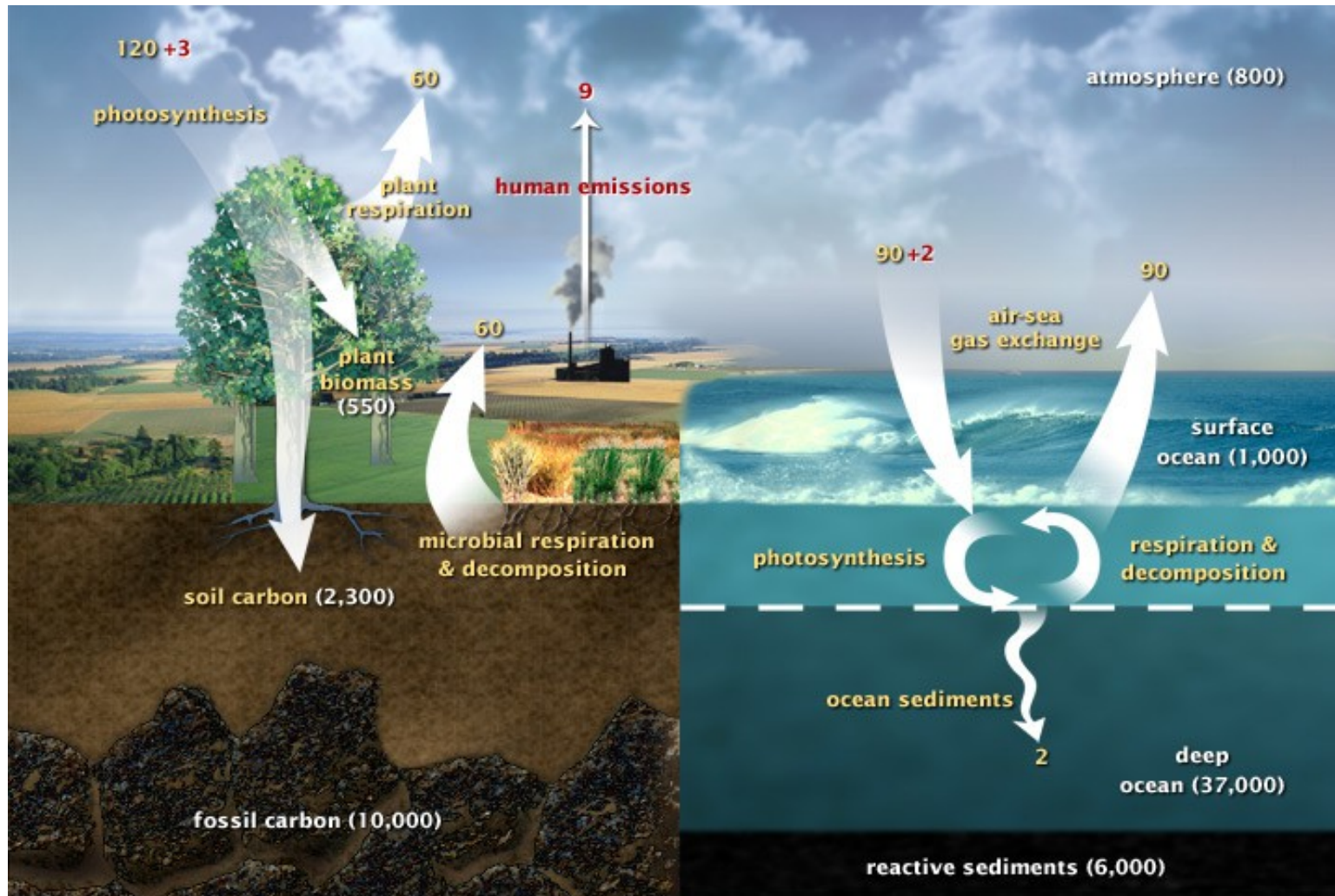


Баланс парниковых газов в Арктических экосистемах



Институт физики
атмосферы
им. А.М. Обухова
РАН

Ирина Репина



МГУ им. М.В. Ломоносова

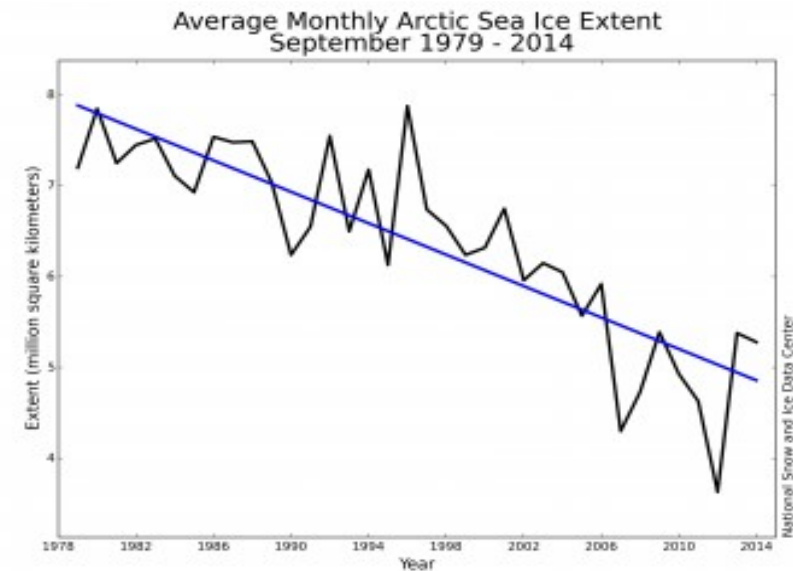
почему Арктика?

Скорость потепления Арктики в 2 раза превышает скорость глобального потепления (эффект полярного усиления)

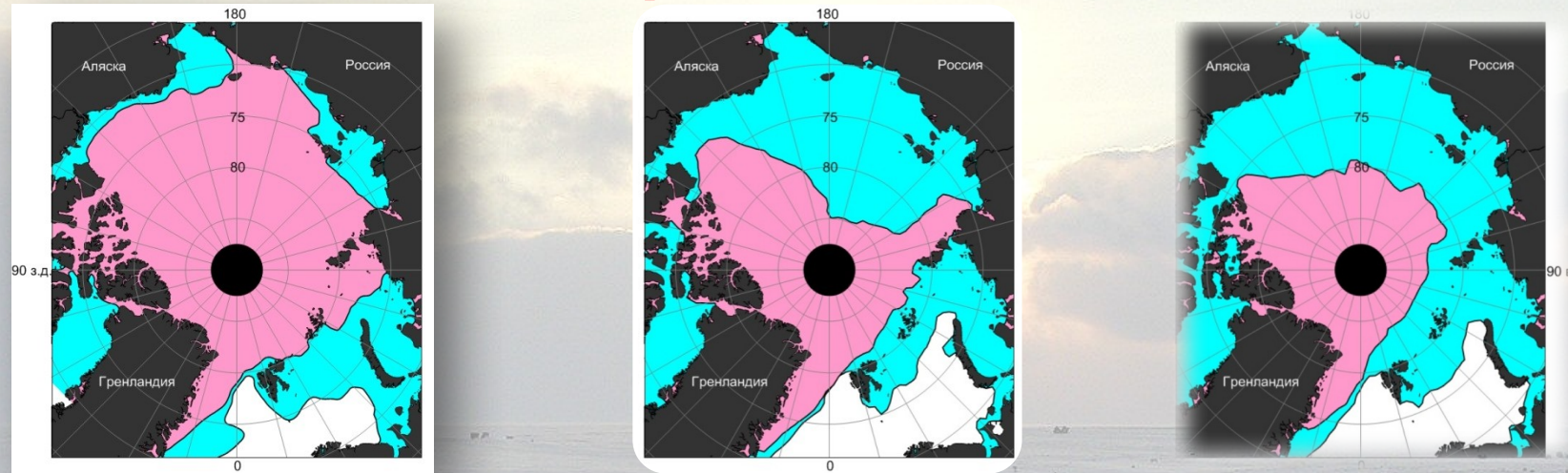
Температура



Площадь морского льда в сентябре

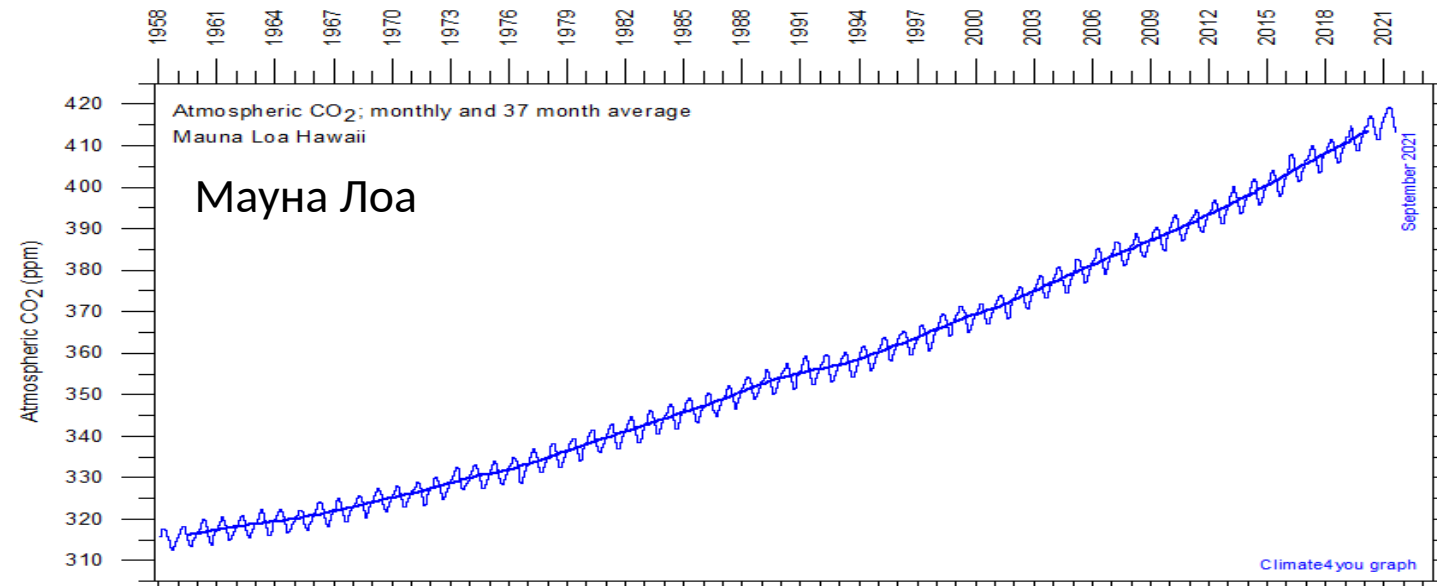


Сплоченность морского льда

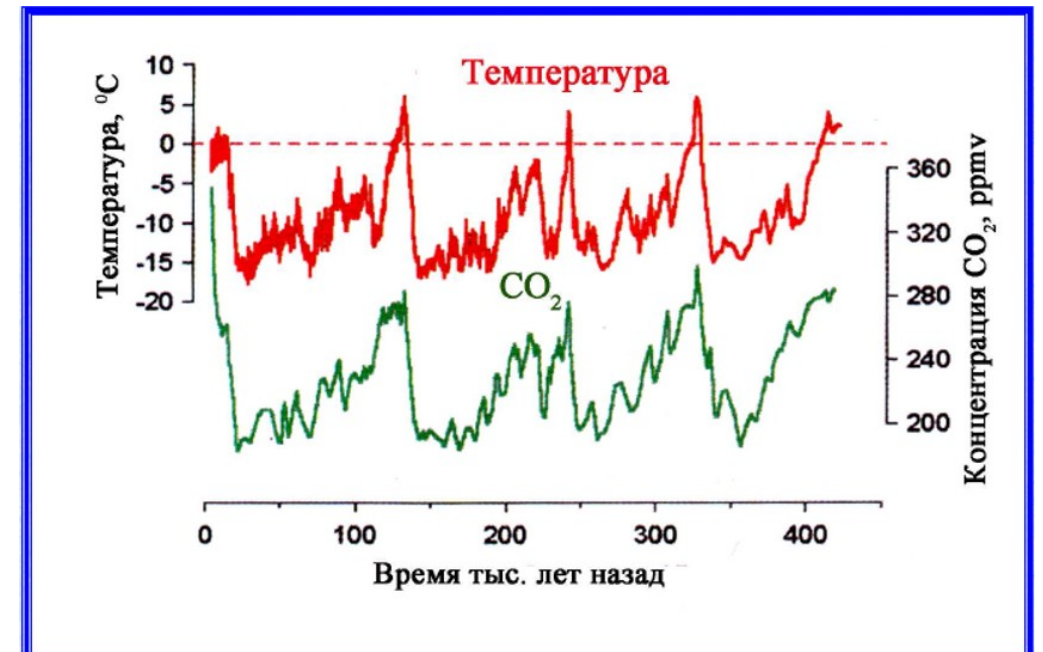
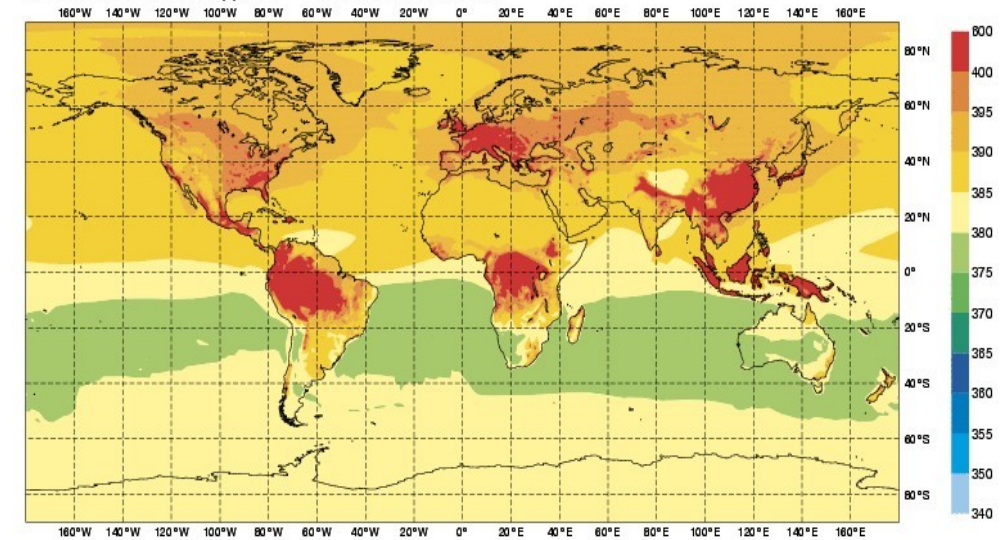


Максимальное (голубой цвет) и минимальное (розовый цвет) летнее распространение льда в СЛО осредненные за период 1979-2000 гг. (а), в 2007 г. (б) и в 2012 г. (в)

Среднегодовая изменчивость концентраций углекислого газа



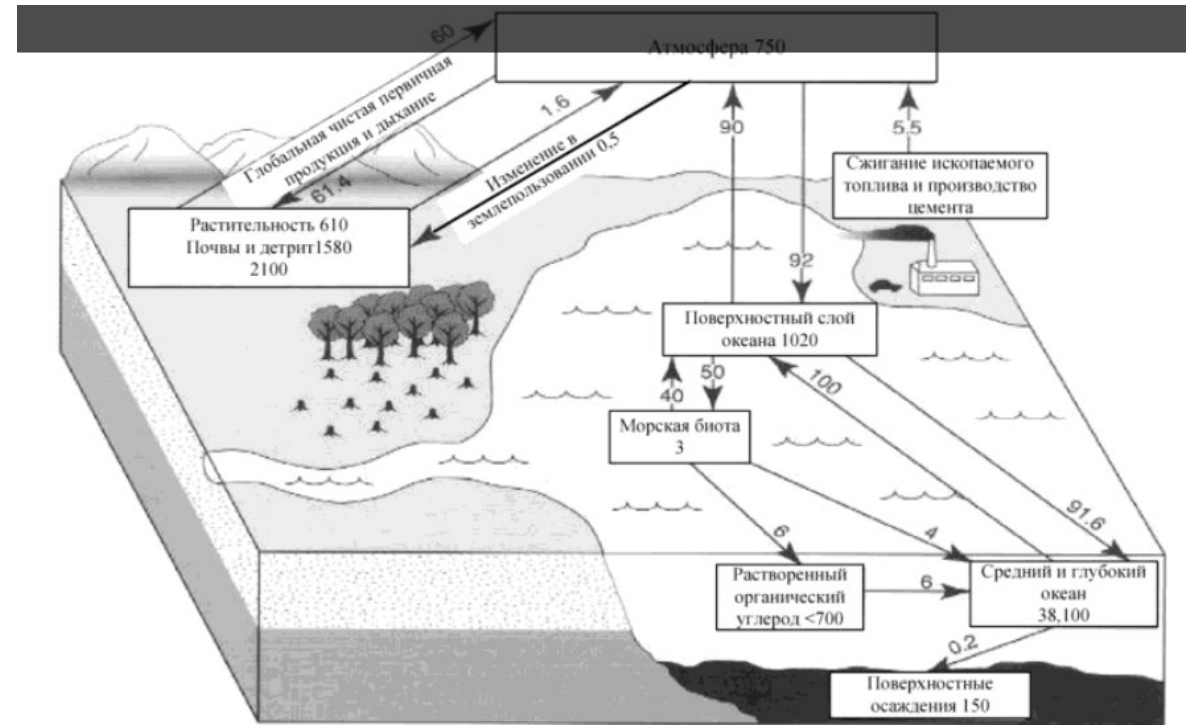
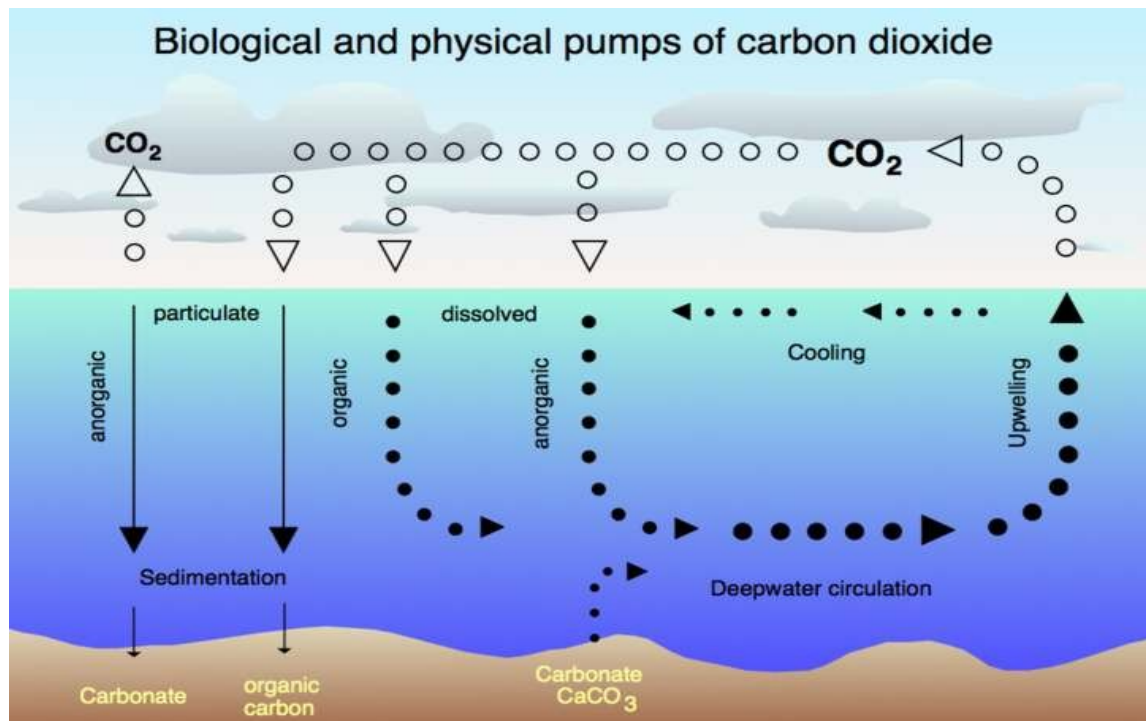
MACC Delayed mode Global Monthly Mean March 2011
Surface Carbon Dioxide [ppmv] mean: 385.93 max: 544.47



Основные запасы углерода на Земле

Sink	Amount in billions of Metric tons
Atmosphere	578 (as of 1700)- 766(as of 1999)
Soil organic matter	1500 to 1600
Ocean	38,000 to 40,000
Marine sediments and sedimentary Rocks	66,000,000 to 100,000,000
Terrestrial Plants	540 to 610
Fossil Fuel Deposits	4000

Океаны являются крупнейшим «активным» резервуаром углеродного цикла



•Мировой океан является самым крупным резервуаром углерода на планете: его запасы более чем в 50 раз превосходят запасы в атмосфере и в 15 раз запасы в экосистемах суши.

