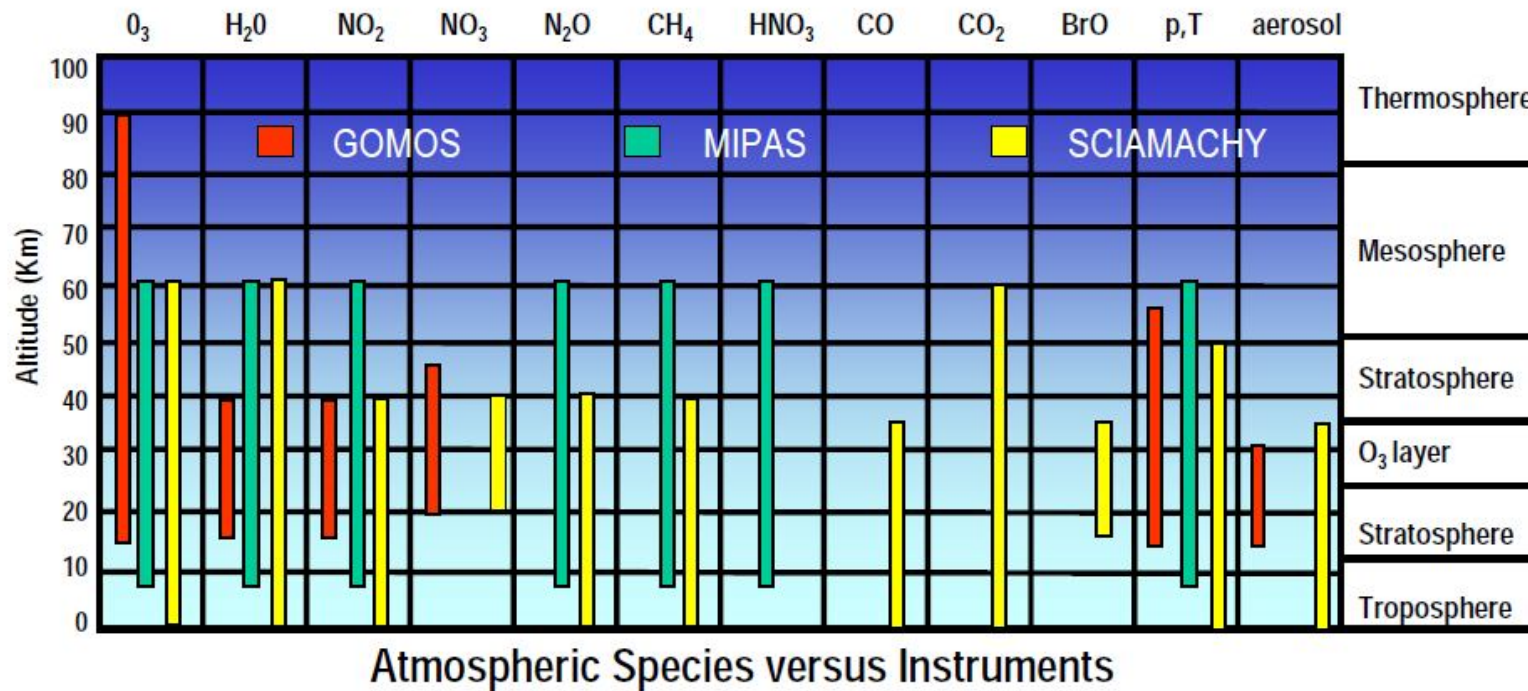
Метод определения концентраций газов

Современные спутниковые наблюдения газового состава атмосферы

Инструмент	Спутник	период	покрытие (сут.	O ₃	SO ₂	Аэр	NO ₃	H ₂ O	CO	CH ₄	CO ₂
TOMS	Nimbus7 ADEOS Earth probe	1978-1992 1996-1997 1996-	1	+	+	+	+	+			
GOME	ERS-2	1995-2003	3	+	+						
IMG	ADEOS	1996-1997	разное						+	+	
MORRIT	Terra	2000-	3.5							+	
MIRS	Terra	2000-	7			+					
MODIS	Terra Aqua	2000- 2002-	2			+					
SCIAMACHI	Envisat	2002-2012	6	+	+	+	+	+	+	+	+
ACE-FTS	SCISAT	2003-		+			+	+	+	+	
MLS	Aura	2004-							+		
OMI	Aura	2004-	1	+	+	+	+	+	+	+	+
TES	Aura	2004-						+	+		
PARASOL	PARASO L	2004-	1			+					
AIRS	AQUA	2007						+	+	+	+
GOME-2	MetOp	2006-	1	+	+	+	+	+			
IASI	MetOp	2006-	0.5					+	+	+	+
OCO	OCO	2008?	1								+

Миссия ENVISAT

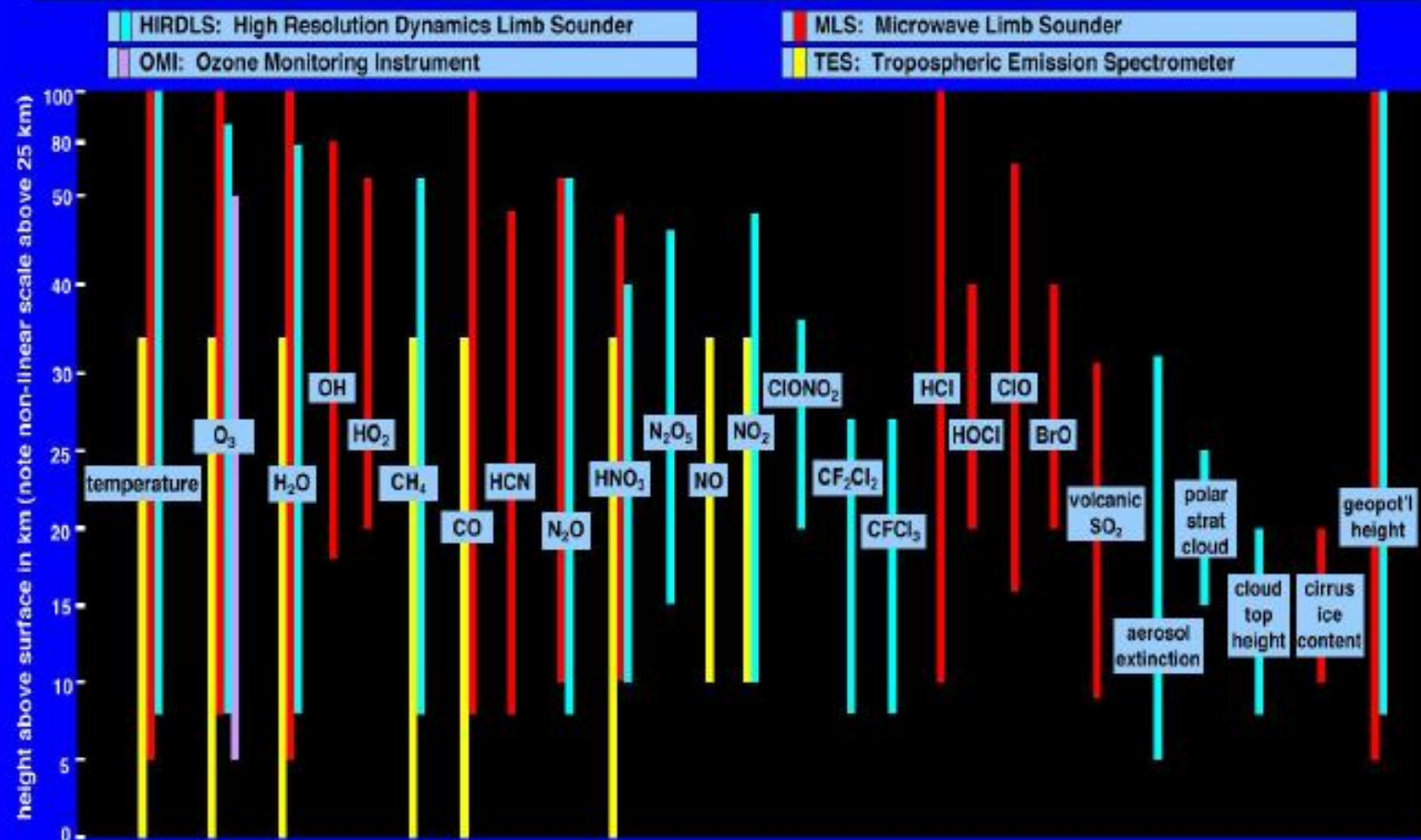
GOMOS → Global **O**zone Monitoring by Occultation of Stars
 MIPAS → Michelson Interferometric Passive **A**tmospheric **S**ounder
 SCIAMACHY → Scanning Imaging **A**bsorption **S**pectrometer for Atmospheric Cartography