•Обмен углеродом в экосистемах суши идет посредством фотосинтеза, дыхания, разложения и горения. Поток углекислого газа между атмосферой и сушей равен 60 млрд т С/год. С учетом изменений землепользования, результирующий поток направлен в атмосферу и равен 1,1 млрд т С/год.

•Мировой океан в среднем поглощает 92 млрд т С/год, а выделяет 90. Т.е. является активным поглотителем углекислого газа.

Сравнительные оценки суммарного годового потока CO_2 из атмосферы в океан, полученные разными авторами [5], млрд т С/год

Метод	Поглощение CO_2, млрд. т/год	Авторы
Измерения разности парциальных давлений CO_2 в поверхностном слое океана и в воздухе	$2,1 \pm 0,5$	Takahashi et al. (2002)
Инверсия наблюдений за содержанием атмосферного CO_2	$1,8 \pm 1,0$	Gurney et al. (2002)
Инверсии на основе моделей переноса и наблюдений за содержанием растворенного неорганического углерода (DIC)	$2,0 \pm 0,4$	Gloor et al. (2003)
Результаты моделирования на основе содержания хлорфторуглеродов (ХФУ) и естественного радиоуглерода	$2,2 \pm 0,4$	Matsumoto et al. (2004)
Результаты моделирования с использованием модели OSMIP-2 (Проект сравнения моделей углеродного цикла в океане)	2,4	Orr (2004)
На основе измерения содержания O_2 и CO_2 с поправкой на нагрев и стратификацию океана	$2,2 \pm 0,5$	Bopp et al. (2002)
Модель глобальной циркуляции (GCM) углерода в океане	1,93	Wetzel et al. (2005)
На основе возраста хлорфторуглеродов (ХФУ)	$2,0 \pm 0,4$	McNeil et al. (2003)

Таблица . Процессы, влияющие на соединения углерода в океане

Процесс	Оценки времени процесса	Источник	Масштаб (сек.)
Газообмен океан-атмосфера	десятки секунд	Emerson, 1995	10^{-1}
Гидролиз и процессы в карбонатной системе	десятки секунд	Emerson, 1995	10^{-1}
Адвекция и турбулентность (поверхностные воды)	дни-год	Монин и др., 1974	10^{6-7}
Химико-биологические процессы	дни-год	Монин и др., 1974	10^{6-7}
Антропогенный CO ₂	30-40 лет	Gruber et al, 1996	10^9
Адвекция и турбулентность (глубинные воды)	1000 лет	Монин и др., 1974	10^9
Седиментация	>10000 лет		$>10^{12}$

Газы в океане

Протоннообменные газы - CO_2 , H_2S , NH_3 , SO_2 - Имеют ионные формы после потери или получения протона

Постоянные газы (инертные) - N_2 , Ne , He (^3He , ^4He), Xe , ^{222}Rn $t_{1/2} = 3.5 \text{ d}$ (из ^{226}Ra), и Ar .

Реактивные газы (высокая химическая или биологическая реакционная способность) O_2

H_2 (^3H , $t_{1/2} = 12.7 \text{ y}$)

N_2O (промежуточное звено в N-цикле; мощный парниковый газ)

CH_4

DMS (основной источник серы в атмосфере, антипарниковый газ)

COS (фотохимический источник, самый распространенный серный газ в атмосфере)

CO

Другие газовые примеси

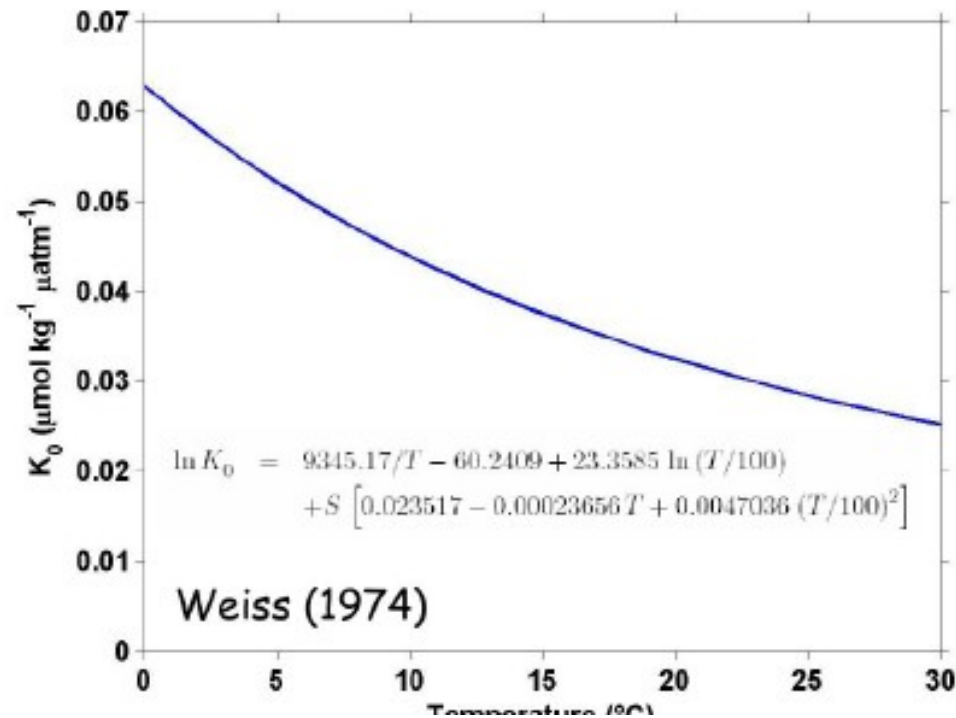
CH_3I , CH_3Br , CH_3Cl , CH_3Br ; CHBr_3 (bromoform), CHCl_3 (chloroform)

Freons (инертный, но способствующий разрушению O_3 в атмосфере, тоже парниковый газ).




Ethane, propane, isoprene etc. Также известные как неметановые гидрокарбонаты (NMHC)

Закон Генри — Растворимость CO_2

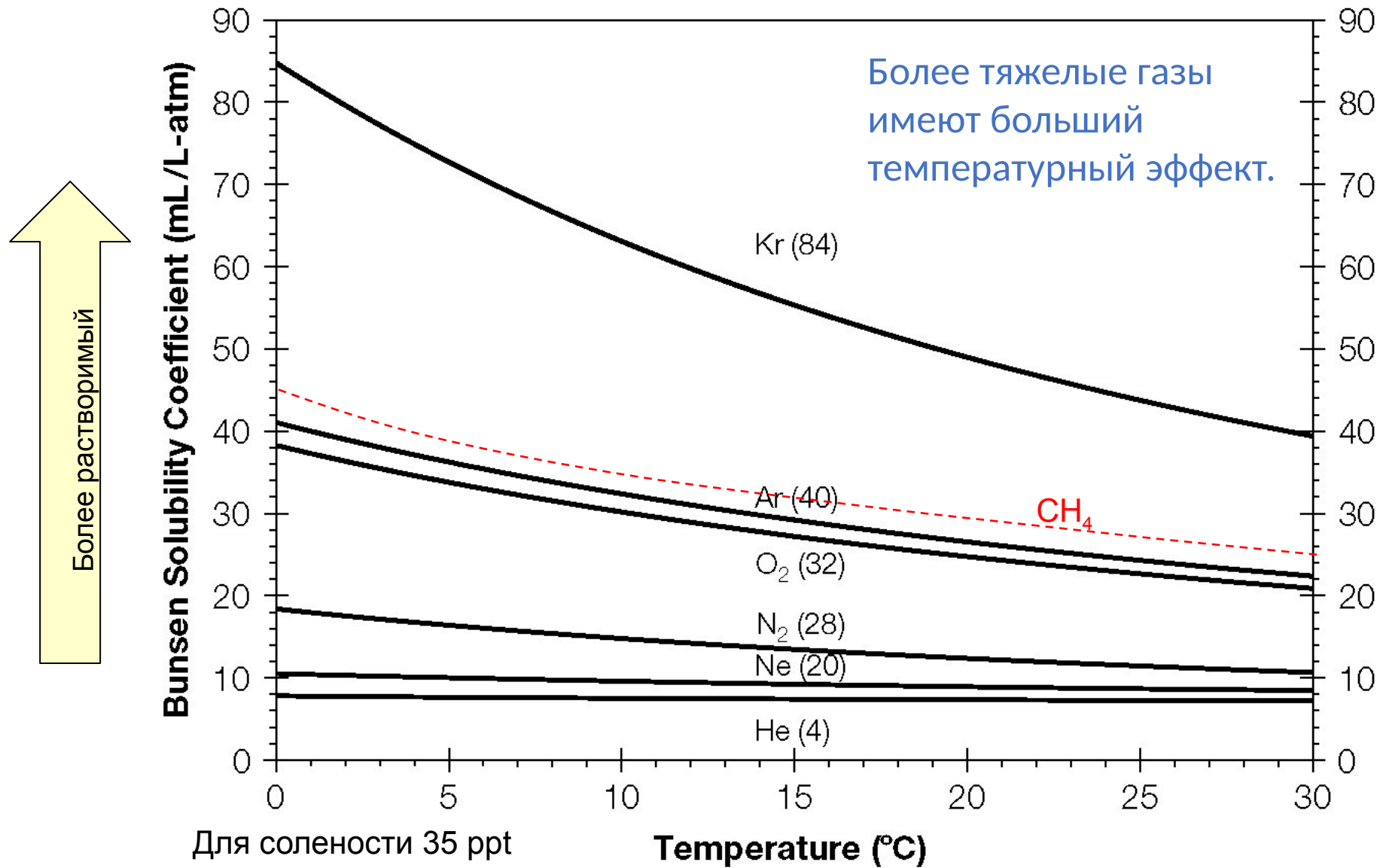
- Закон Генри: $[\text{CO}_2] = K_0(T, S) \cdot f\text{CO}_2$
- $[\text{CO}_2]$: концентрация CO_2 в верхнем слое
- $f\text{CO}_2$: парциальное давление CO_2 к верхнем слое
- K_0 : коэффициент растворимости как функция T и S .
- Если поверхность океана находится в равновесном состоянии с атмосферой то $\text{atm } p\text{CO}_2$ контролируется поверхностным $P\text{CO}_2$. $[\text{CO}_2]$.
- \Rightarrow Холодная вода поглощает больше CO_2 !



Влияние температуры, давления и солености на растворимость газов

- С повышением температуры растворимость газа  снижается.
- При повышении давления растворимость газа  повышается
- По мере увеличения солености растворимость газа  снижается.
- Эффекты нелинейны **во всех** случаях.

Растворимость газов зависит от молекулярной массы (тяжелые газы более растворимы). Растворимость является нелинейной функцией температуры, с большей растворимостью при НИЗКОЙ температуре.



Растворимость газа является нелинейной функцией солёности, с большей растворимостью при НИЗКОЙ солёности.

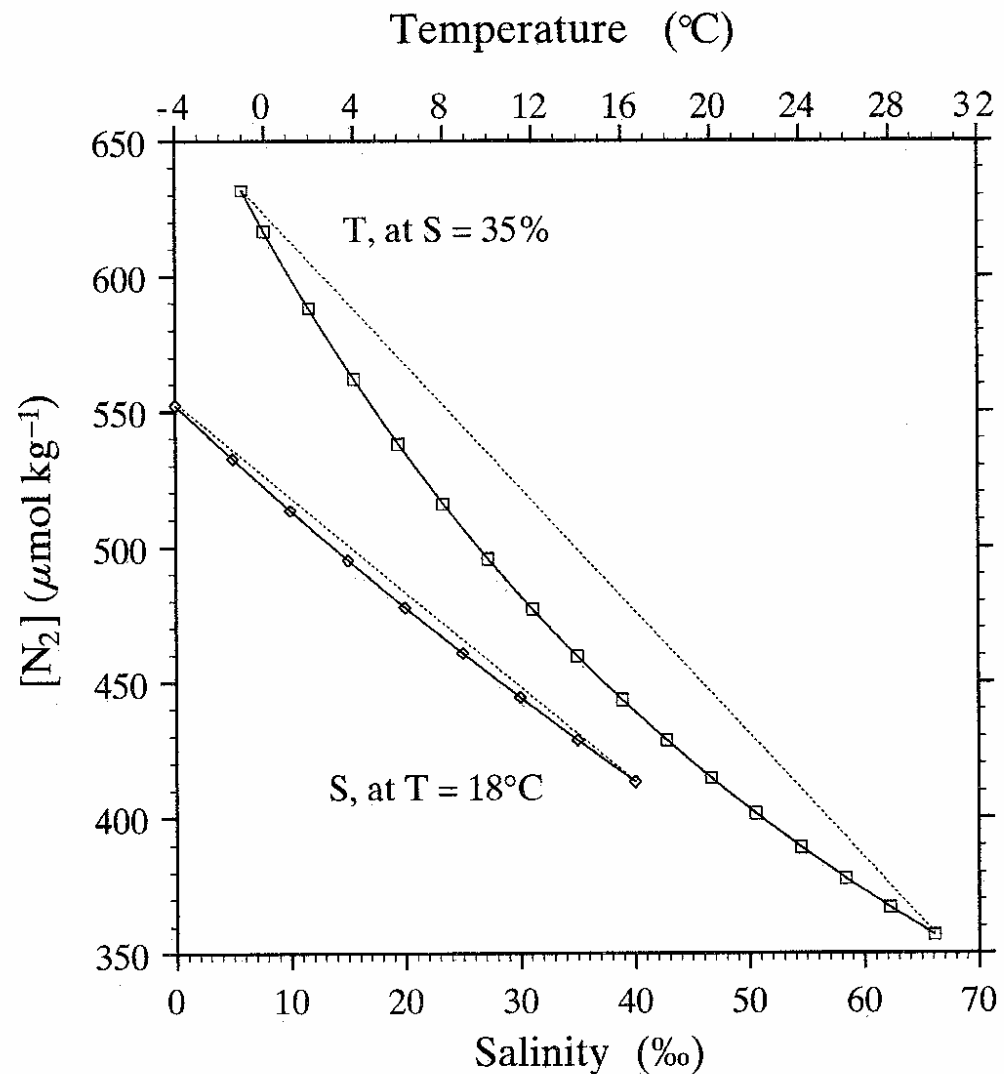


Figure 5.3 Solubility of N_2 in seawater as a function of temperature at $S = 35\text{‰}$ (upper curve) and of salinity at 18°C (lower curve), relative to wet air. The dotted lines show the concentrations that would be found if two water masses, with the characteristics of the end members and saturated against air, mixed in various proportions without any opportunity to re-equilibrate with air. (Data from Appendix D.)