EOS Aura Atmospheric Profile Measurements

OMI also measures UVB flux, cloud top/cover, and column abundances of O_3 , NO_2 , BrO , aerosol and volcanic SO_2

TES also measures several additional 'special products' such as $ClONO_2$, CF_2Cl_2 , $CFCI_3$, N_2O and volcanic SO_2



SCIAMACHY Viewing Modes

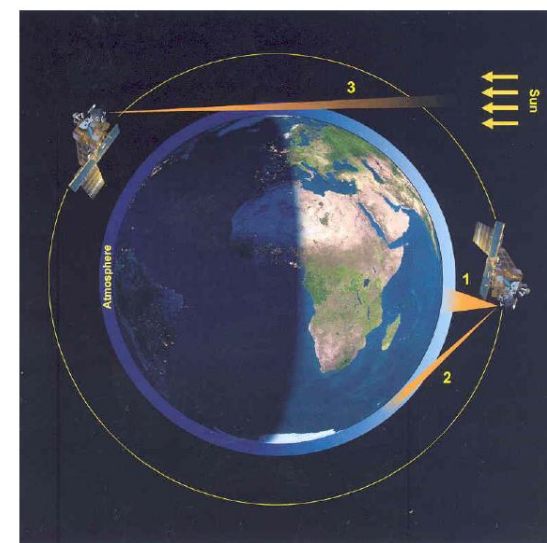
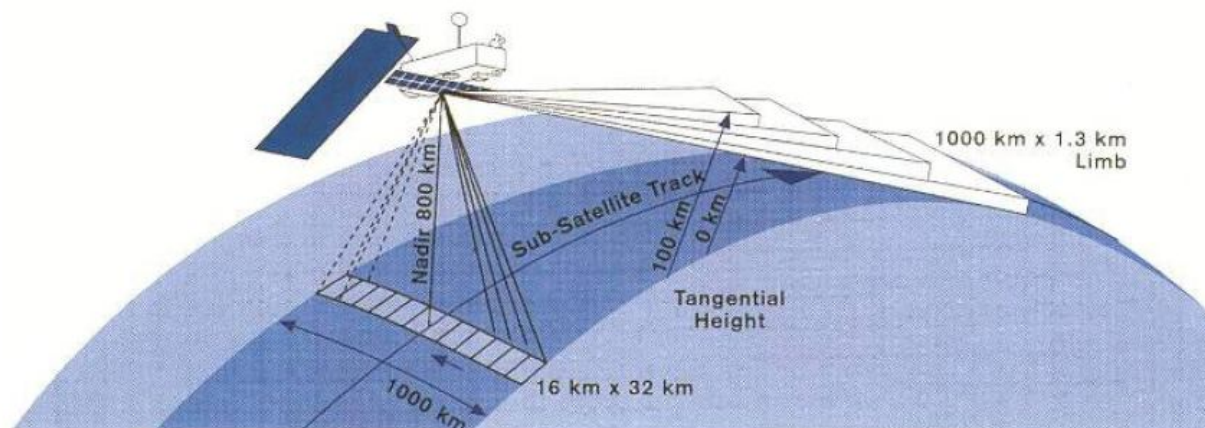
Различные углы обзора

220-1750 нм и два ИК канала

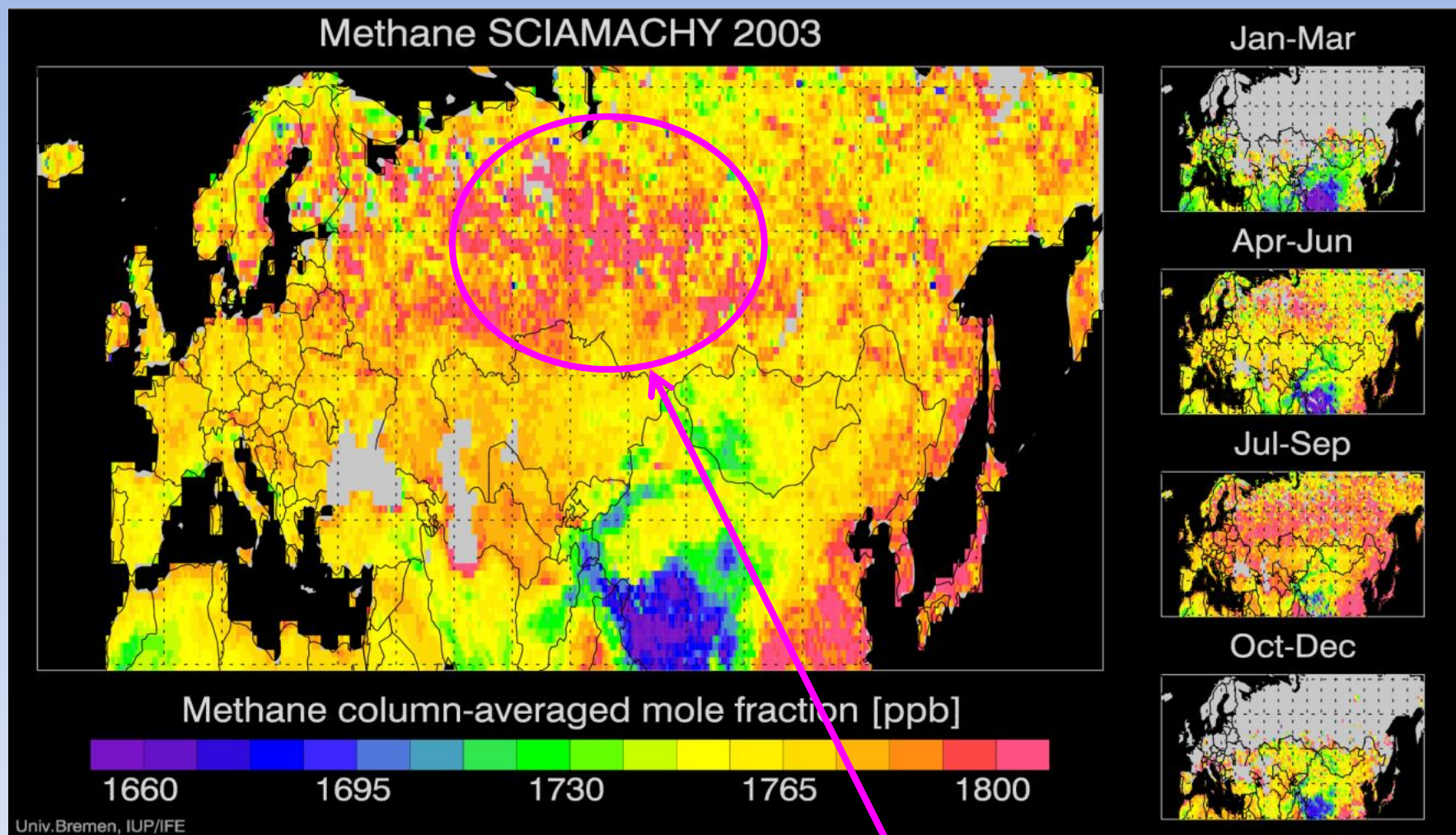
Поверхность: альbedo, ультрафиолет

Тропосфера: O₃, NO₂, Br, CH₄, H₂, H₂O, SO₂, аэрозоль

Стратосфера: O₃, NO₂, N₂O, CO, CO₂, CH₄, аэрозоль



Спутниковые данные о концентрациях метана



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)

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

Maximum of methane concentration over Western Siberia indicates high surface emissions

Два типа спутниковых спектрометров

$T \sim 6000 \text{ K}$

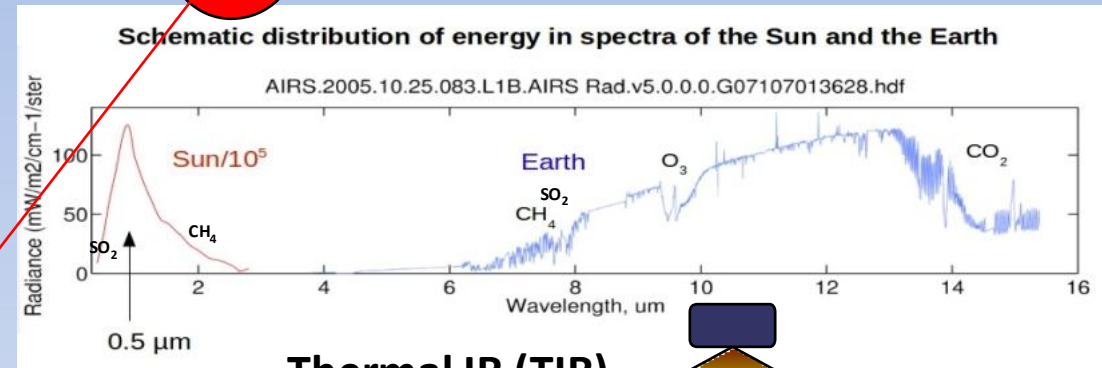
Излучение Солнца
отраженное от земной
поверхности

Тепловое излучение земной
поверхности и атмосферы

OMI, SCIAMACHY,
OMPS, etc

Short Wave IR (SWIR)
or Near IR (NIR)

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



Thermal IR (TIR)

AIRS, IASI, CrIS, etc

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

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 ночи) 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.

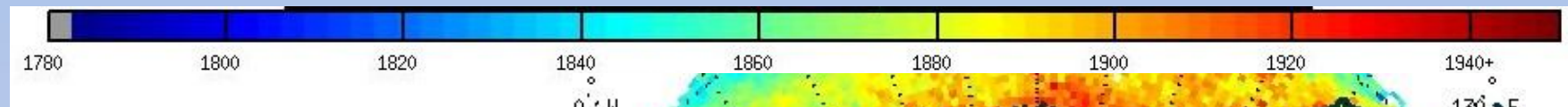
IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) /Metop-1 – интерферометр, созданный в Европе, на орбите с 2007 года, сейчас поступают данные с IASI-1 и IASI-2.

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

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

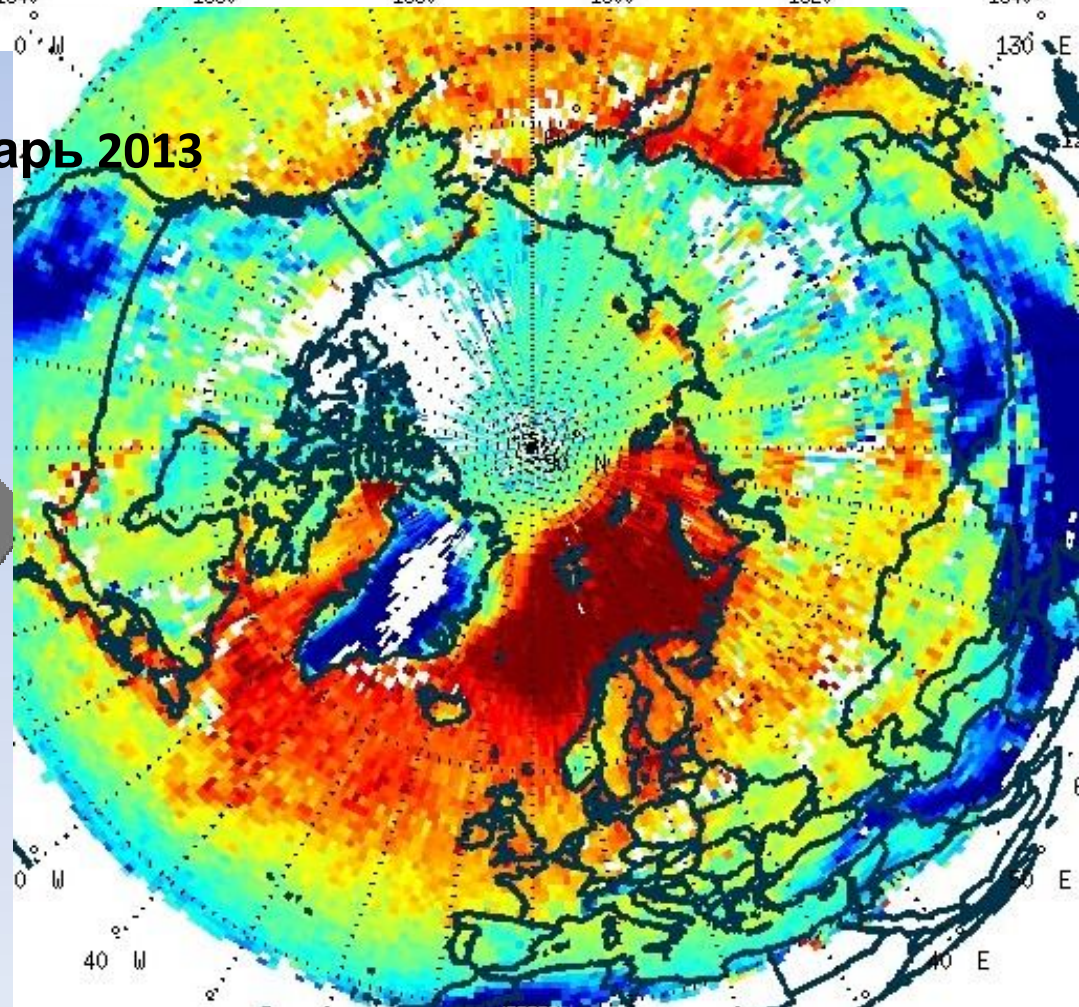
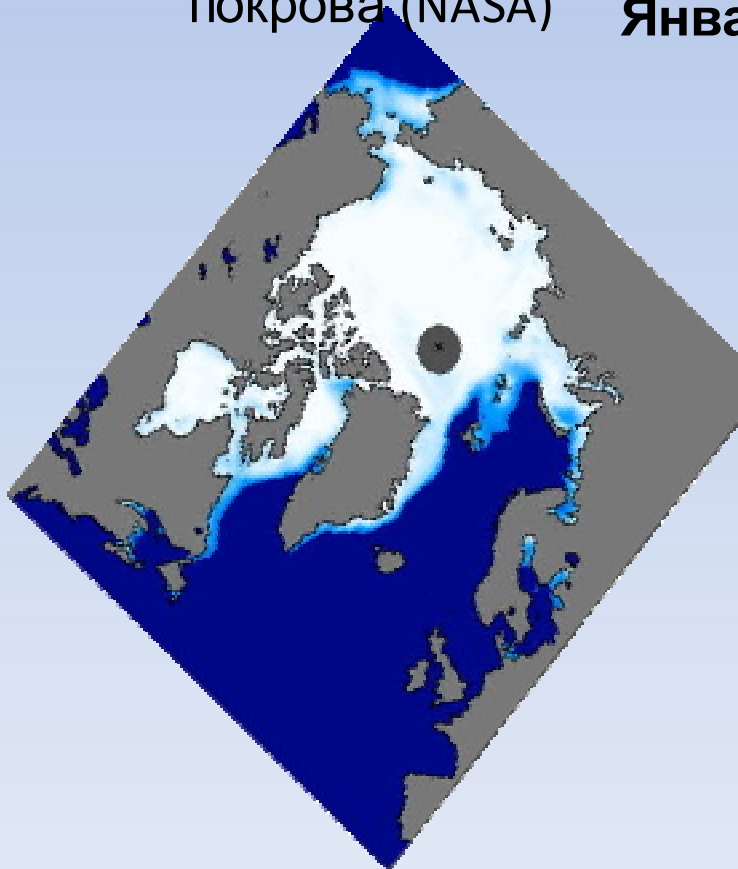
У IASI лучшее спектральное разрешение, чем у AIRS, а также лучшая чувствительность в нижней части тропосферы (0-4 км.)

**IASI, L3, метан, осредненный от поверхности до 4 km
ВЫСОТЫ**



Карта ледяного
покрова (NASA)

Январь 2013



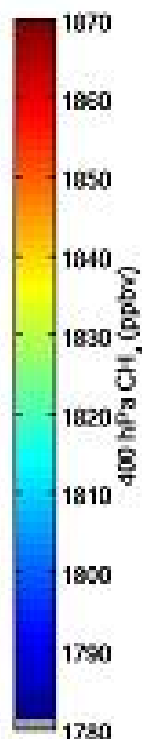
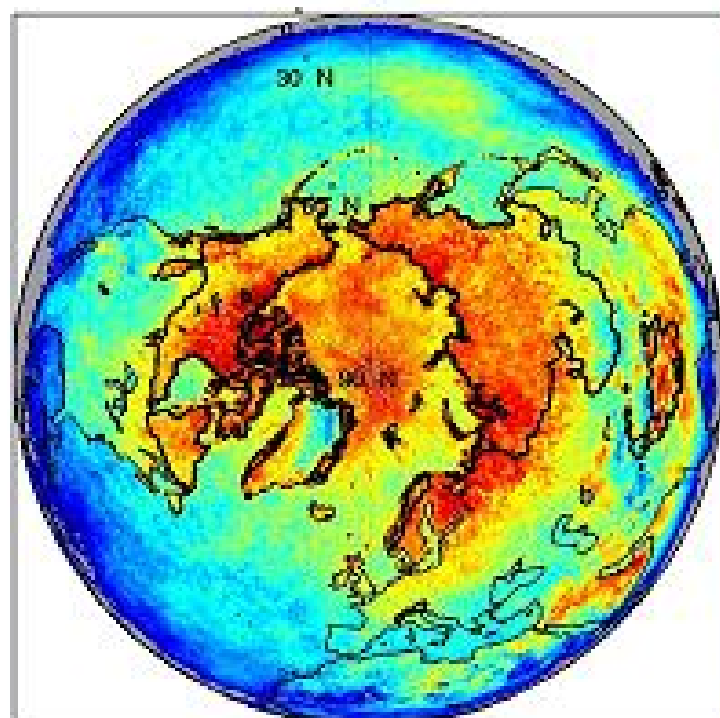
- **Что более важно? Эмиссия метана из океана или из арктической тундры?**
-
- Материковая вечная мерзлота тает, но подводная мерзлота тоже может освобождаться из-за глобального потепления.
- Эмиссия метана из-за таяния материковой мерзлоты может быть постепенной. Эмиссия метана из-за таяния подводной мерзлоты может быть как постепенной, так и носить взрывной характер.
- Данные о одновременном состоянии обеих систем практически отсутствуют .