Жизнь в атмосфере CO₂

Устойчивое состояние

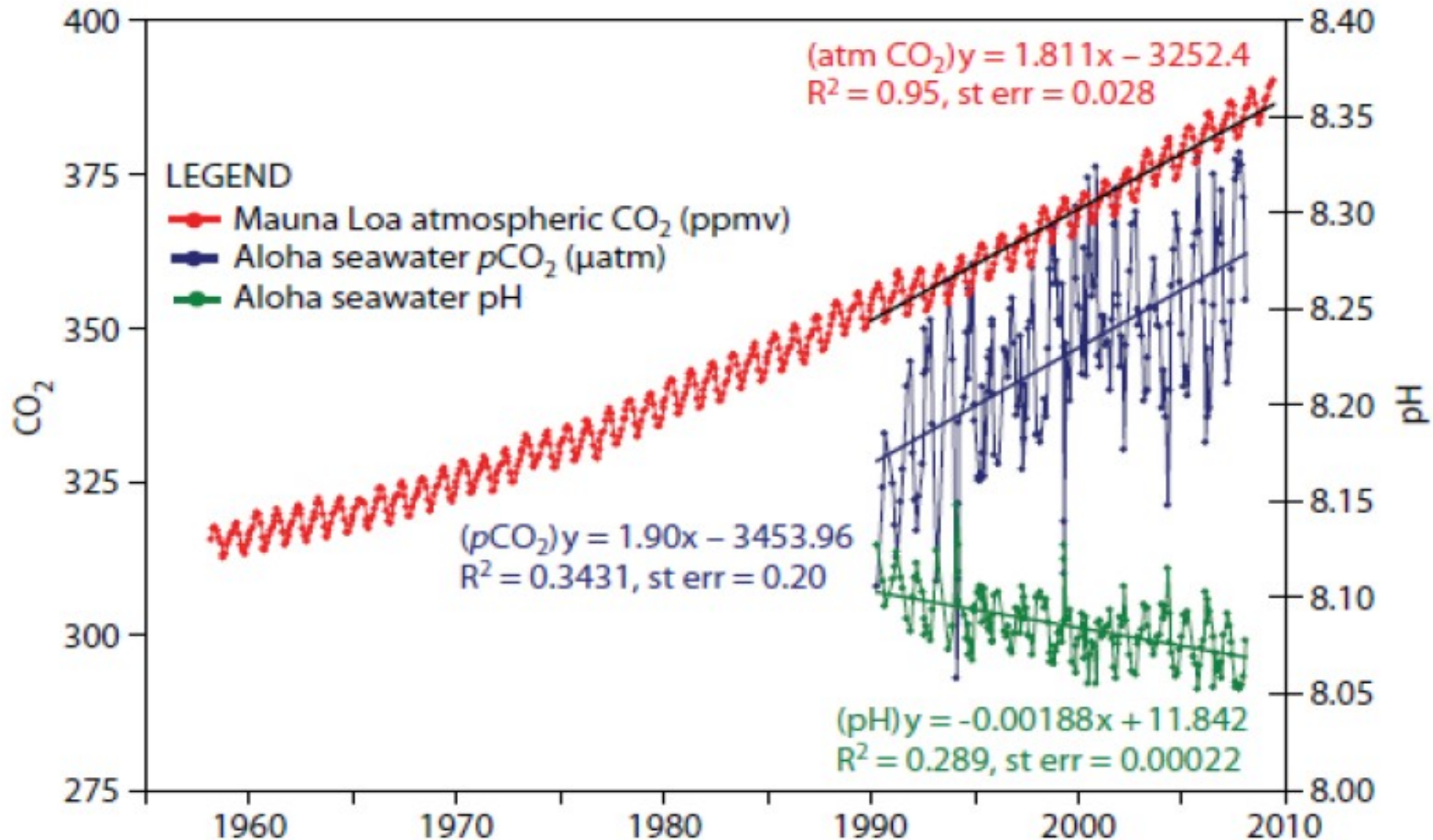
С концентрация = поток ×
время жизни τ
время жизни $\tau = С$
концентрация / поток

$$\tau = 600 \text{ PgC (280 } \mu\text{atm)} / 70 \text{ PgC yr}^{-1} = 8.6 \text{ лет}$$

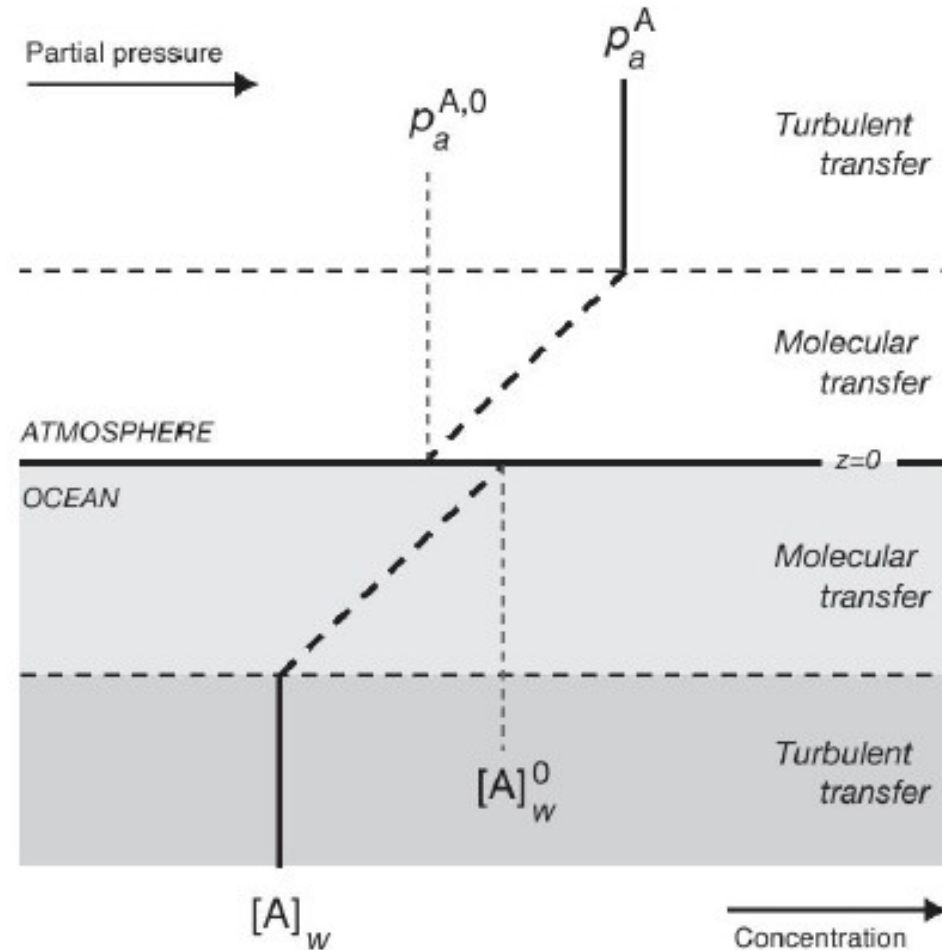
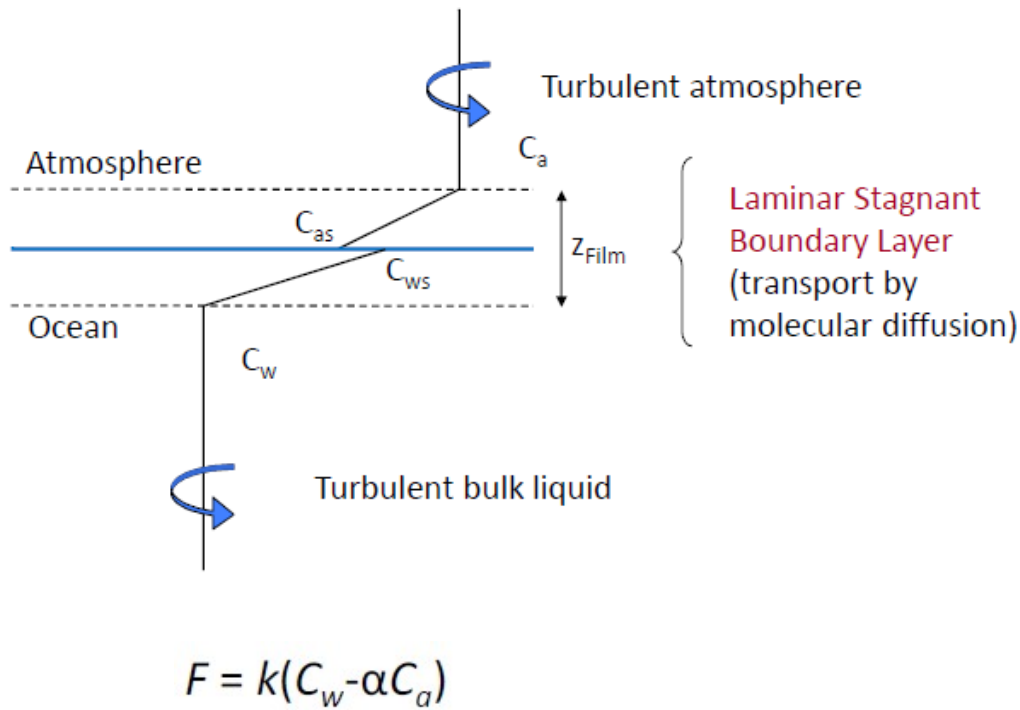
$$\tau = 800 \text{ PgC (380 } \mu\text{atm)} / 92 \text{ PgC yr}^{-1} = 8.7 \text{ лет}$$

τ : время обмена газом между атмосферой и океаном

Окисление океана



Пленочный механизм газопереноса

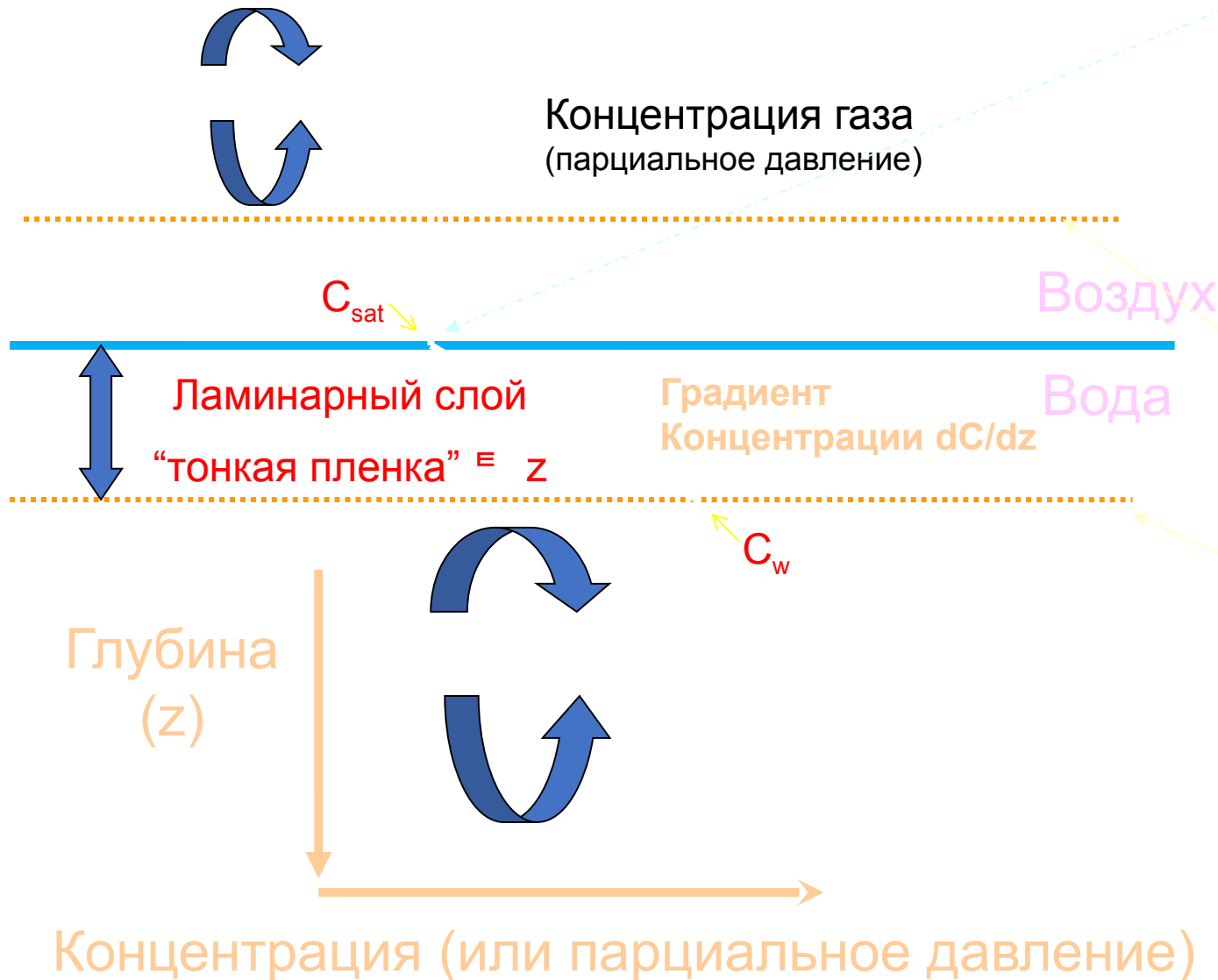


Газы хорошо перемешанны в турбулентном слое.

Перенос происходит только через неподвижную пленку с помощью молекулярной диффузии ϵ .

$$F_{(g)} = \frac{D_{(g)}}{\Delta z} (C_w - C^{sat})$$

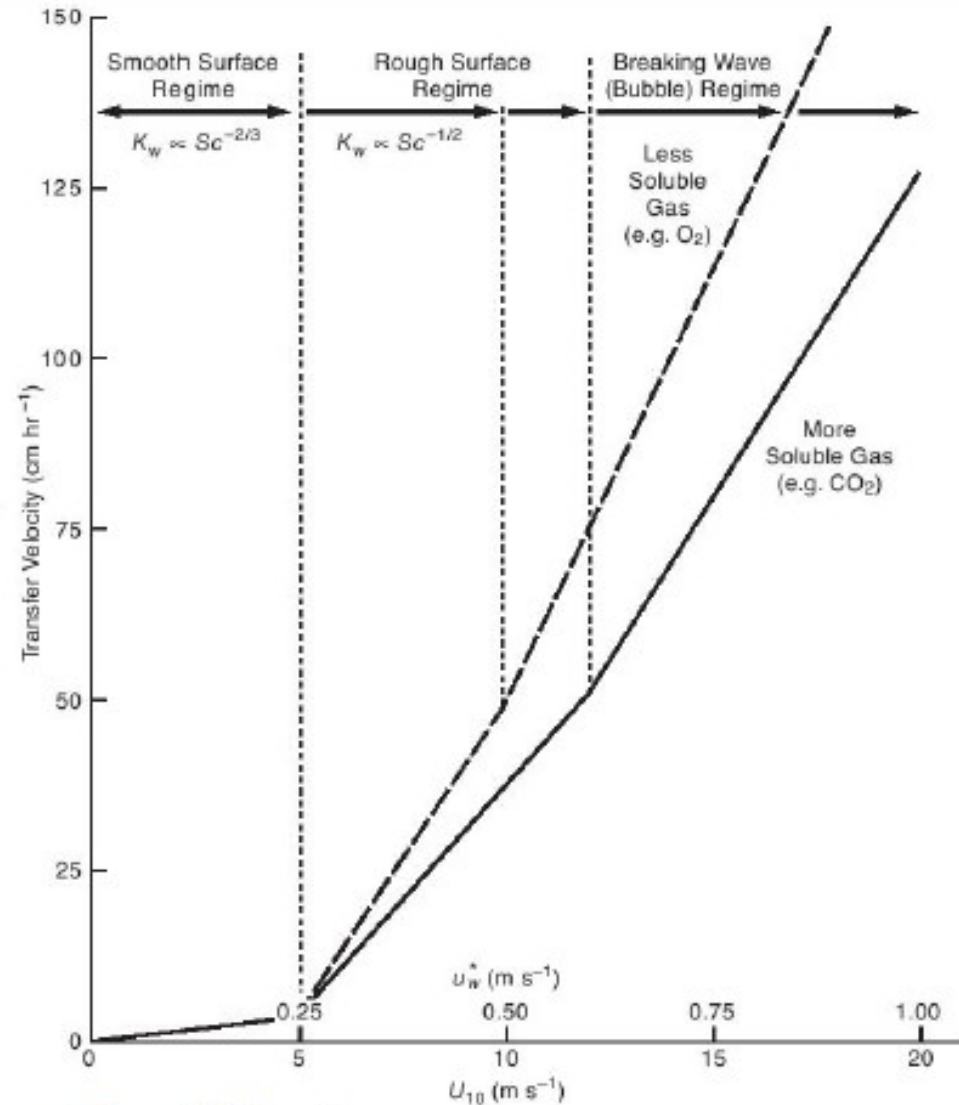
Предполагается, что пограничный слой со стороны воздуха не препятствует диффузии газа к поверхности моря. Концентрация растворенного газа на границе раздела воздух-вода предполагается равновесной растворимостью в атмосфере.



Толщина диффузного пограничного слоя напрямую влияет на поток!

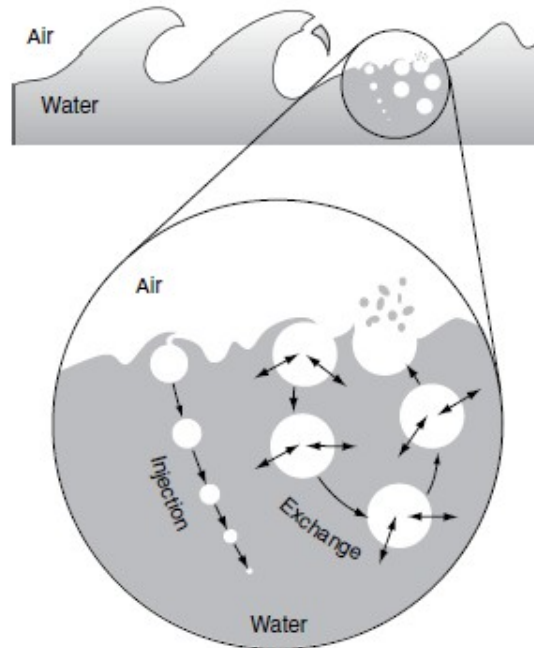
Перенос газов как функция скорости ветра

$$F = k(C_w - \alpha C_a)$$



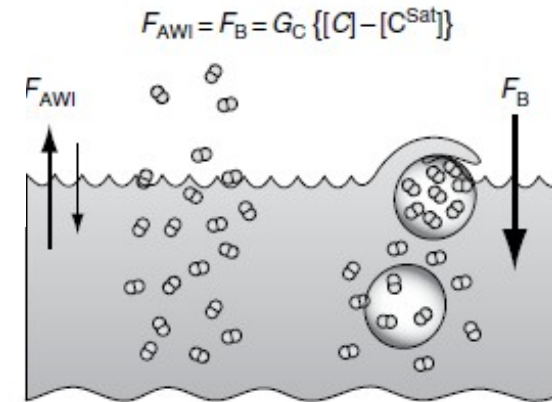
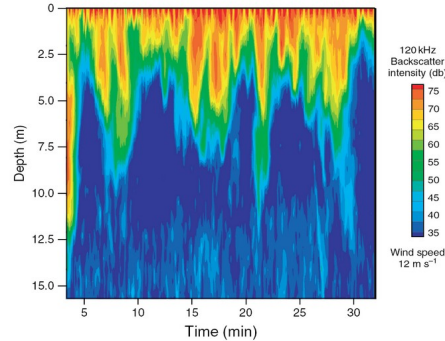
Теория для O₂ и CO₂. Различные режимы в зависимости от скорости ветра. Sarimento Gruber 2006

Два механизма взаимодействия с помощью пузырькового механизма: крупные пузырьки и мелкие пузырьки



- Образование пузырьков при обрушении волн может улучшить газообмен:
 - Воздух в пузырьковом обмене напрямую взаимодействует с морской водой.
 - - Растворение пузырьков при подъеме
 - - Обходит границу воздух-море

Пузырьковый обмен - по мере того, как пузырьки уходят глубже в воду, давление повышается, и больше газа растворяется. Газы будут растворяться в зависимости от их растворимости, поэтому растворяется больше более тяжелого газа, чем легкого. Но так как тяжелые газы, уже имеют высокую концентрацию в воде (из-за их большей растворимости), процентное изменение из-за растворения пузырьков невелико.