Correlation between methane and permafrost distributions

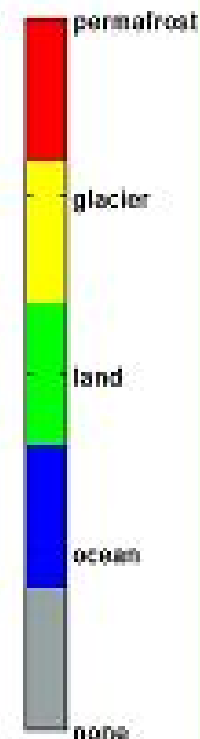
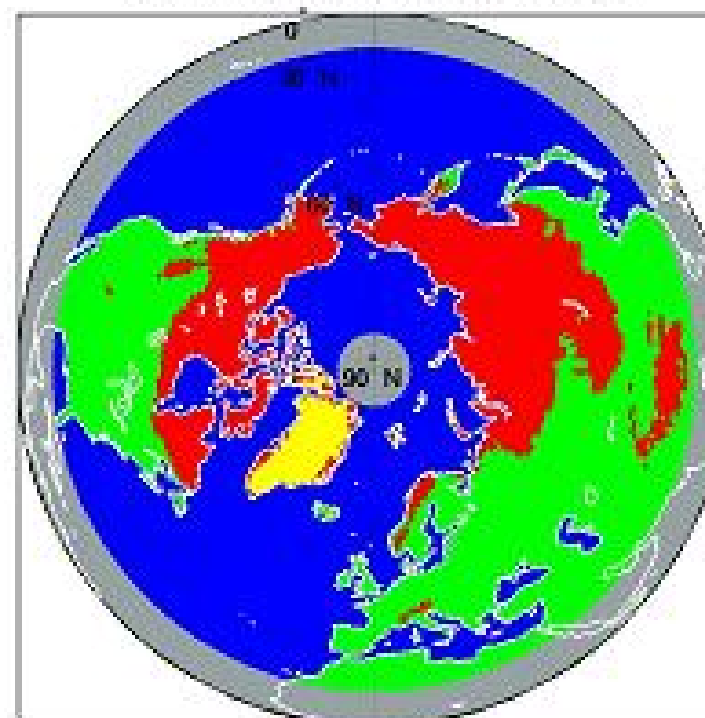
Methane, September 2008

Permafrost

AIRS CH₄: 09/2008



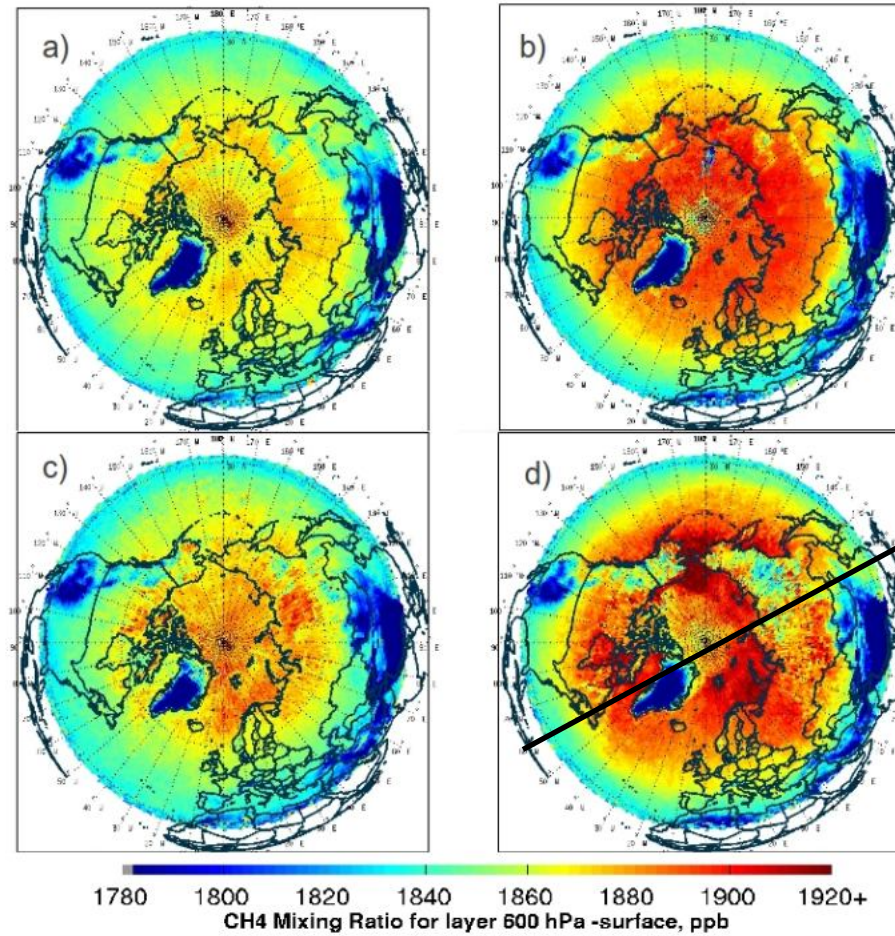
Northern Hemisphere Permafrost (1 degree)



Сентябрь, 2008

IASI CH₄,
нижняя
тропосфера,
600 hPa

ноябрь, 2008

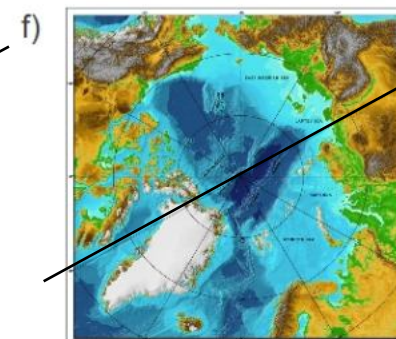
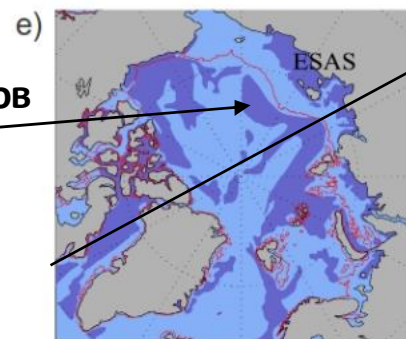


сентябрь, 2011

разрез

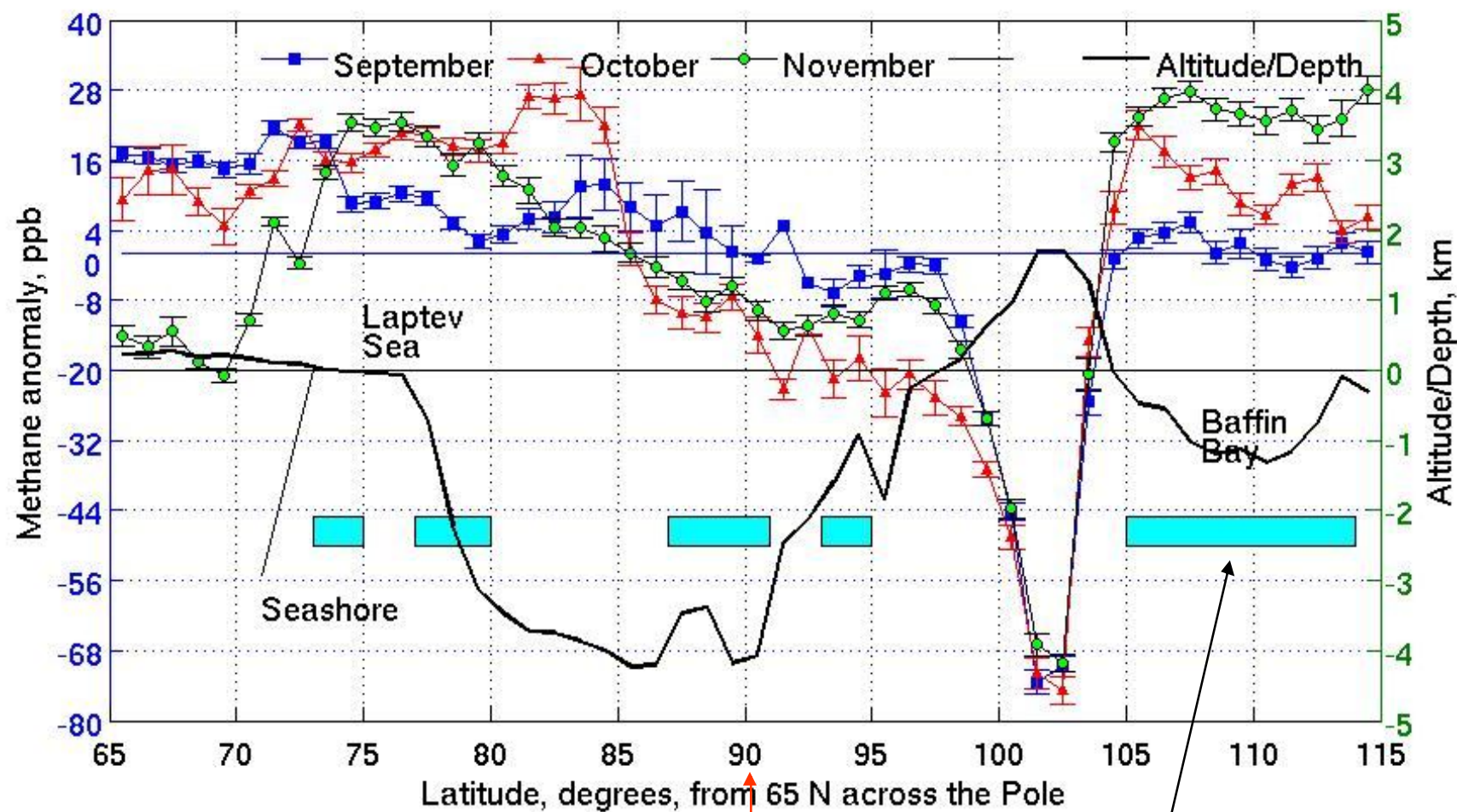
Ноябрь, 2011

Расположение гидратов

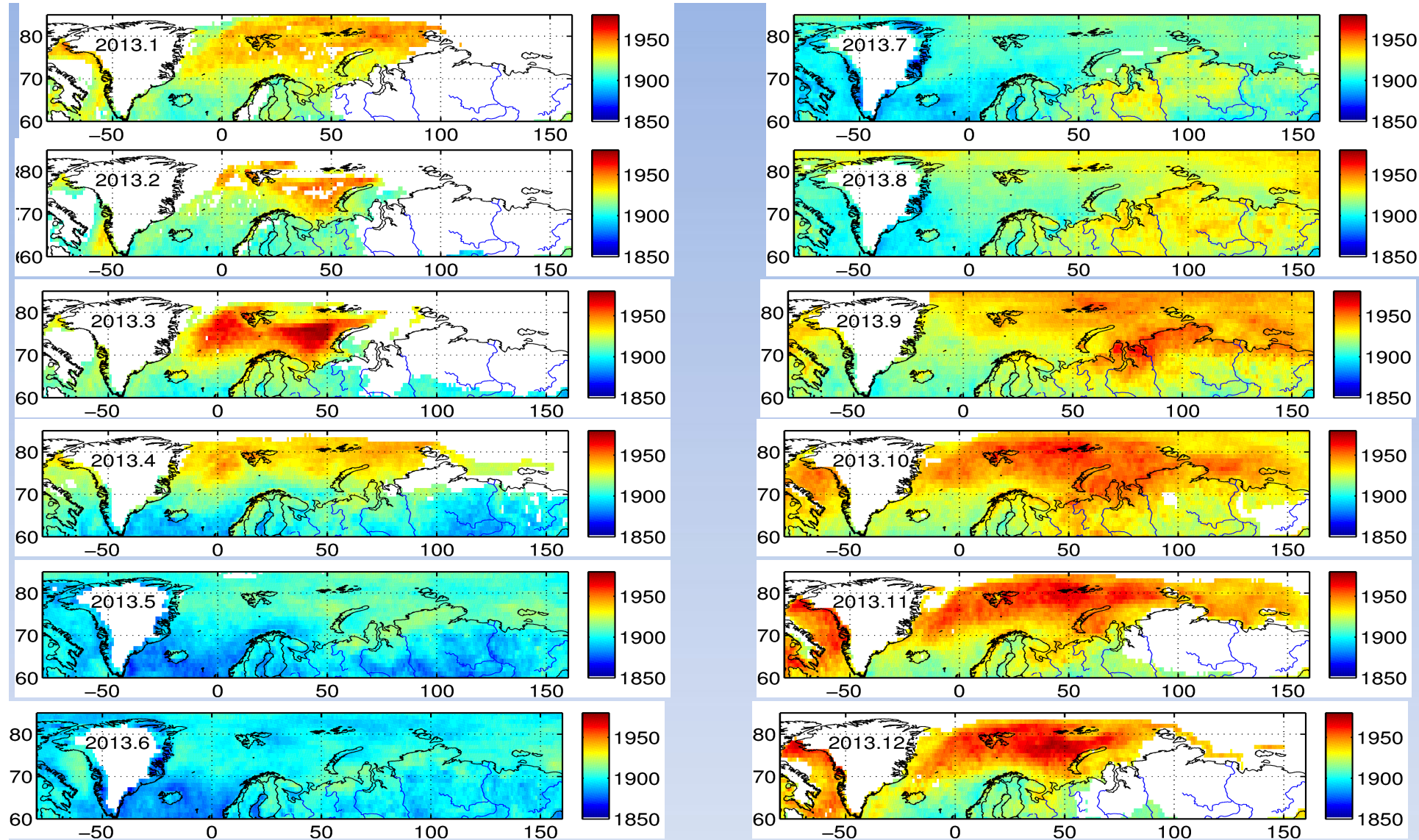


IASI CH₄ аномалии, нижняя тропосфера

Разрез через Северный ледовитый океан



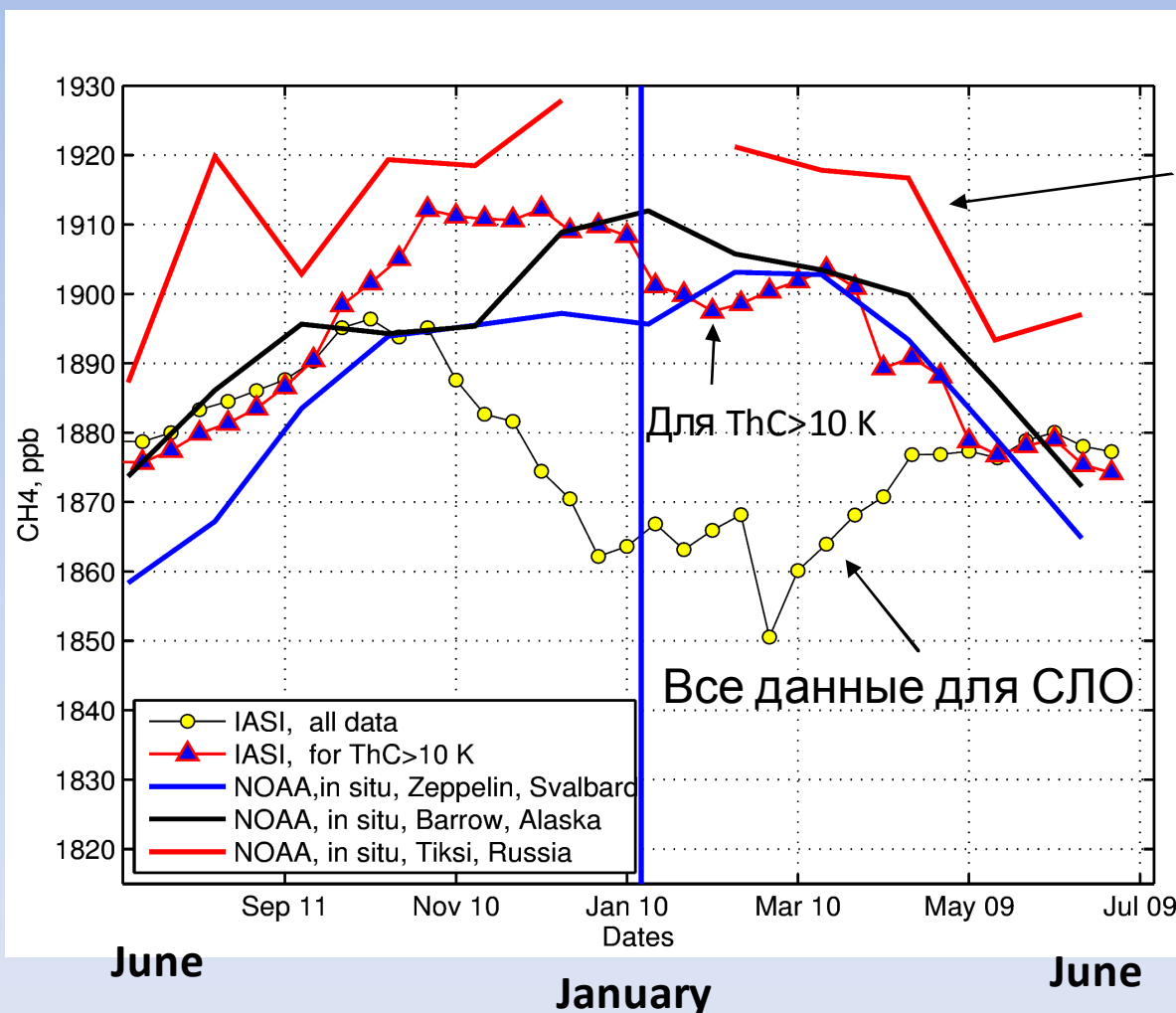
Гидраты



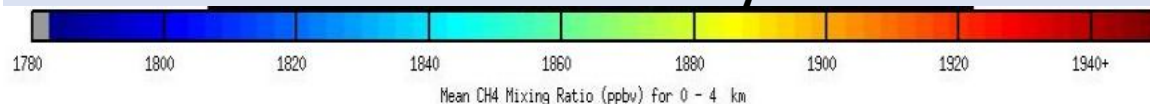
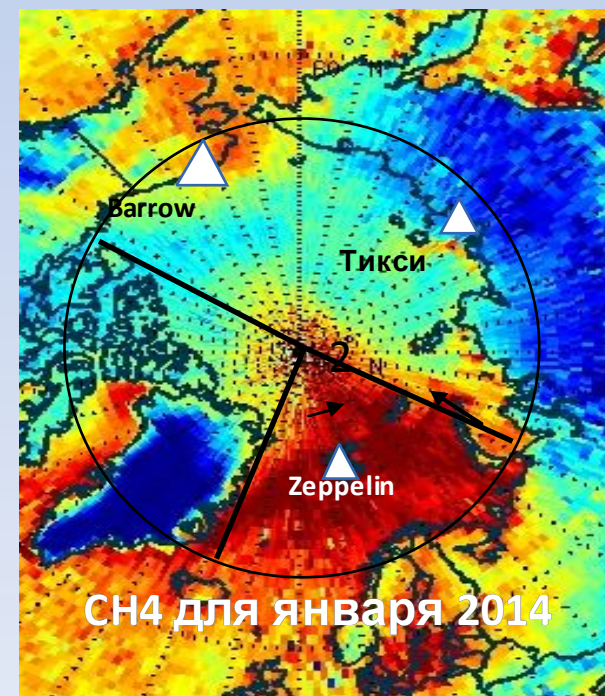
Сезонные вариации метана (0-4 км среднее) по данным AIRS с января (вверху слева) по декабрь (внизу справа) 2013 года. Палетка в ppb.