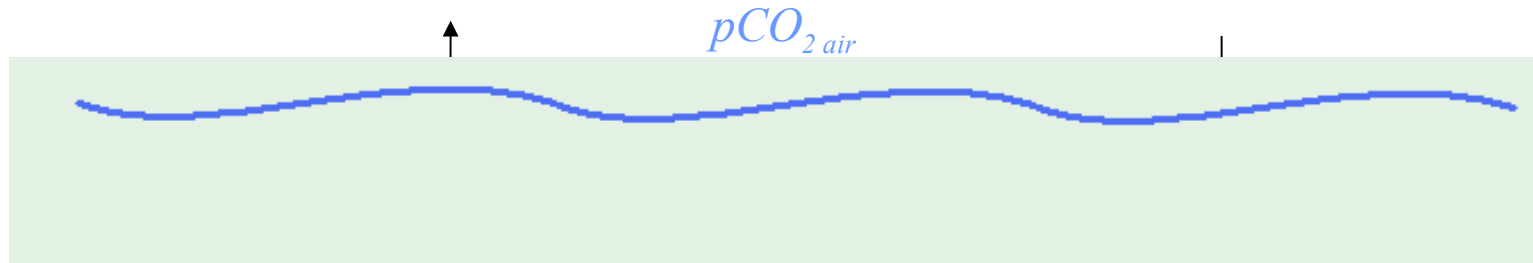


$$F_{AWI} = F_B = G_C \{ [C] - [C^{Sat}] \}$$

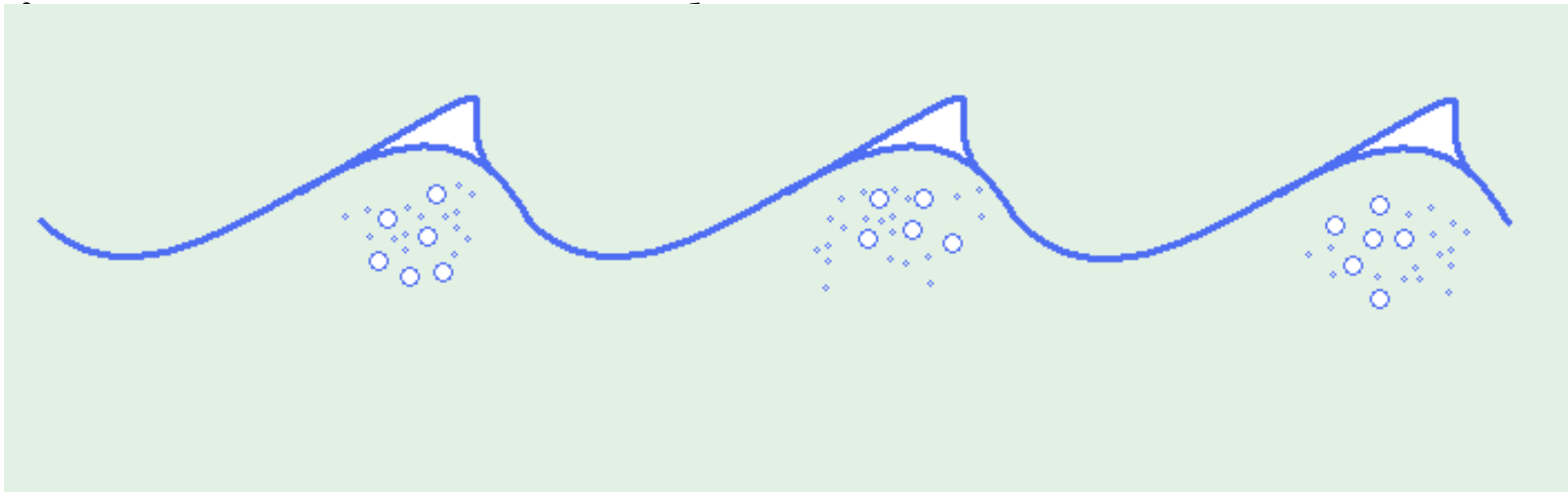
Схематическое изображение пузырькового газообмена, при том что другого потока газа нет. Маленькие символы показывают молекулы газа рассеянные в воздухе и воде. Крупные символы показывают перенасыщение газа в воде. Пузырьковый поток в воду F_B , показан с правой стороны, он компенсируется диффузионным потоком F_{AWI}

Поток CO_2 :

Поток CO_2 вызывается разницей парциальных давлений CO_2 , $\Delta p\text{CO}_2$:



CO_2 скорость переноса газа:

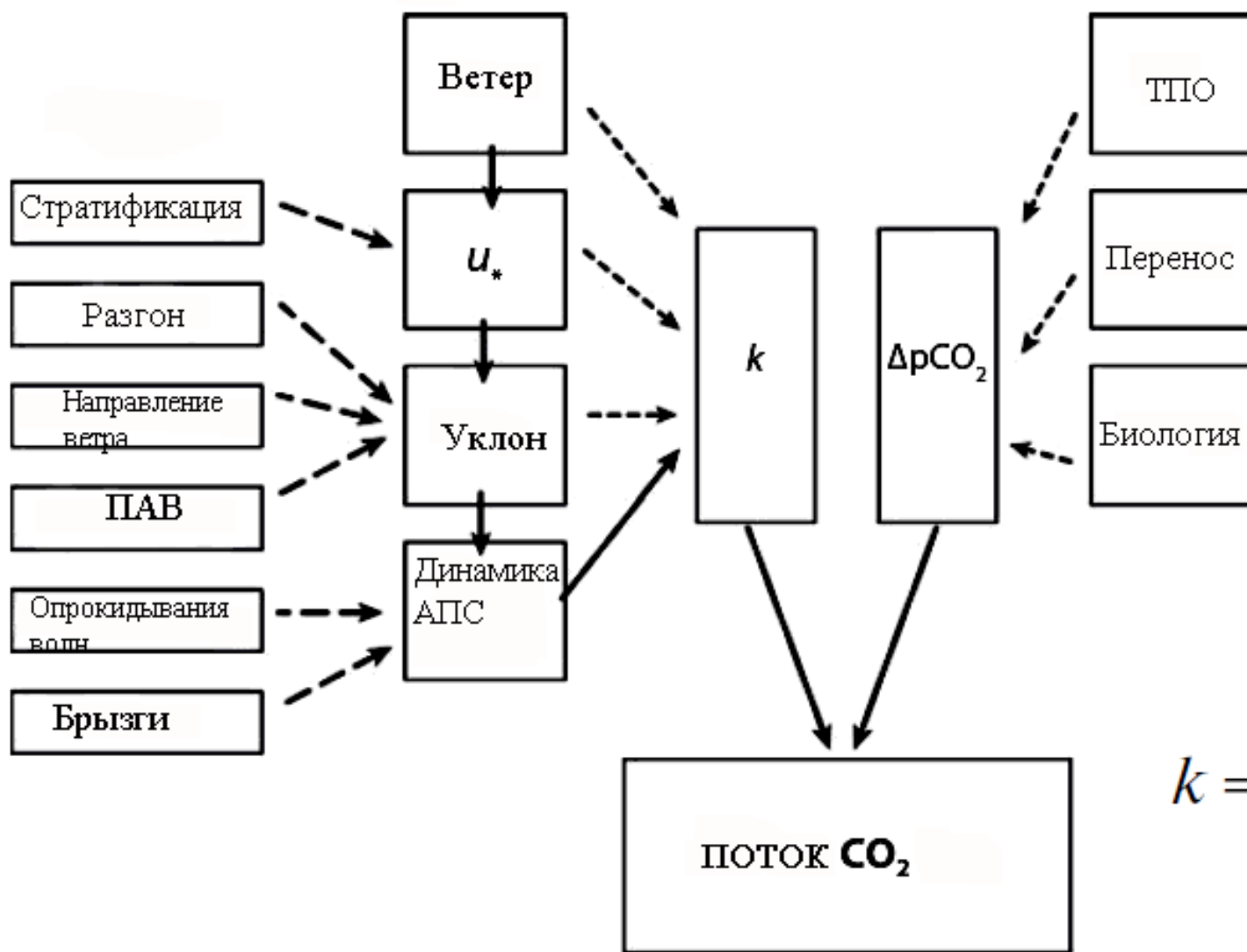


Коэффициент обмена (K) - это не просто функция $D(g)$ (которая сама по себе является функцией температуры).

Это также сложная функция скорости ветра, который может влиять на толщину микрослоя и другие свойства поверхности моря.



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



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

Число Шмидта: $Sc = \nu / D$

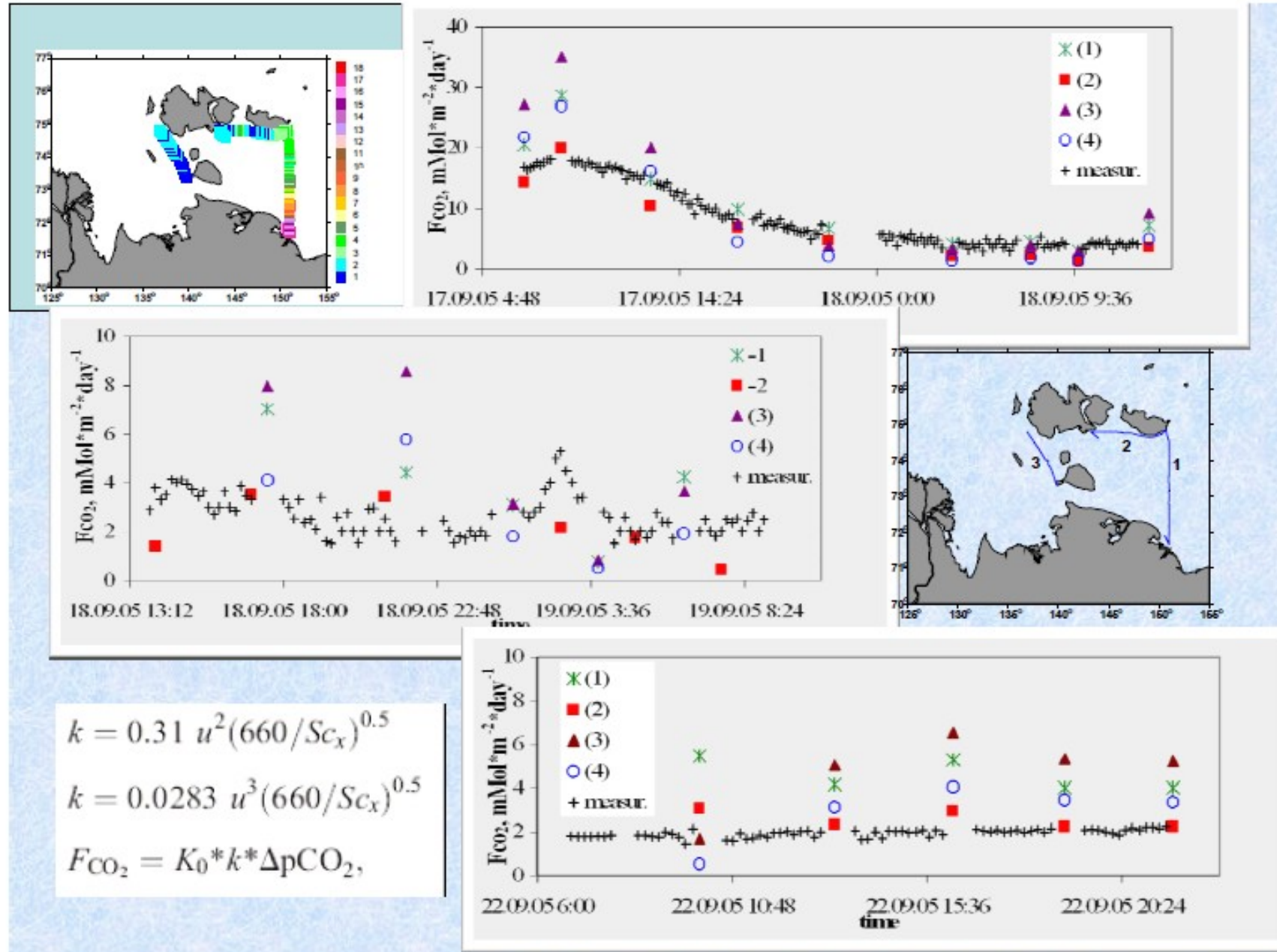
Где ν кинематическая вязкость воды и D коэффициент диффузии газа. И ν и D имеют размерность m^2/s так что число Шмидта безразмерное.

Приблизительная неопределенность	$3 < U < 10$ м/с	$U > 15$ м/с
k_a	20%	50%
k_w	30%	80%
$k_{tangential}$	20%	50%
k_{bubble}	20%	60%

Что делать?

Измерение k нескольких газов с различной растворимостью в сочетании с наблюдениями за волнами, пузырьками и т. д. Пример : *High Wind Gas Exchange Study (HiWinGS)*

Сравнение результатов наблюдений с результатами расчетов



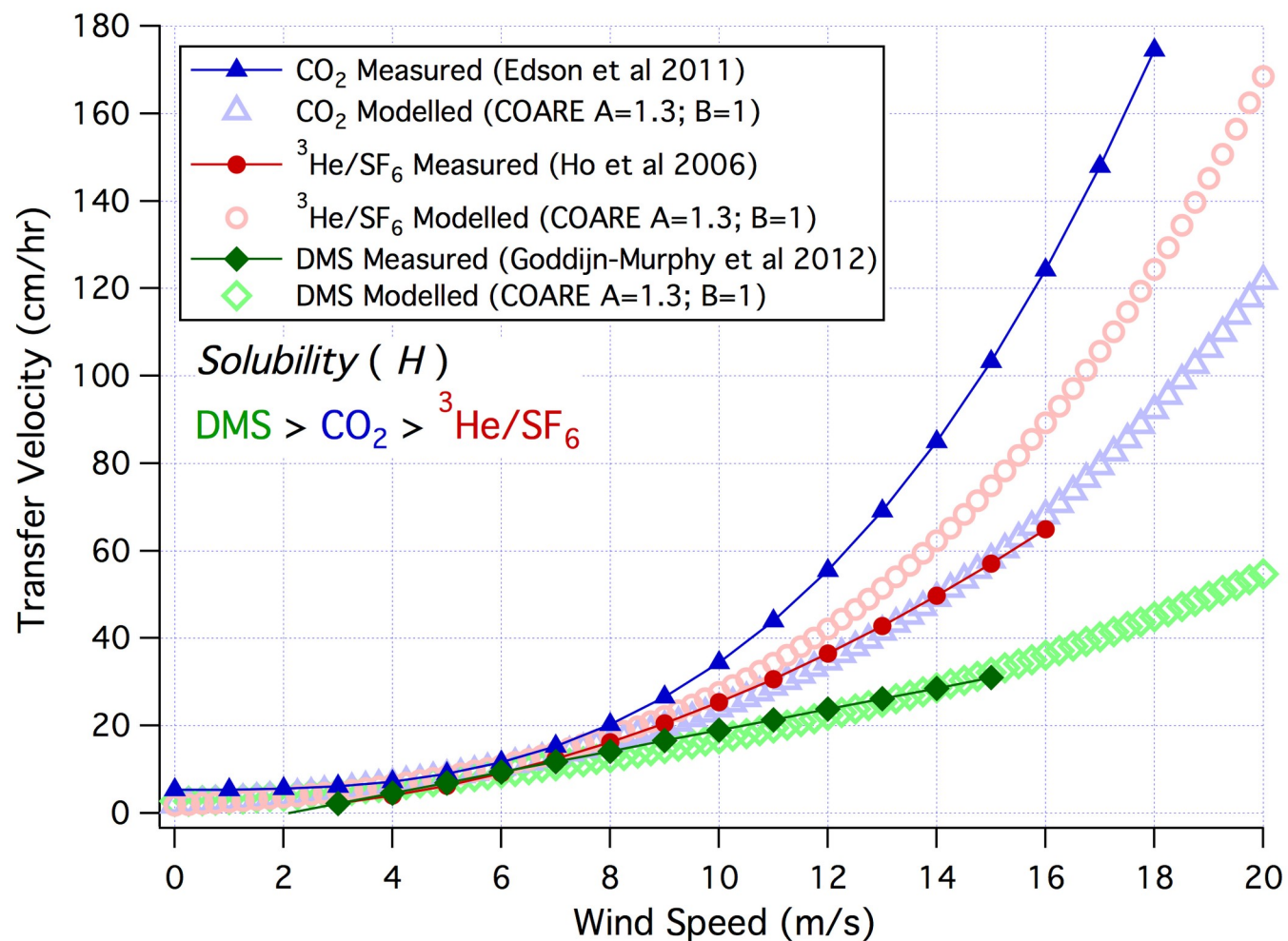
$$\text{поток CO}_2 = k A (p\text{CO}_{2\text{air}} - p\text{CO}_{2\text{sea}})$$

Коэффициент переноса k определяется из прямых измерений.

Зависимость k от состояния морской поверхности, пены и пр. может привести к значительному разбросу получаемых значений.

Модель Вульфа (2005) зависимости коэффициента переноса от состояния поверхности использует большой набор данных.

Но в этих данных не учитывается площадь покрытия пеной.



COARE-1.0 - Ноябрь, 1993.

Модель Liu, Katsaros and Businger (1979, LKB), учитывала слабые ветра и сильную конвекцию, характерную для тропического океана. Включала универсальные функции профилей для сильной конвекции и параметр шероховатости для слабых ветров.

COARE-2.0 - август, 1994.

Включена модель холодной пленки (Saunders, 1967), (Fairall et al., 1996a), параметризация эффекта дождя на поверхности (Caldwell and Elliott, 1971), (Gosnell, Fairall and Webster, 1995) и Webb-коррекция для потока влаги (Webb et al., 1980)

1996	COARE2.5	<i>Fairall et al. [1996a, 1996b]</i>
2000	COAREG2.5_CO ₂	<i>Fairall et al. [2000] and Hare et al. [2004]</i>
2003	COARE3.0	<i>Fairall et al. [2003]</i>
2004	COAREG3.0_DMS	<i>Blomquist et al. [2006]</i>
2006	COAREG3.0_Ozone	<i>Fairall et al. [2007]</i>
2008	PCBs, PCDEs	<i>Perlinger and Rowe [2008]</i>
2010	79 Gases	<i>Johnson [2010] and Rowe et al. [2011]</i>
2011	COAREG3.1 CO ₂ , DMS, Ozone, SF ₆ , ³ He	Fairall et al. (1996b, 1997, 2003, 2011)

COARE-3.0 – расширен для высоких широт, больших скоростей ветра, параметр Чарнока зависит от возраста волнения

NOAA-COARE модель газопереноса

Вода $k_w = 360000 u_* (\rho_w / \rho_a)^{-1/2} [h_w S_c^{1/2} + \kappa^{-1} \ln(0.5 / \delta_w)]^{-1} + B k_b$

$$h_w = 13.3 / (A \phi) \quad \text{A \& B эмпирические константы}$$

воздух $k_a = 100 u_* [13.3 S_{ca}^{1/2} + C_D^{-1/2} - 5 + 0.5 \kappa^{-1} \ln(S_{ca})]^{-1}$

Woolf (97 модель:

$$k_b = V_o f_{wh} \alpha^{-1} [1 + (e \alpha S c^{-1/2})^{-1/1.2}]^{-1.2}$$

α : растворимость

f_{wh} : количество капель ($\sim u^3$)

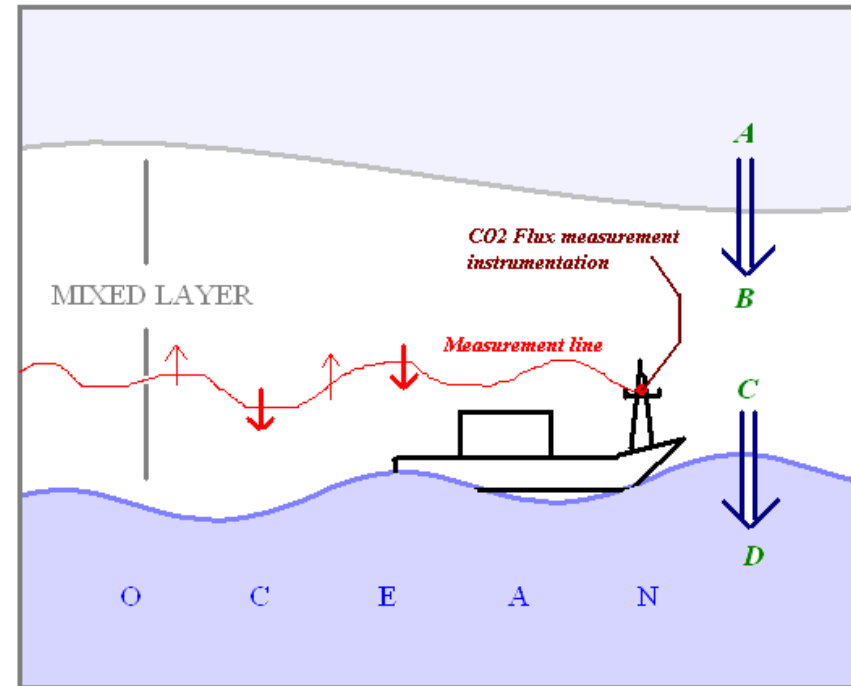
Растворимость газов
вызывается пузырьковым
обменом (k_b)

Eddy Covariance Method

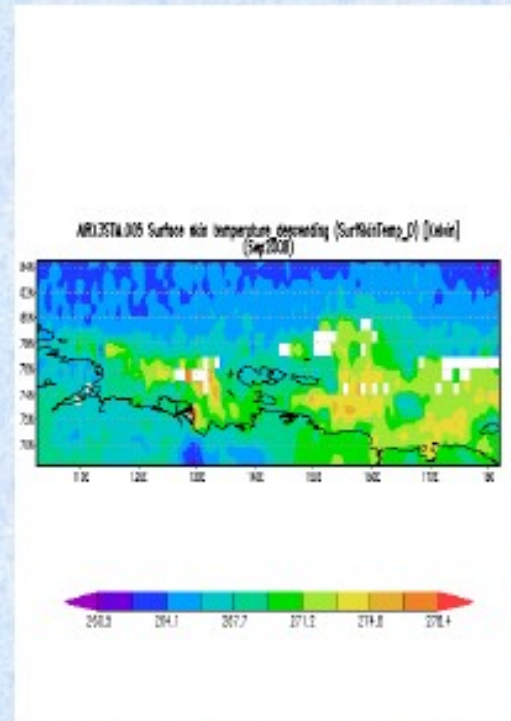
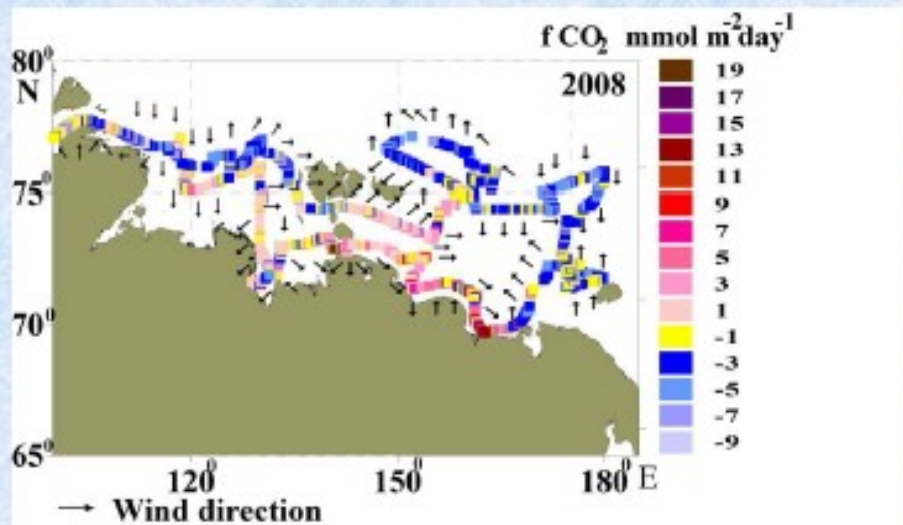
$$\text{Eddy Covariance Fluxes: } F = \rho_a \cdot (w' \cdot c')$$

Required Time Series include:

- Vertical Wind Speed (w)
- Atmospheric CO₂ concentration (c)
- Horizontal Wind Speed
- Air and Sea Surface Temperatures
- Atmospheric H₂O concentration
- Air and Sea pCO₂
- Platform motion



Поток углекислого газа из спутниковых данных



$$\begin{aligned} \partial pCO_{2SW} = & \frac{\partial pCO_{2SW}}{\partial SST} \times \Delta SST + \frac{\partial CO_{2SW}}{\partial SSS} \times \Delta SSS + \\ & + \frac{\partial CO_{2SW}}{\partial DIC} \times \Delta DIC + \frac{\partial CO_{2SW}}{\partial TA} \times \Delta TA \end{aligned}$$

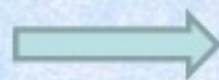
$$F = K_0 \times k \times (fCO_2^{atm} - fCO_2^{sw})$$

$$fCO_2^{sw} = 10.18 (\pm 0.02) \times SST_{TSG} + 0.5249 (\pm 0.01) \times lat - 0.2921 (\pm 0.006) \times lon + 52.19 (\pm 0.7)$$

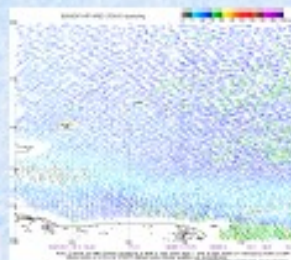
$n = 40204, r^2 = 0.87, rms = 5.7 \mu atm.$

$$pCO_2^{atm} = XCO_2(SLP - p_{H_2O})$$

$$k = 0.31 \times \frac{\sum U_{10}^2}{n} \times \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

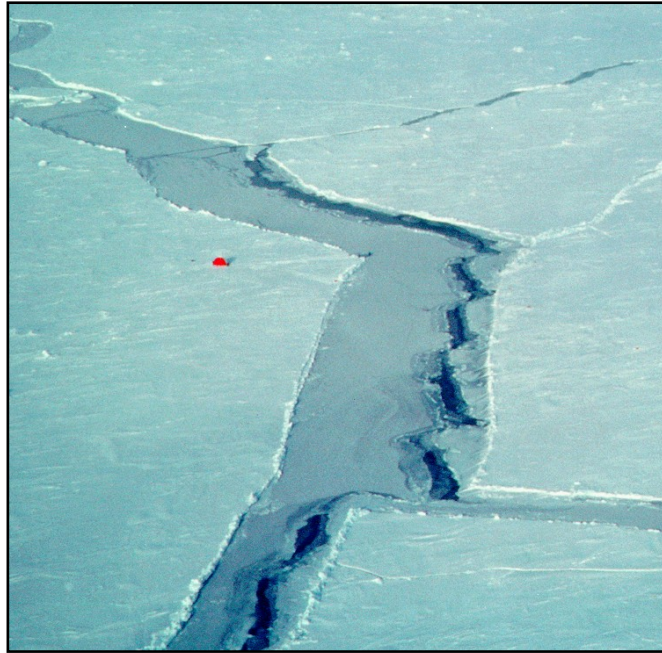


Ветер из



<http://manati.orbit.nesdis.noaa.gov/datasets/QuikSCATData.php>

трещины



Торосы



Прикромочные зоны



Снежницы



Распределение потоков CO_2 $\text{ммоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$ (а) море Лаптевых 2005 г. (б) Арктика 2006 г., (в) море Лаптевых, Восточно-Сибирское море 2008 г.

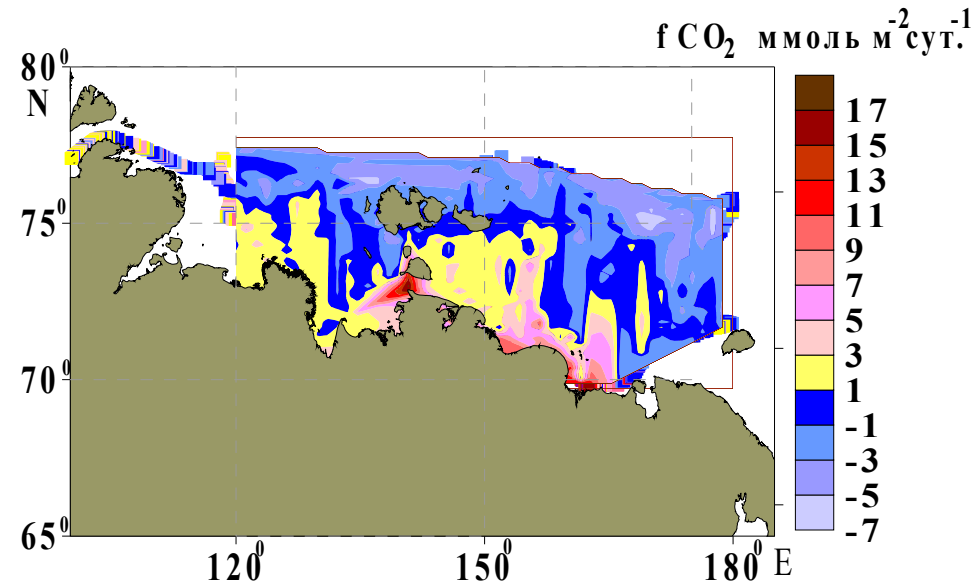
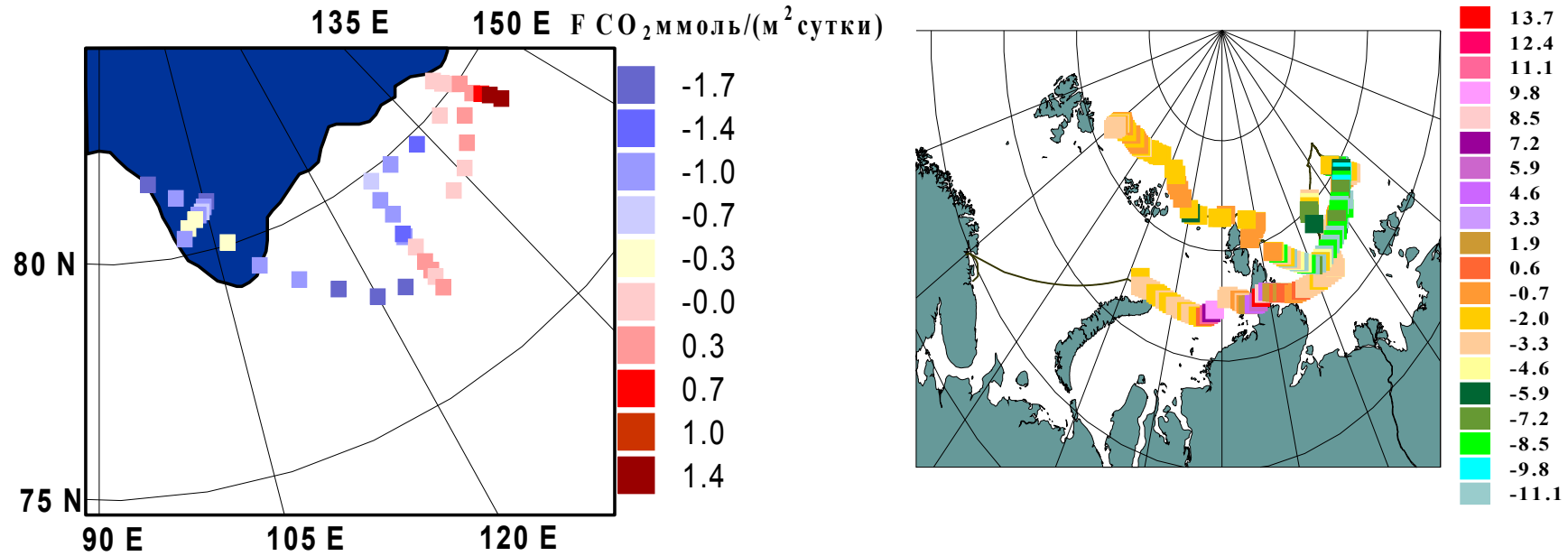
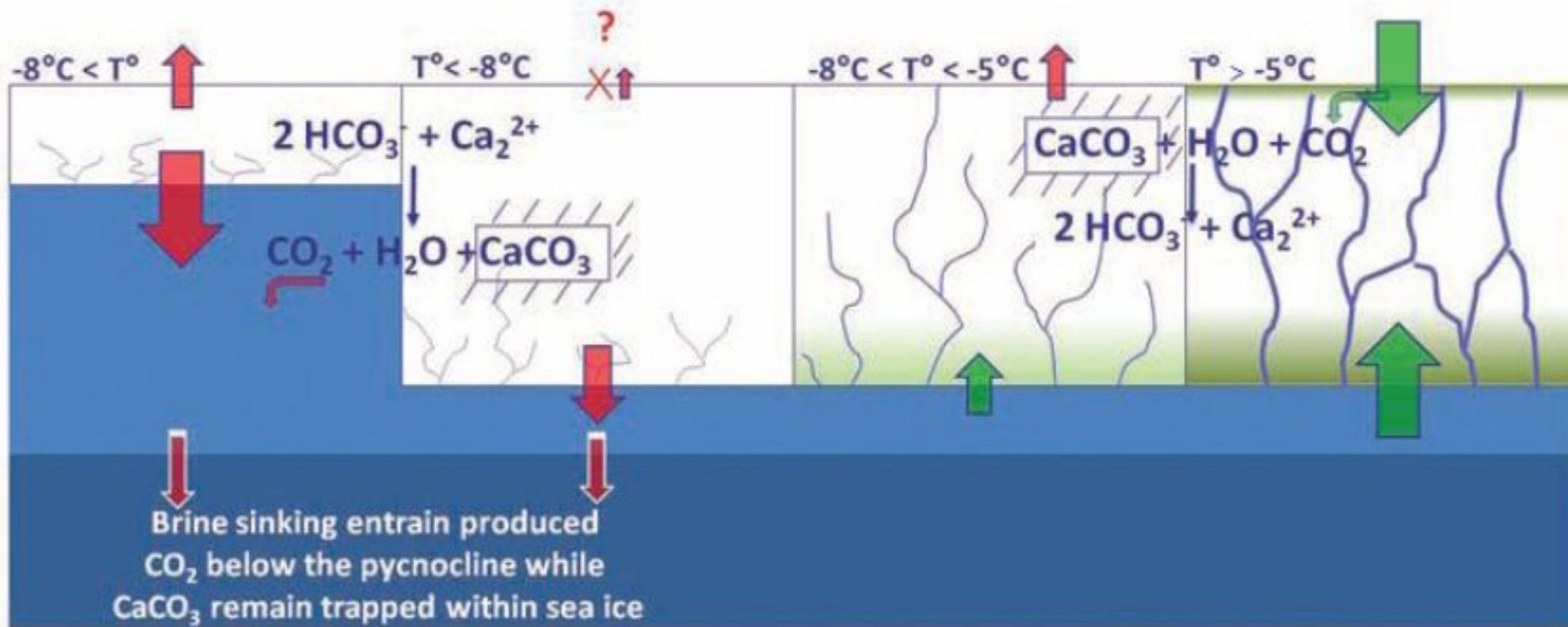


Схема увеличения сезонных колебаний концентраций CO_2 связанных с уменьшением площади ледяного покрова

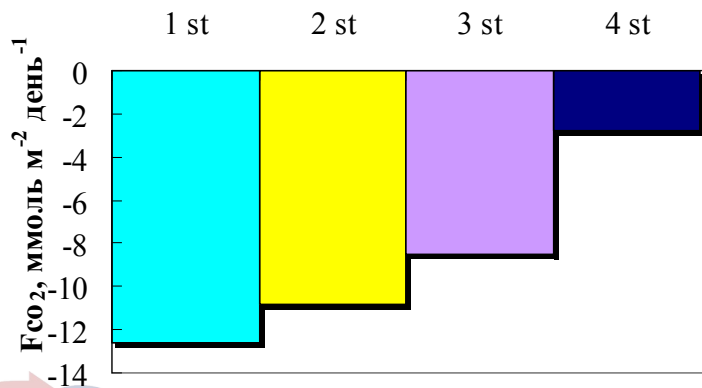
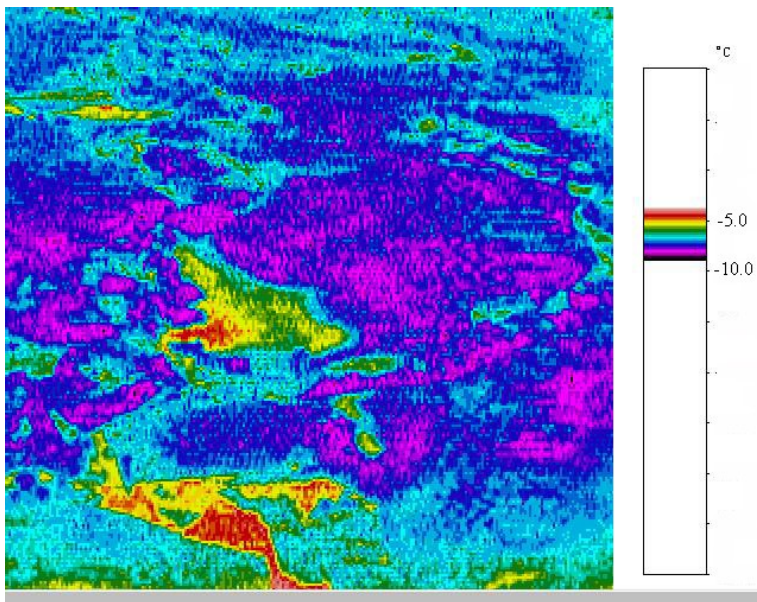
Лето – ранняя осень (устойчивая стратификация верхнего слоя моря) Осень (неустойчивость в верхнем слое)