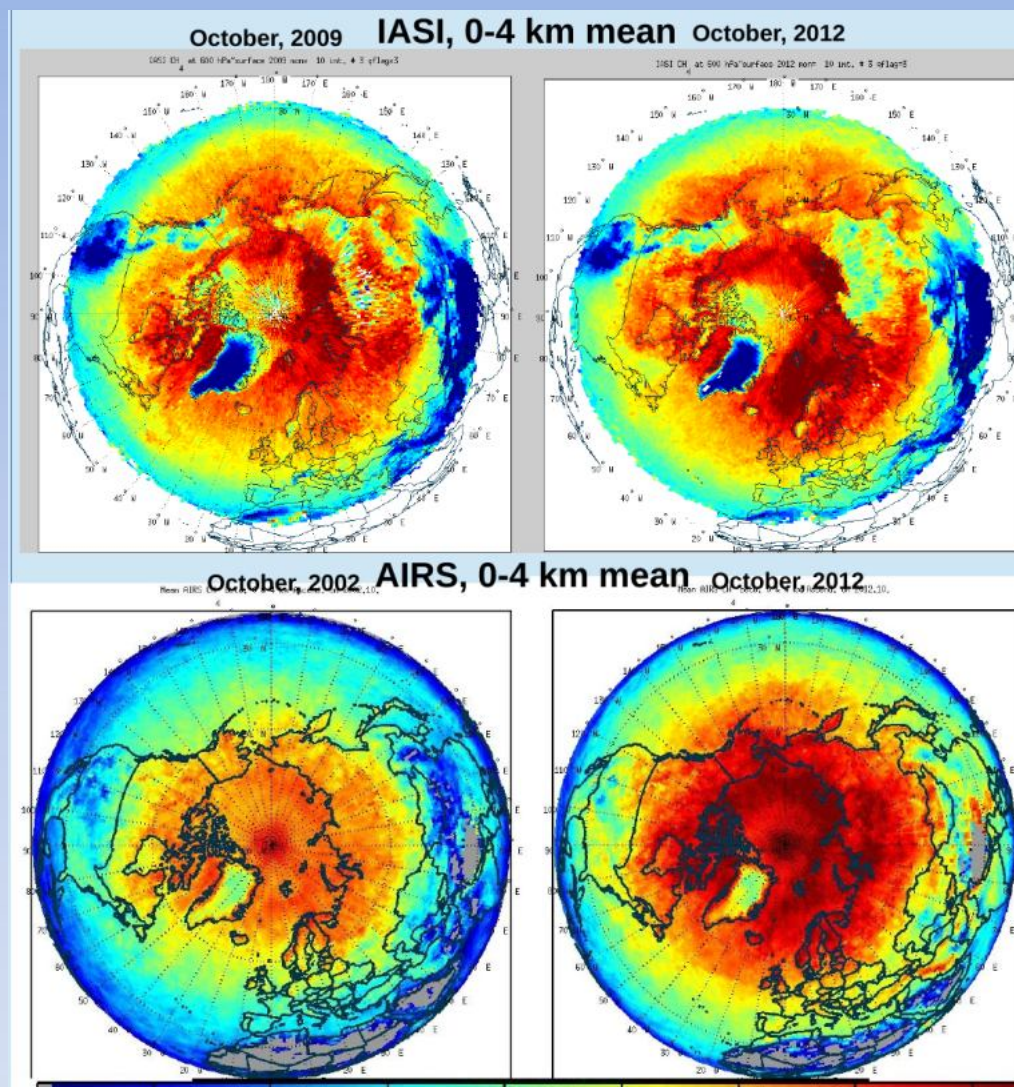
Как проверить, соответствуют ли эти данные действительности?

Усредненные по 2009-2013 сезонные циклы CH₄: IASI (все и для ThC>10 K) в сравнении с приземными измерениями на 3 станциях сети NOAA



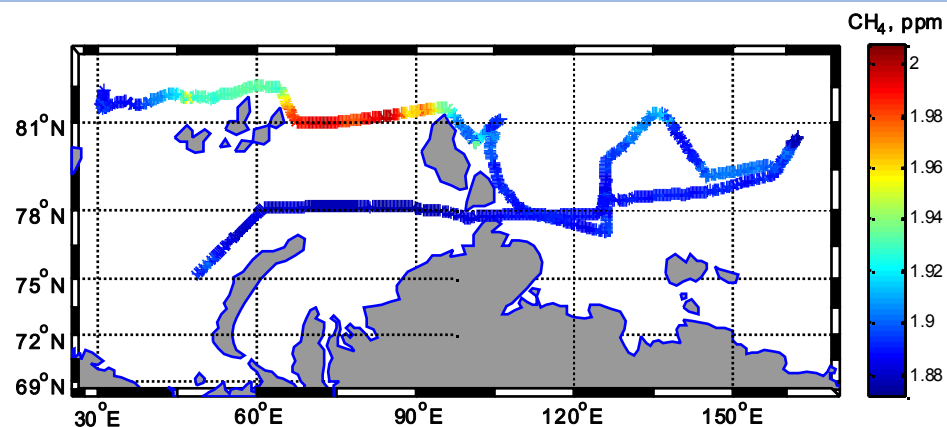
Более высокие значения в Тикси объясняются поздним началом измерений – в 2011 году и межгодовым трендом CH₄ (около 5 ppb в год).