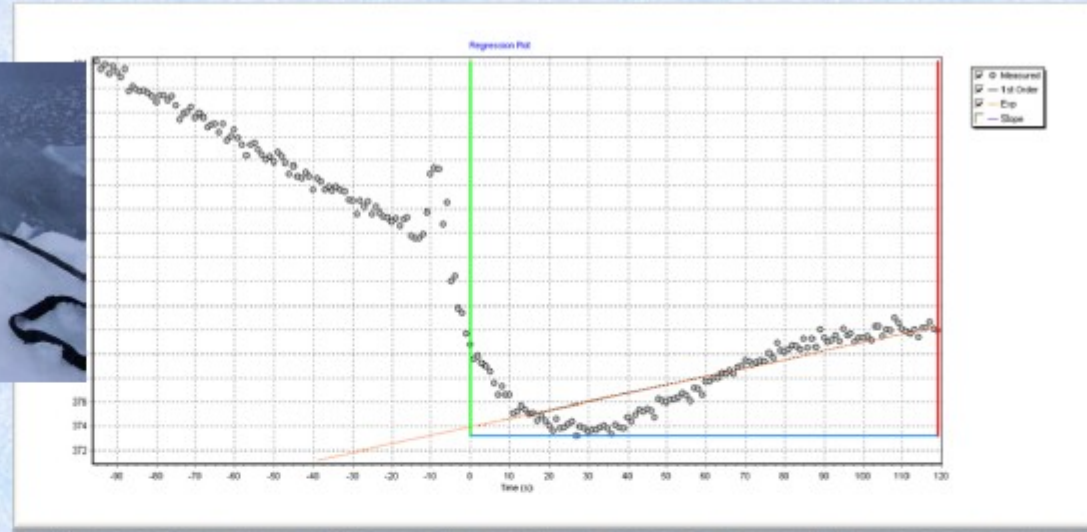


Газообмен через лед

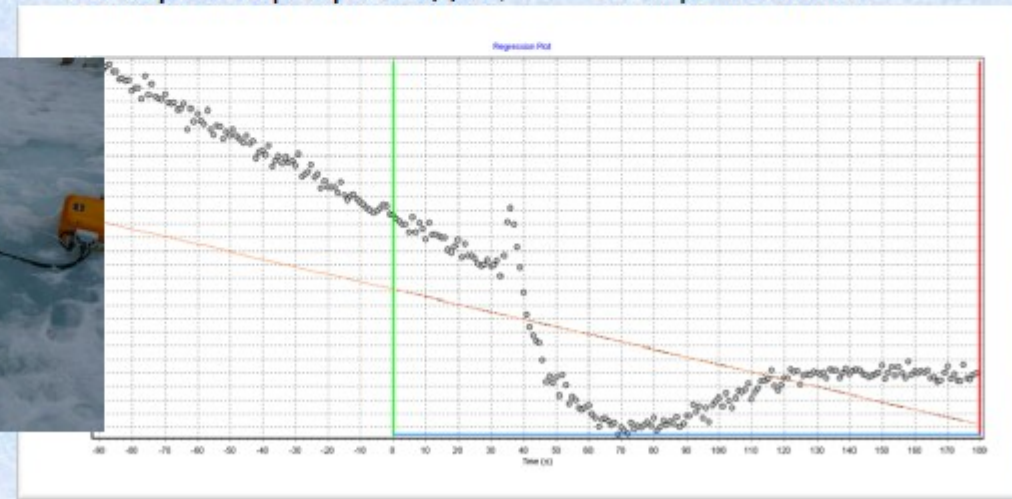
Снежницы на поверхности льда



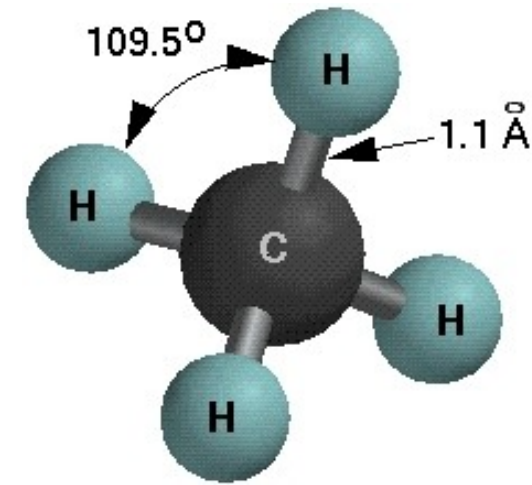
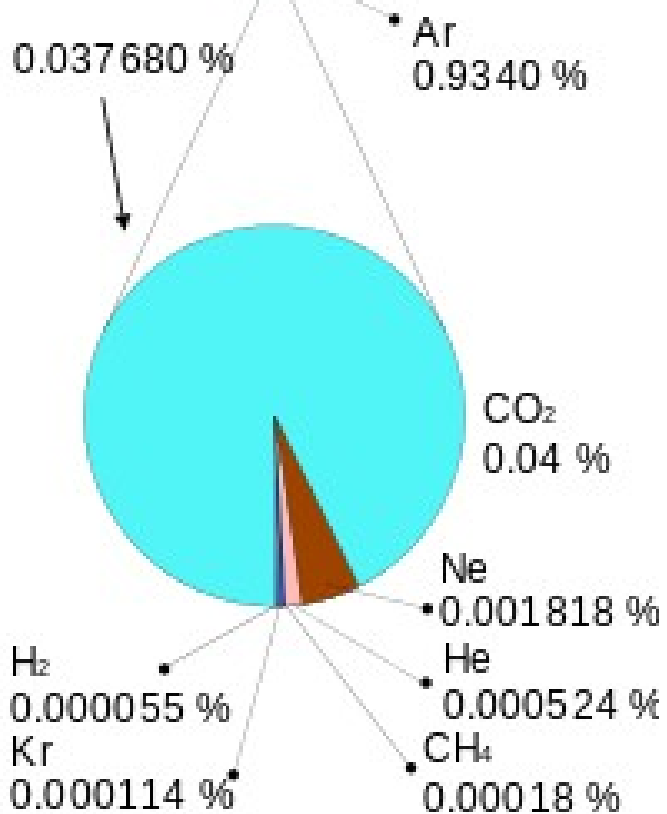
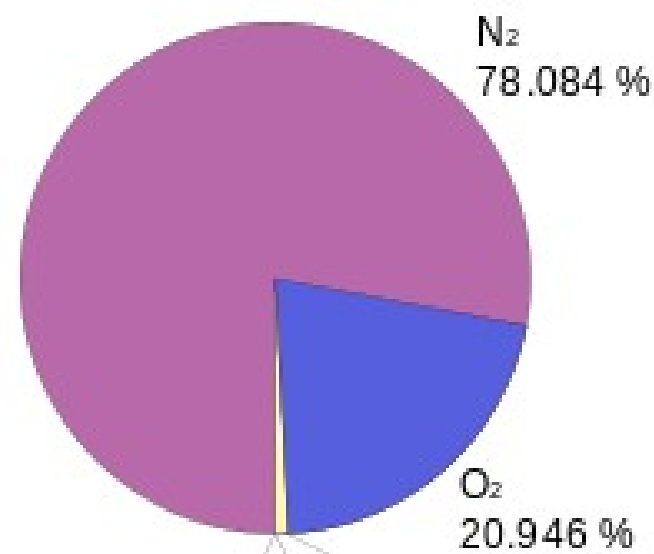
Зависимость потока углекислого газа от концентрации снежниц



Замерзающее разводе, $F = 0.44 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$



снежница, $F = -0.43 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$



- 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 долевом 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)

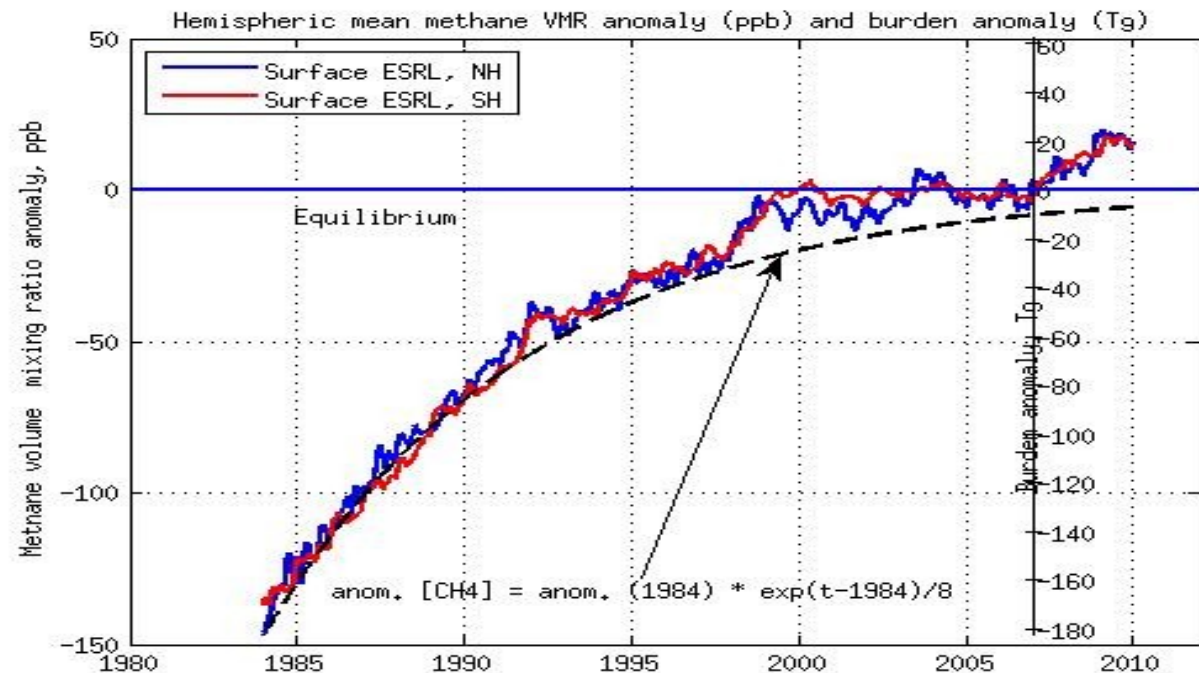
ppm - части на миллион

ppb - части на миллиард

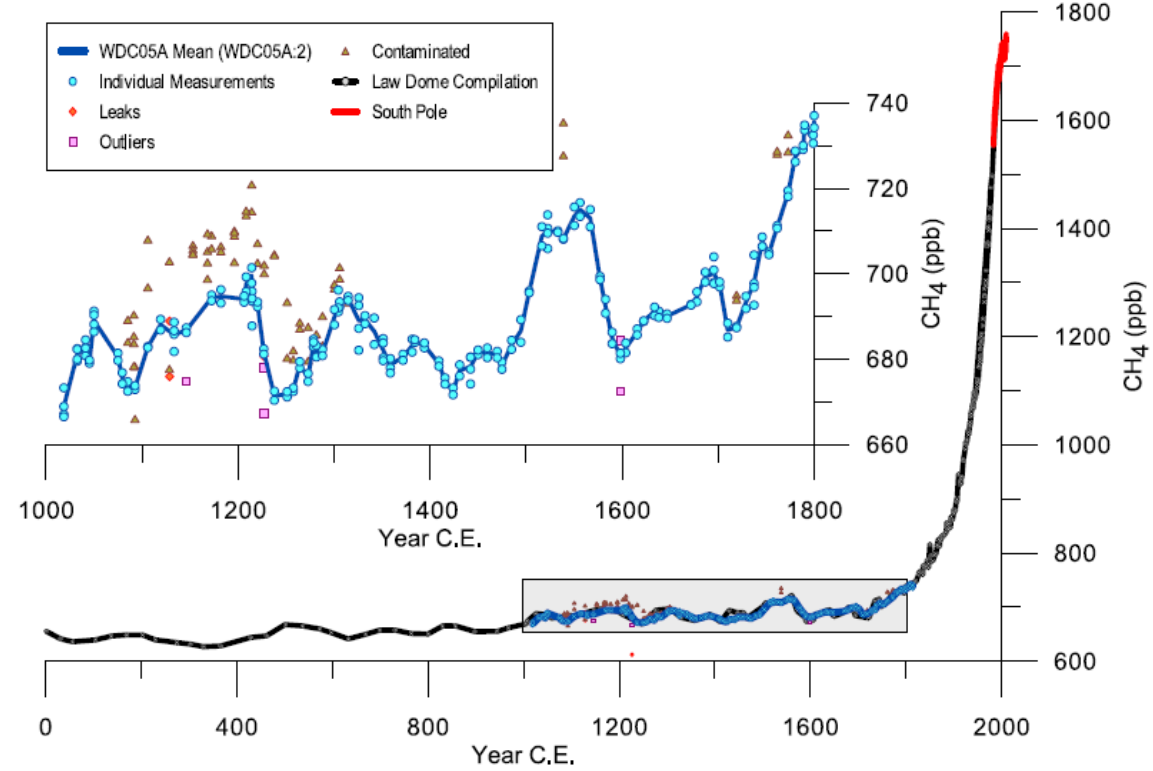
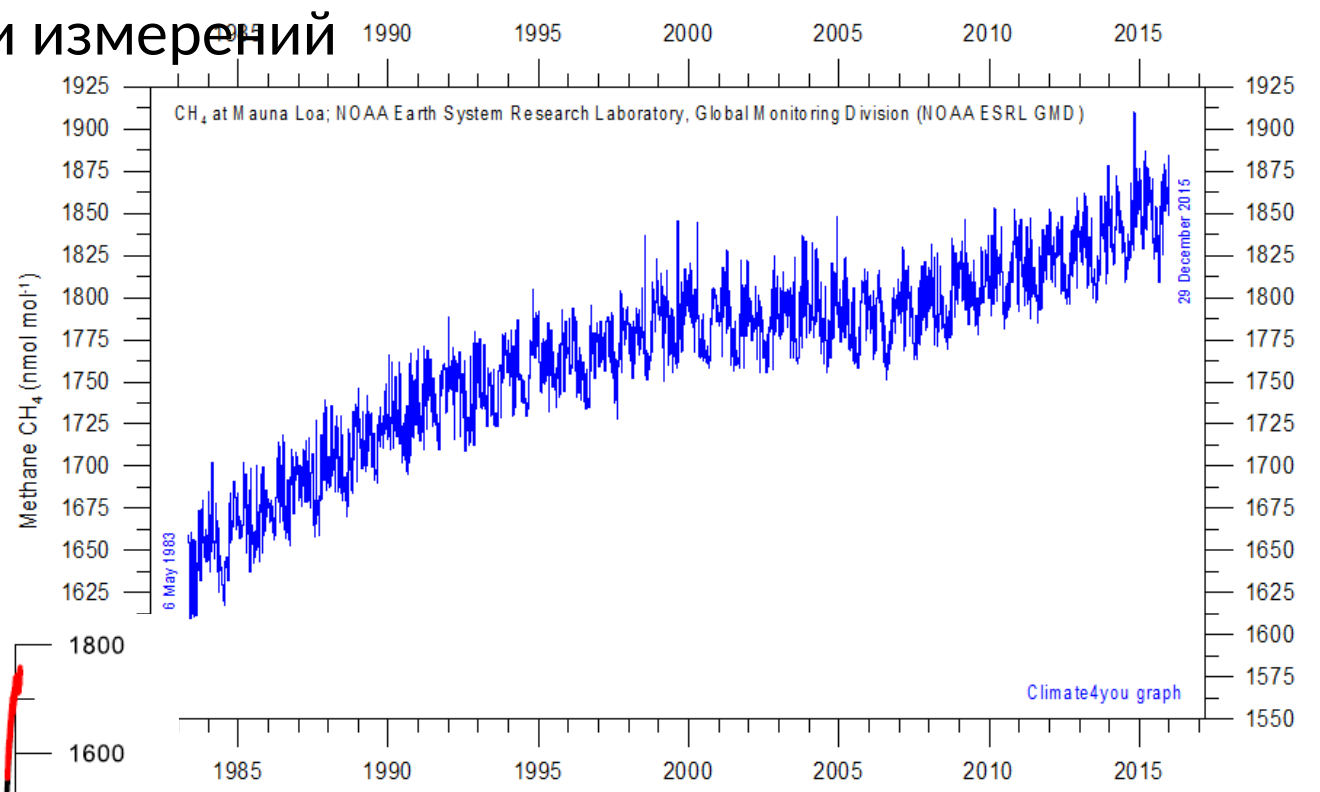
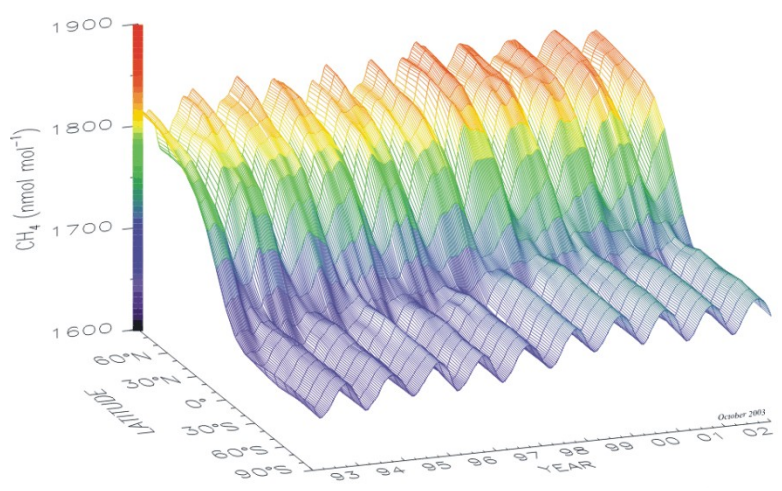
ppt - части на триллион

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

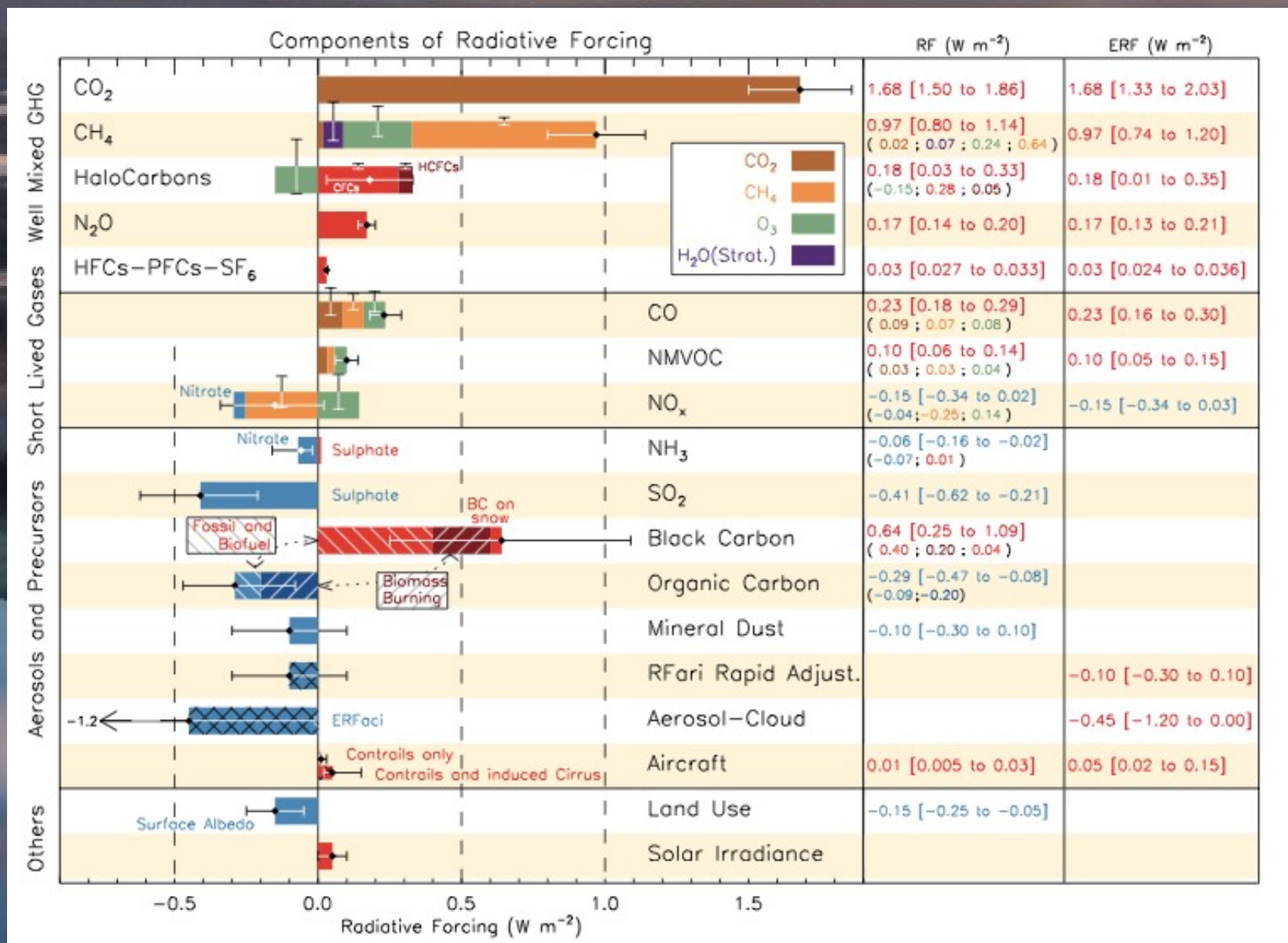


Концентрации метана по данным кернов и измерений



Метан – «темная лошадка» семейства парниковых газов

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, °С	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.

Источники и стоки метана в атмосфере

Источники:

Естественные

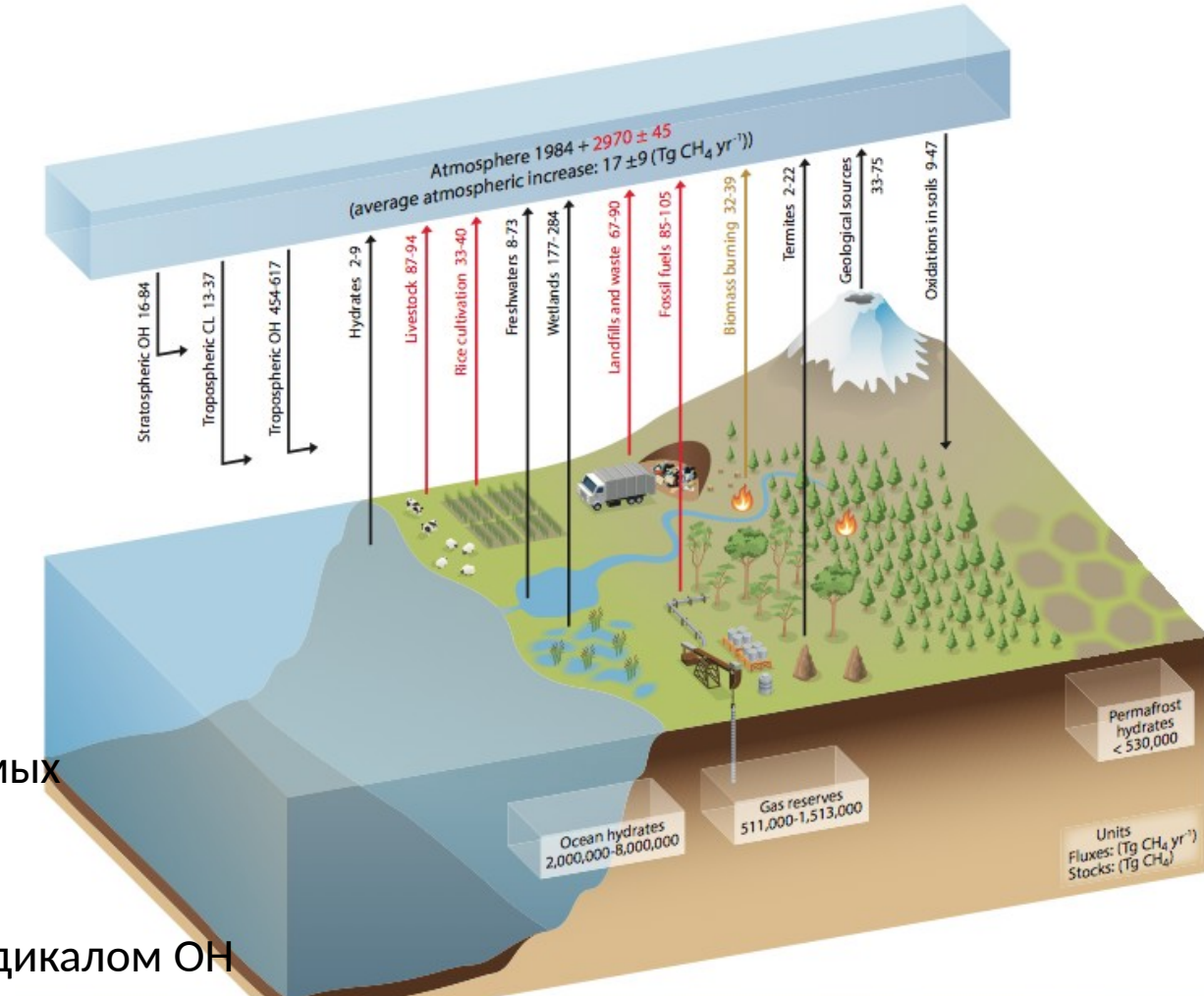
- Болота
- Озера
- Термитники
- Вулканы
- Лесные пожары
- Метаногидраты

Антропогенные

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

Стоки:

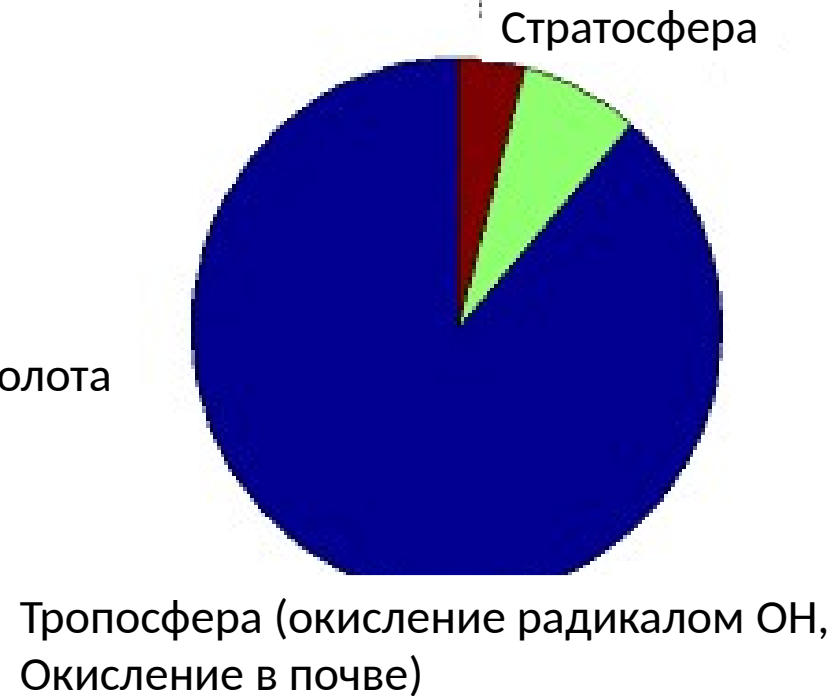
- Окисление в атмосфере радикалом OH
- Окисление в почвах



Источники

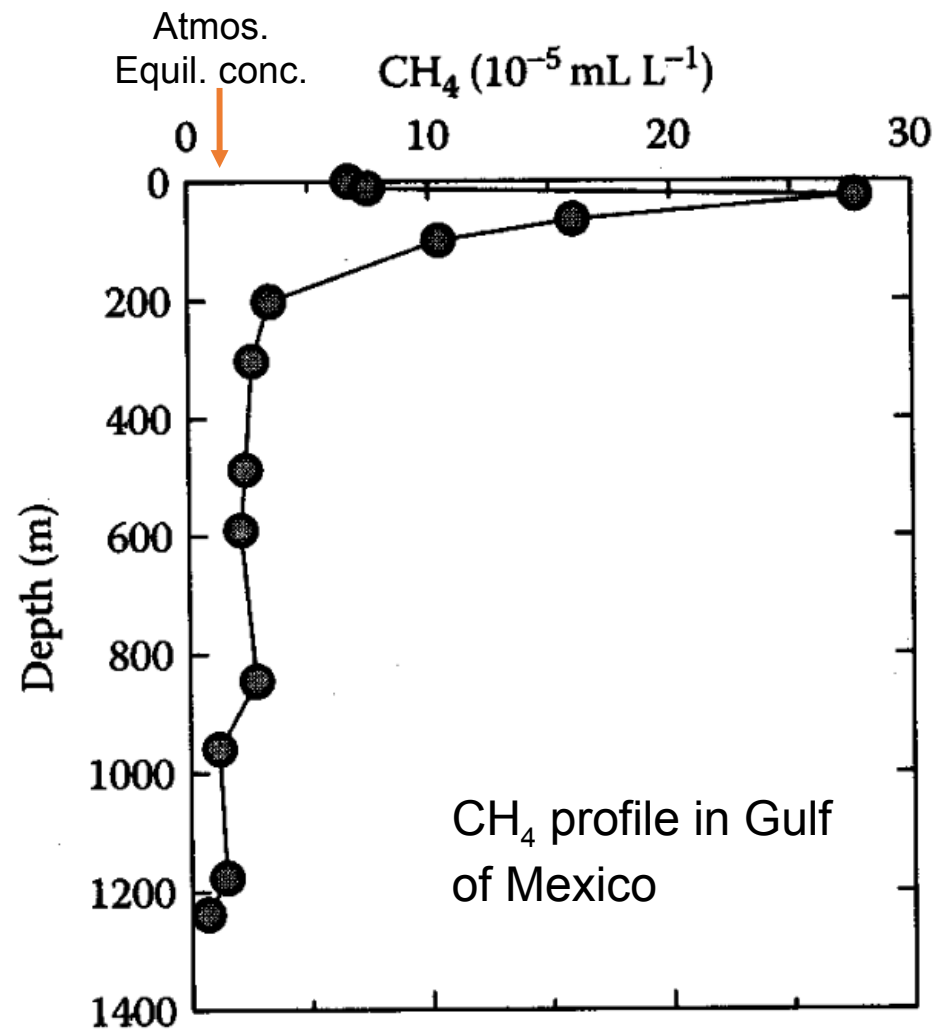


Стоки



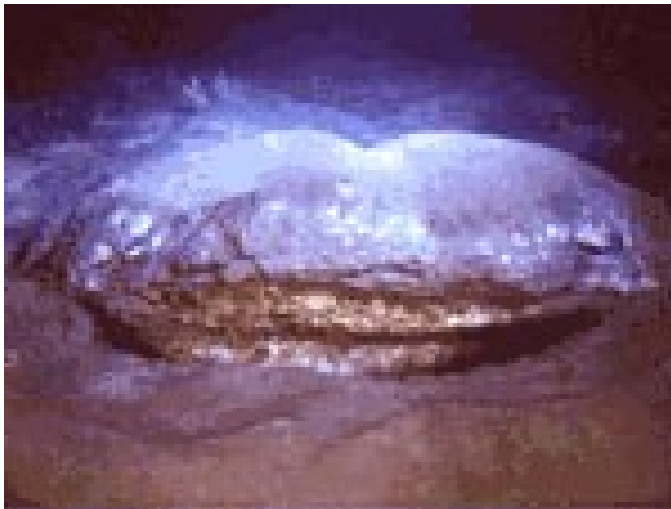
Основной современный источник метана – микробиологические процессы (болота, как естественные, так и искусственные рисовые поля), а также жвачные животные и свалки. Газовые факелы и угольные разработки – пример выделения древнего метана. Метан, выделяемый океаном (газогидраты), очень мал – только несколько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

Парадокс океанического метана - морская вода в открытом океане на 0,1–3 раза перенасыщена (насыщенность 110–300%) CH_4 по всему Мировому океану, а подповерхностные максимумы в смешанном слое и термоклине обычно даже больше. Таким образом, океаны являются небольшим чистым источником эмиссии CH_4 в атмосферу. CH_4 вырабатывается только анаэробными бактериями, так как же поддерживается перенасыщение? Причиной могут быть аноксические микрзоны, хотя доказательства все еще отсутствуют. Биологическое потребление CH_4 в толще воды чрезвычайно низкое (~ месяцы-годы), поэтому обмен атмосфера-океан является основной потерей CH_4 .



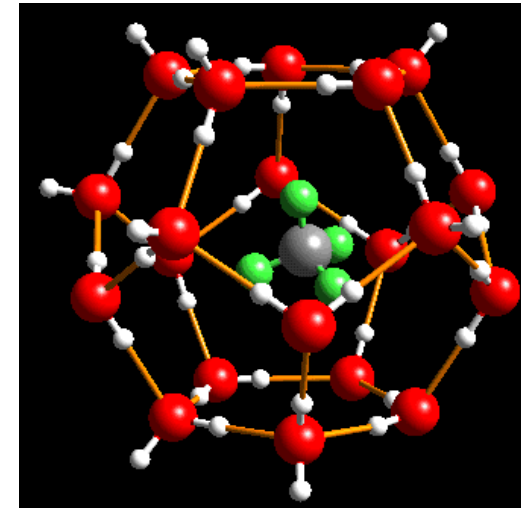
Обнаружено, что метилфосфонат (органическая форма фосфора) может превращаться в CH_4 микробами в аэробной морской воде. Это источник метана?

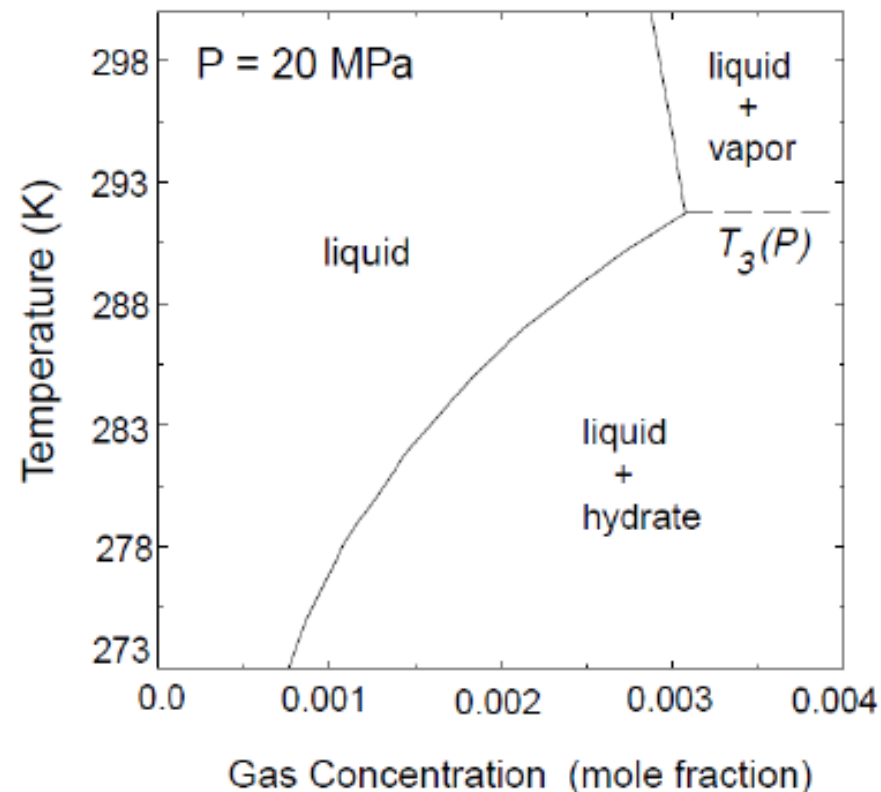
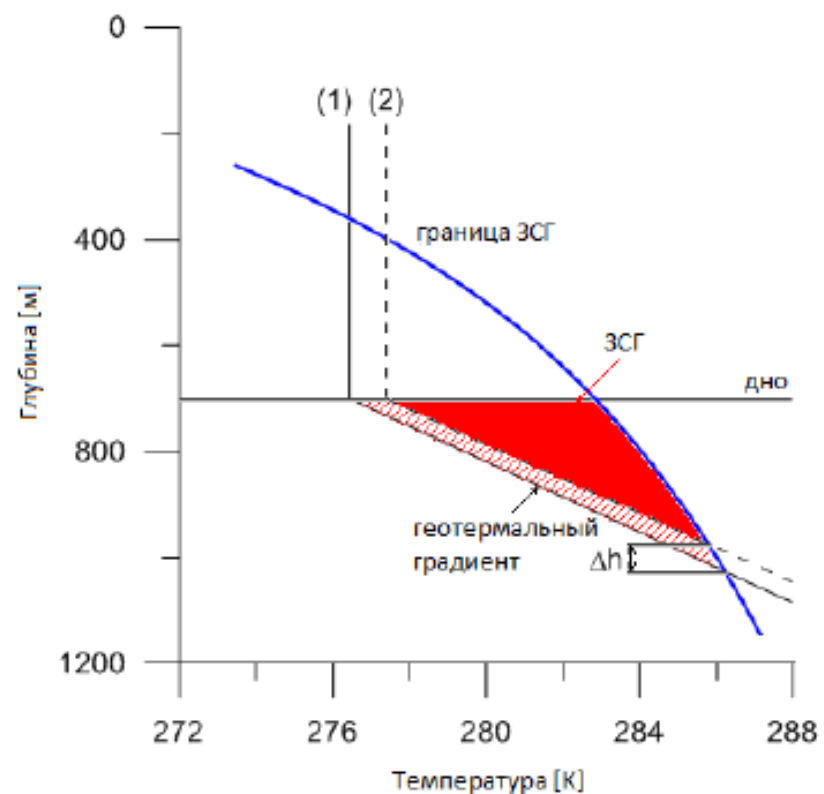
Концентрация растворенного CH_4 также увеличивается около гидратов метана, кристаллического твердого вещества, в котором молекулы воды удерживают молекулу CH_4 в решетчатой структуре (клатрате).