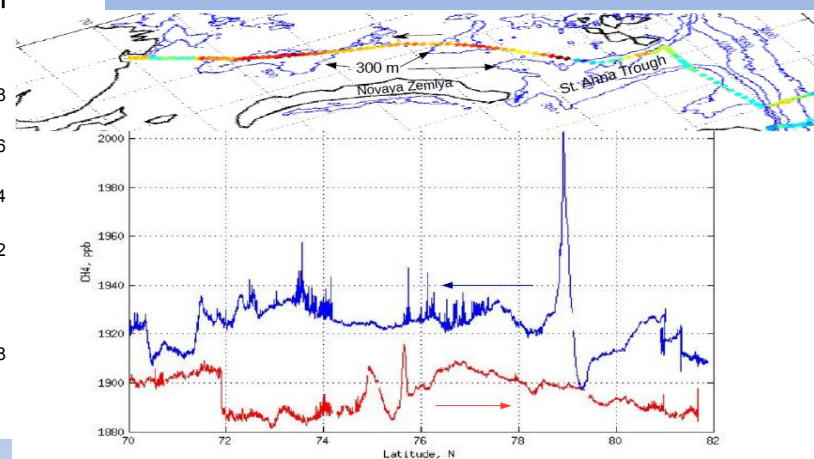


Сравнение среднемесячных спутниковых снимков за октябрь 2009 (2002) и октябрь 2013

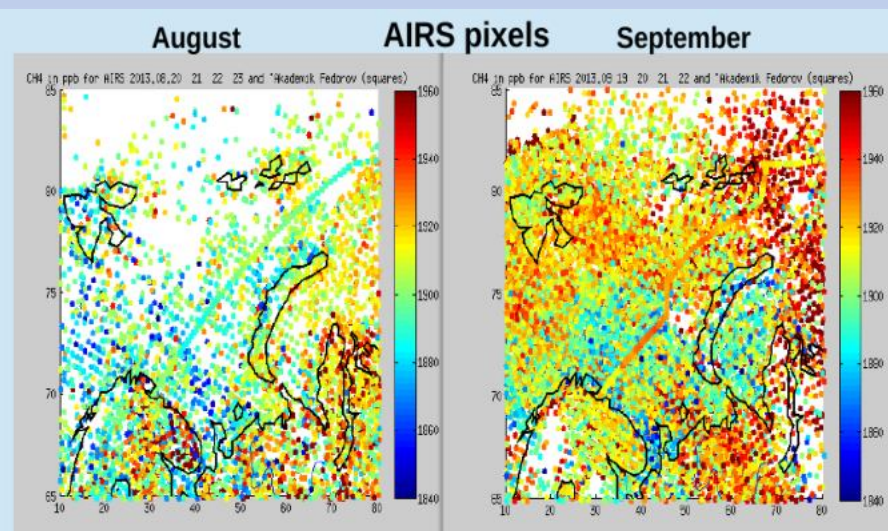
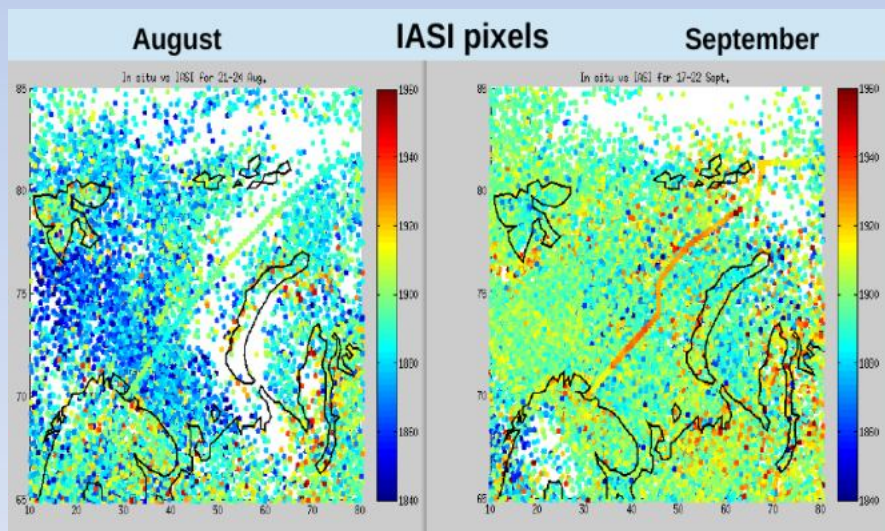
Концентрации метана, измеренные с судна



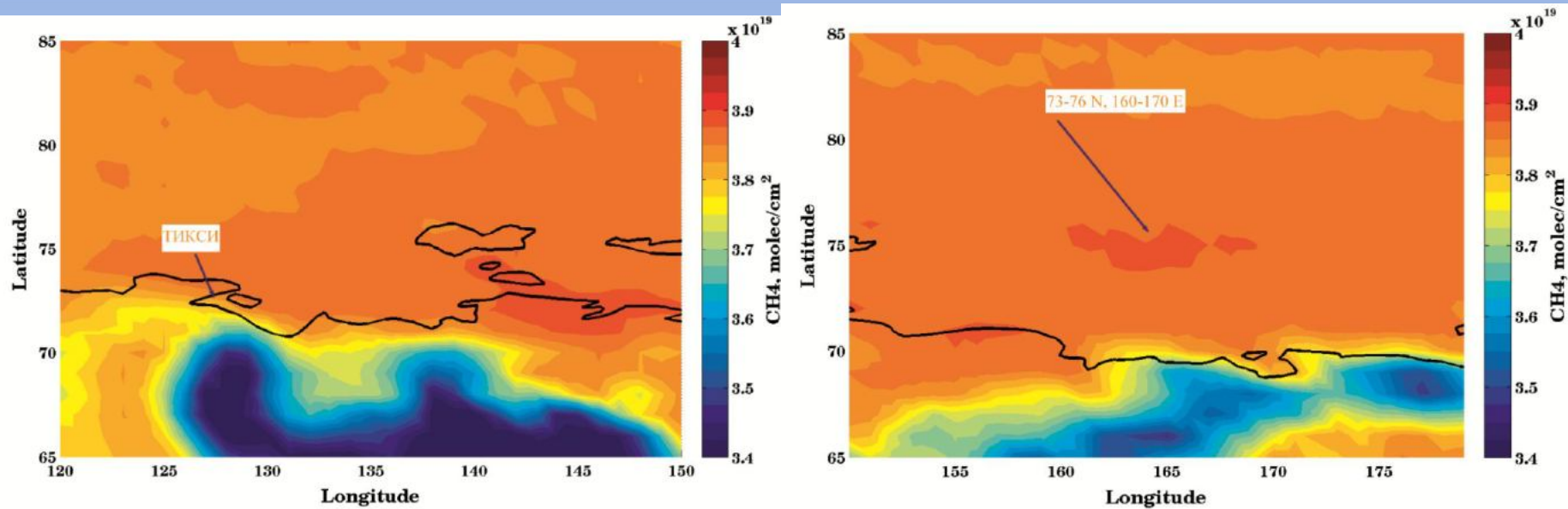
2008



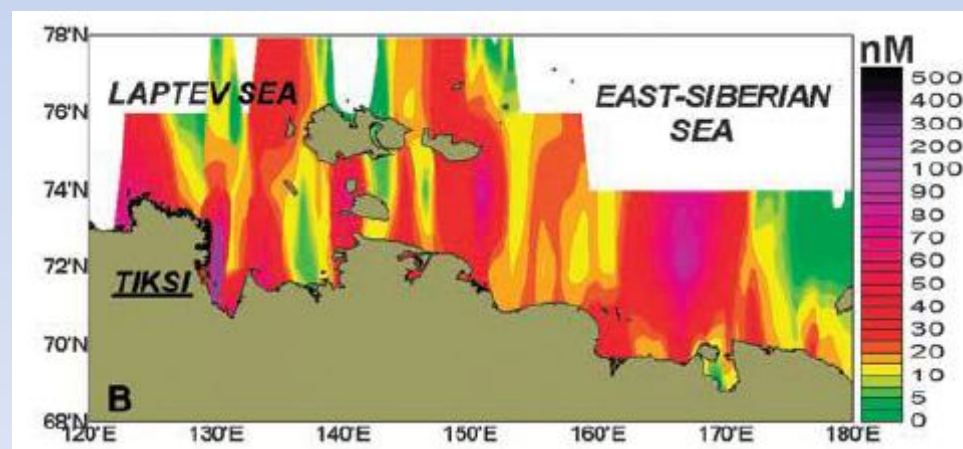
2013



Среднечасовые значения концентраций метана из приземных наблюдений в сравнении с пикселями снимков IASI и AIRS, полученных в тот же день



Пространственное распределение CH_4 в летний сезон (август-октябрь), усреднение по 2010-2014 гг.



Shakhova et al, 2010

Определение потоков метана

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

Концентрация метана на поверхности

Концентрация метана в атмосфере

Метод закрытых камер

Изменение концентрации метана в камере со временем

Камер

ы

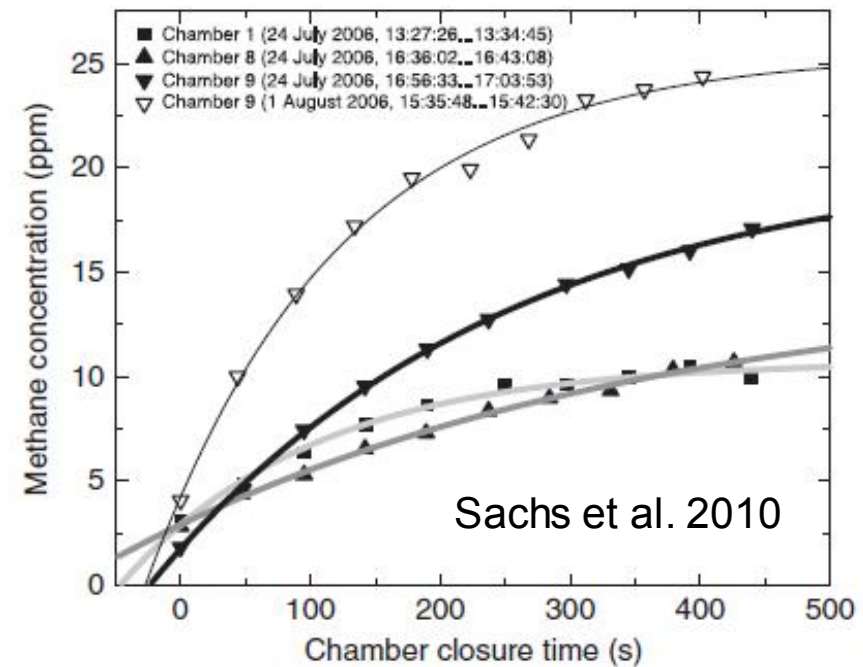
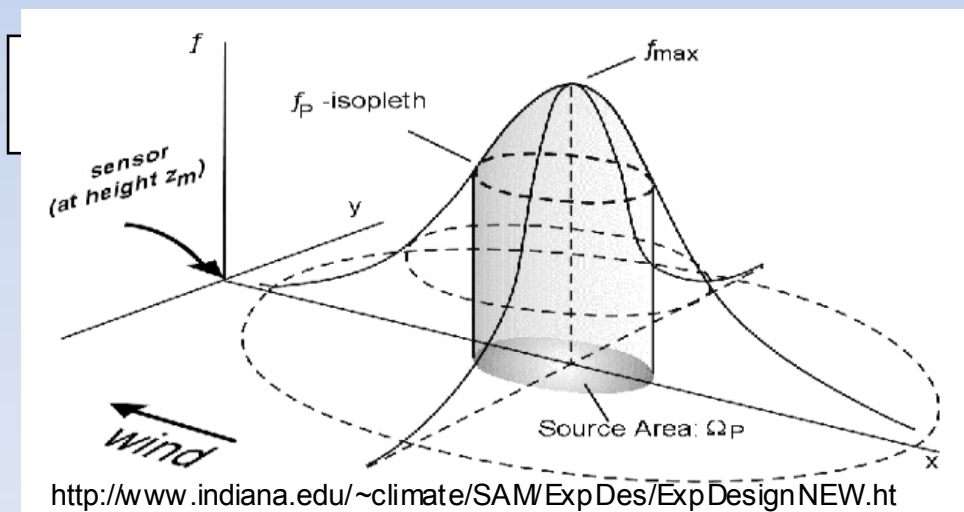


Fig. 4. Examples for nonlinear evolution of CH_4 concentration in the closed chamber headspace for different microsites and dates. The exponential fits of the form $c\text{CH}_4 = \beta_1 + \beta_2 \exp(\beta_3 t)$ are also given for each concentration curve.

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

Метод прямых пульсаций(eddy covariance - EC) для измерения потоков парниковых газов

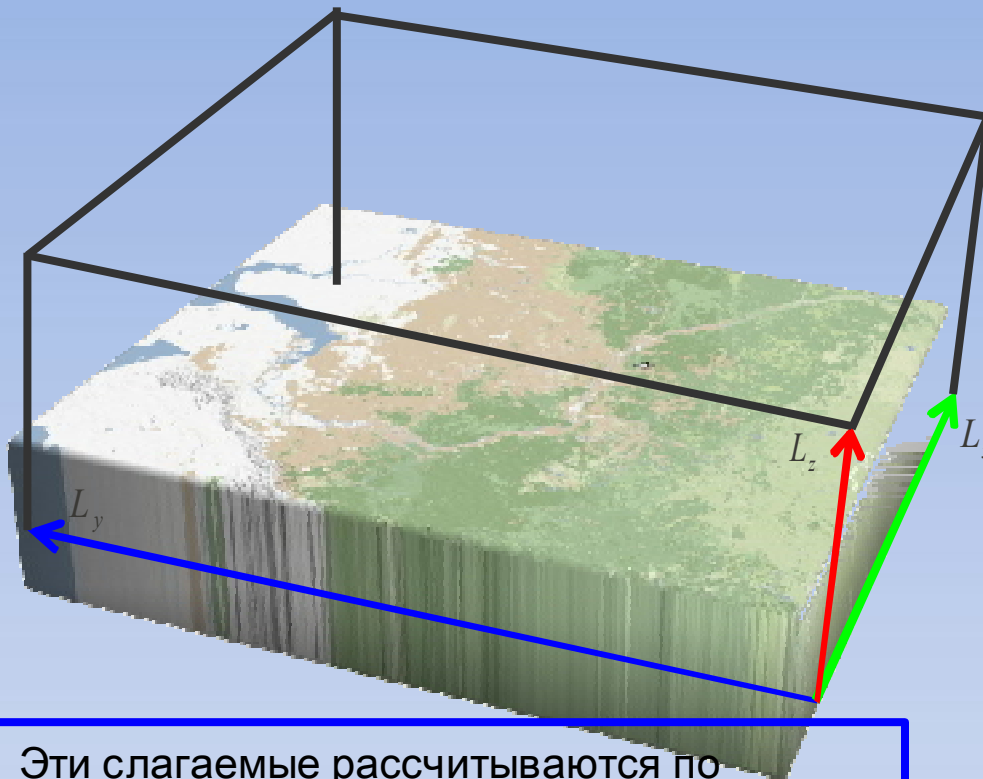
- Потоки зависят от периода осреднения, требуют сложной обработки
- Измеренный поток газа в приземном слое определяется потоком на поверхности в пределах больших значений функции влияния (footprint function), «области влияния»



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)
- Вектор состояния в i -й момент времени определяется последовательным применением операторов шага модели переноса газа, начиная с начального (0-го) момента времени
- Методы нахождения минимума J требуют вычисления градиента J , в который входят сопряженные операторы переноса M^T
- 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 C :

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

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

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

Интегрируя его по объему:

$$\int_{V} \frac{\partial C}{\partial t} dV = \int_{V} \left[\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} - R \right] C dV$$

получаем:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V} C dV =$$

$$\int_{yz} uC \Big|_{x=L_x} - \int_{yz} uC \Big|_{x=0} +$$

$$\int_{xz} vC \Big|_{y=L_y} - \int_{xz} vC \Big|_{y=0} +$$

$$\int_{xy} wC \Big|_{z=L_z} - \int_{xy} wC \Big|_{z=0} =$$

$$- \int_{yz} F_{x,x=L_x} + \int_{yz} F_{x,x=0} +$$

$$\int_{xz} F_{y,y=L_y} - \int_{xz} F_{y,y=0} +$$

$$\int_{xy} F_{z,z=L_z} -$$

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

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

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

Выводы

Оценка чувствительности спутниковых приборов. Стандартные данные измерений метана приборами AIRS и IASI чувствительны к нижней тропосфере (ниже 4 км) для случаев достаточного температурного градиента .

Метан над СЛО. Как представляется, измерения метана над СЛО с помощью спутников дают ценную информацию о содержании этого важного парникового газа. Наличие источников метана в акватории СЛО вполне вероятно. Однако, по состоянию на конец 2014 года, концентрация метана над океаном растет с той же скоростью, что и над умеренными и высокими широтами над континентами. Т.е., пока никакого роста выделения метана от СЛО не зарегистрировано.

Оценка потоков метана по спутниковым данным требует дальнейшей разработки.