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



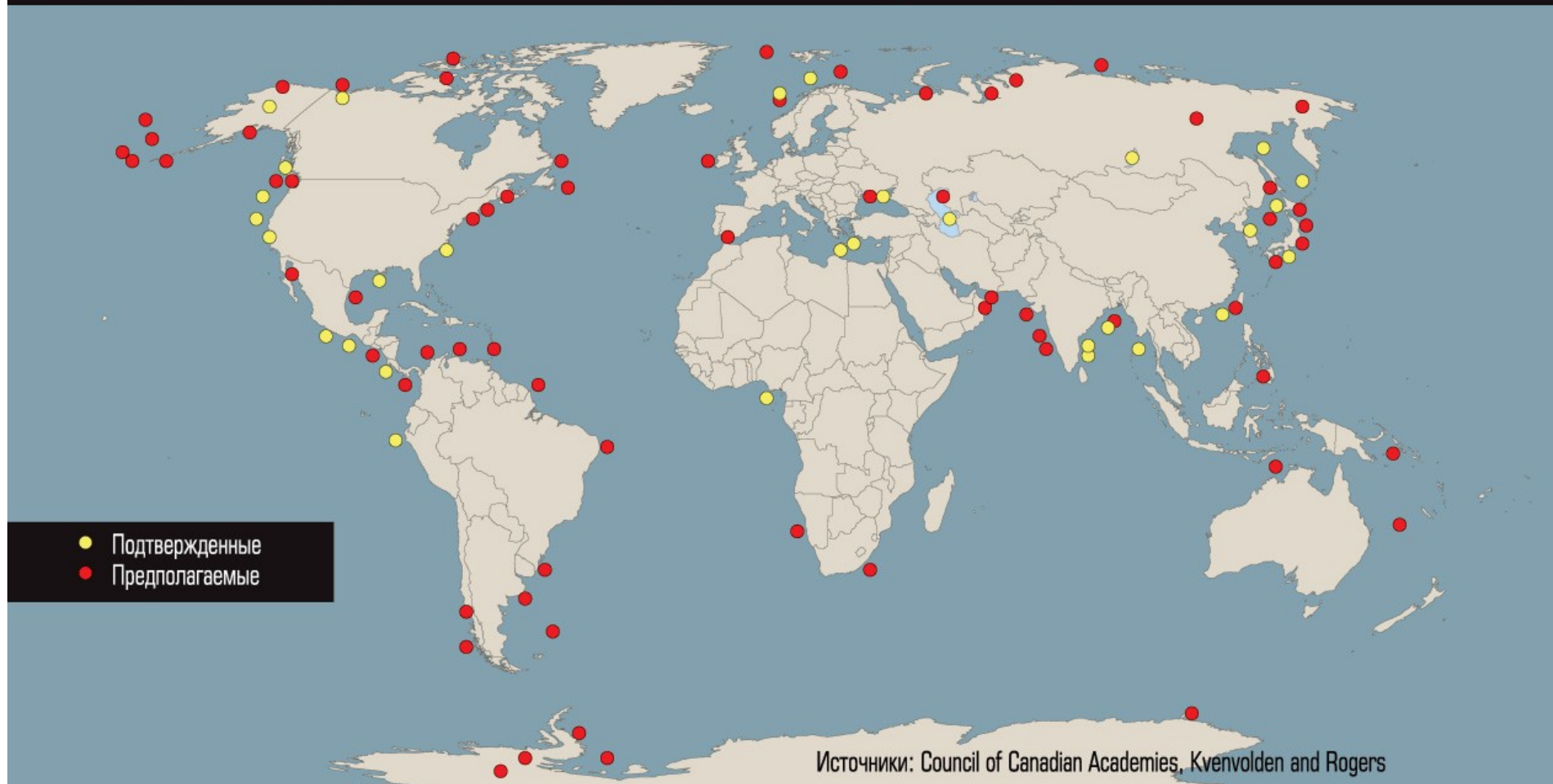


Газовая концентрация (мольная доля)
 Фазовая диаграмма смеси метана с водой (Zatsepina, Buffett 1997)

Гидраты образуются в донных отложениях при достаточно высоком давлении и низкой температуре, если концентрация метана в воде превышает пороговое значение.

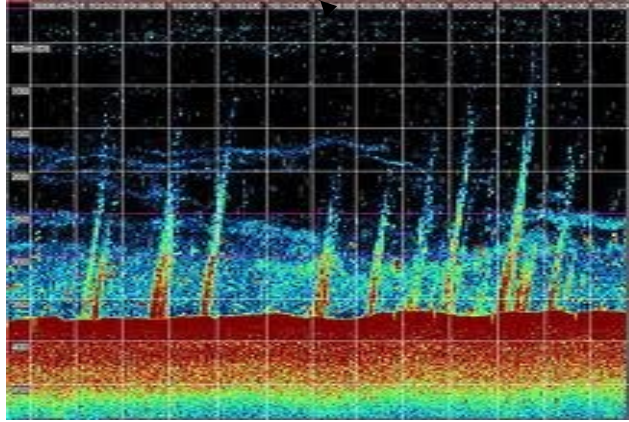
Такие условия достигаются в районах быстрого накопления осадков с большим содержанием органики при глубине более 350 м вдоль континентальных склонов.

Подтвержденные и предполагаемые месторождения газовых гидратов в мире

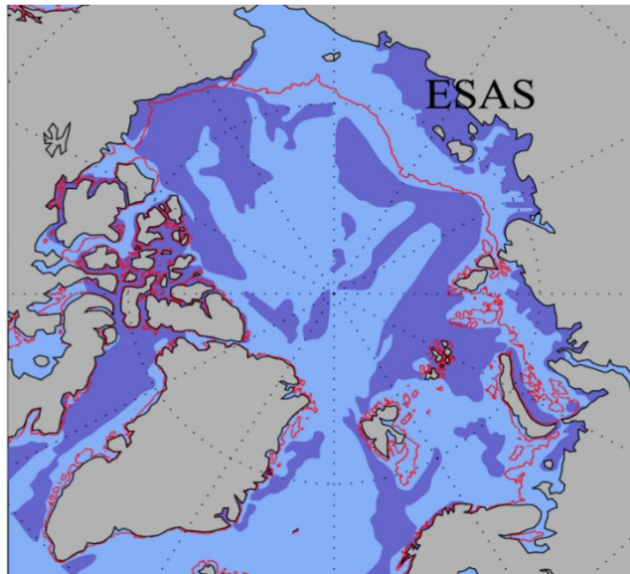
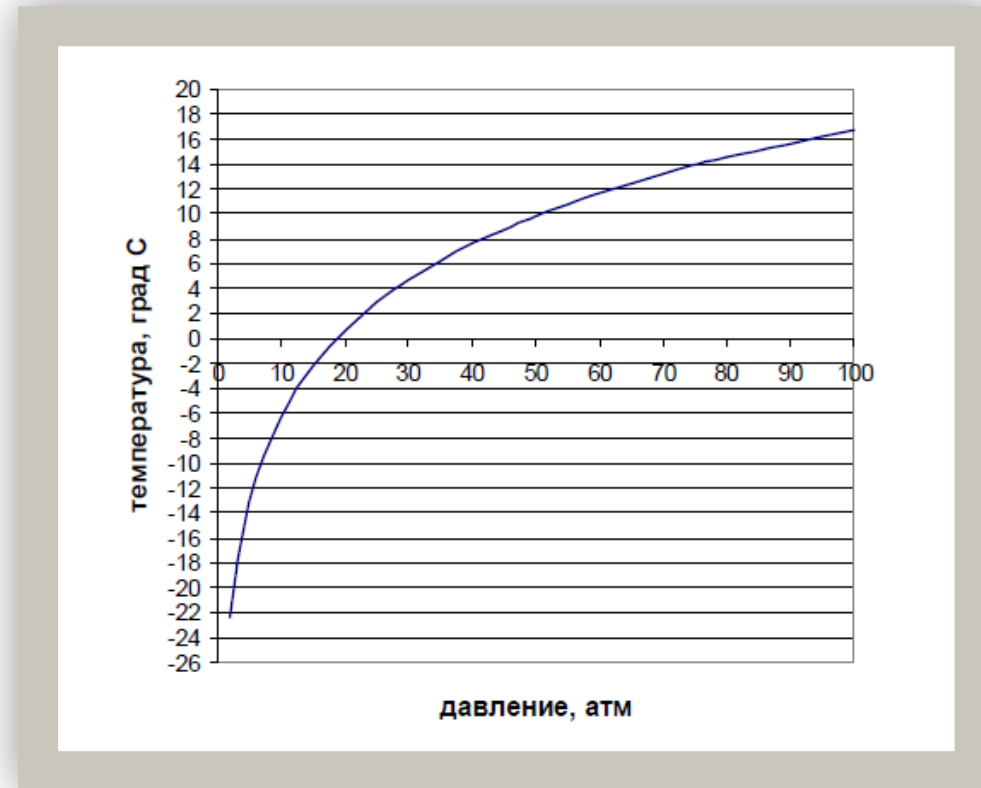


- 1 м^3 гидратов содержит до 170 м^3 газа при нормальных условиях
- Суммарные запасы углерода в гидратах оцениваются в 10000 ГтС (Kvenvolden 1988)

Фазовая диаграмма метаногидратов



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

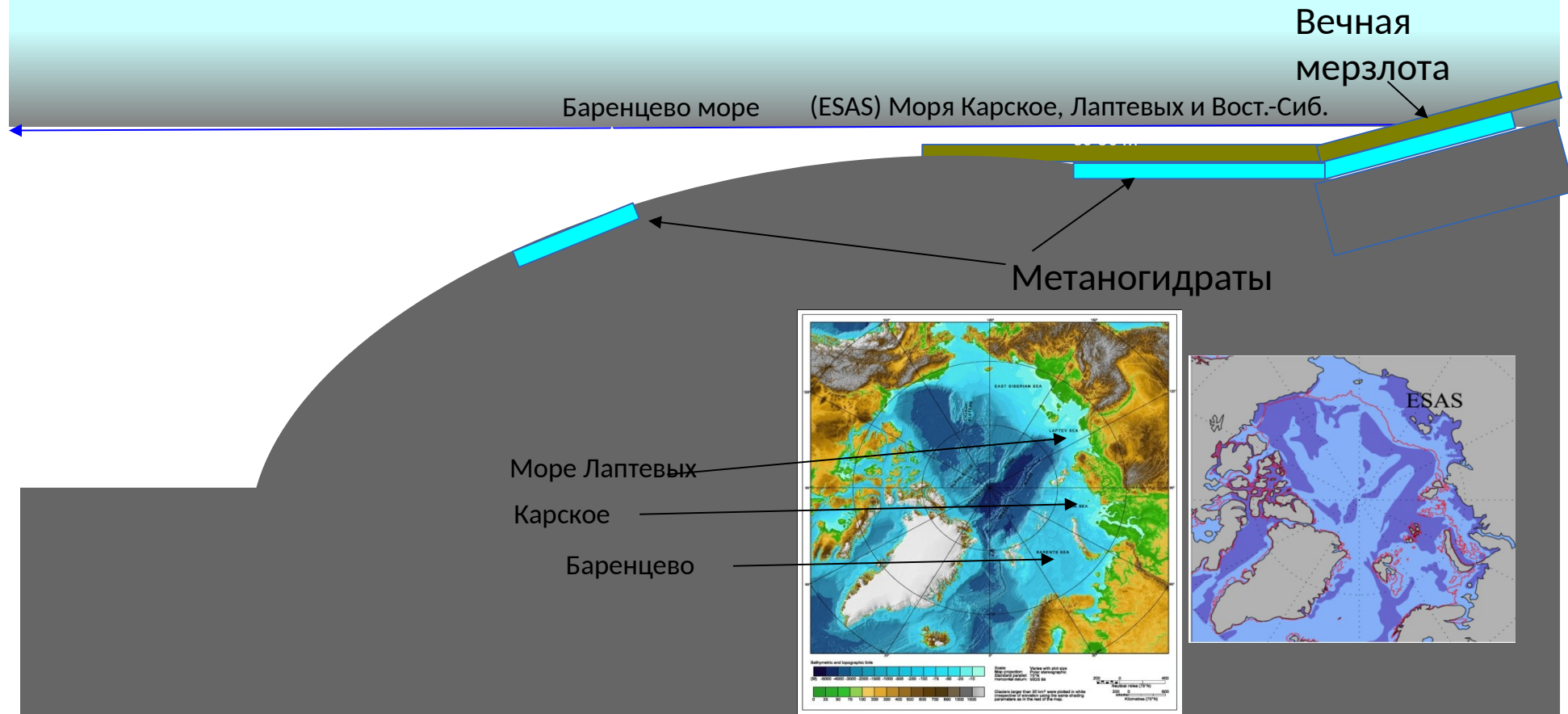


← Положение метаногидратов по расчетам Соловьева и др., 1987

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

Упрощенная схема метаногидратов в Арктике

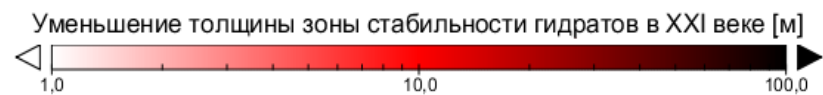
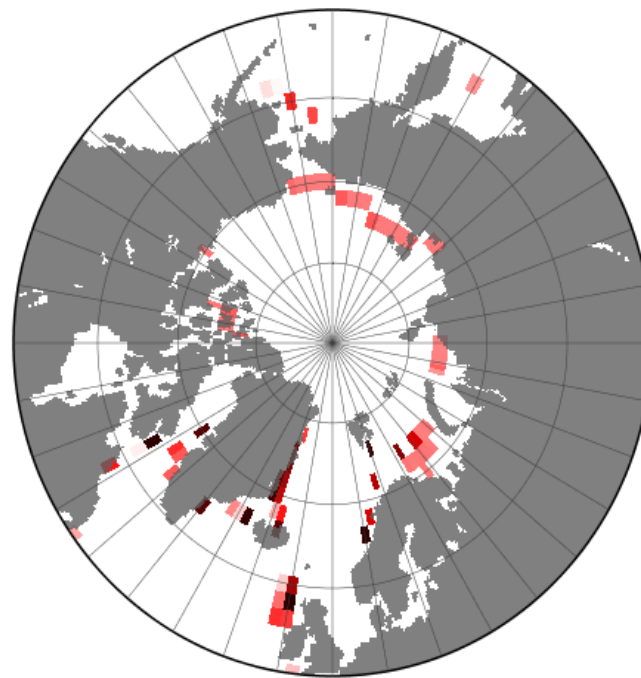
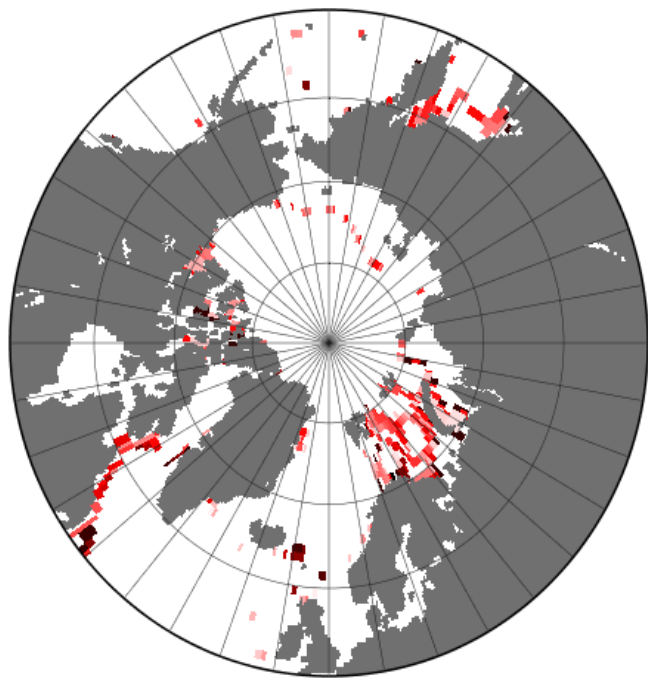
Расчеты показывают, что метаногидраты могут находиться в стабильном состоянии либо на глубинах больше 300 м, либо под слоем вечной мерзлоты

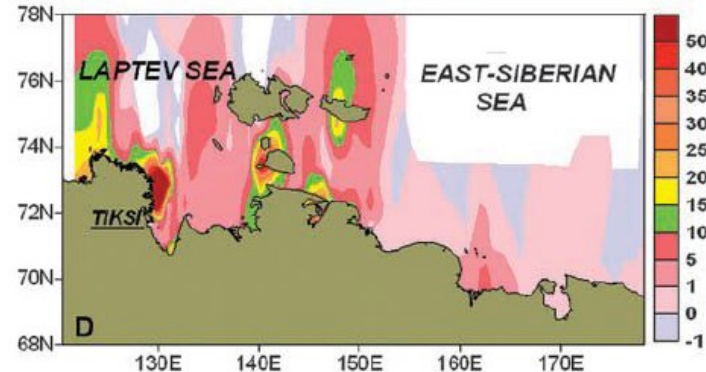
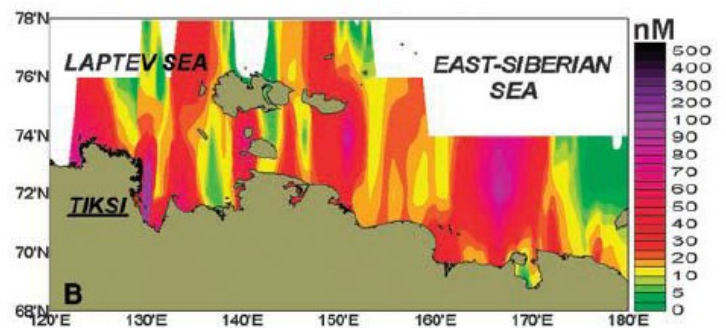
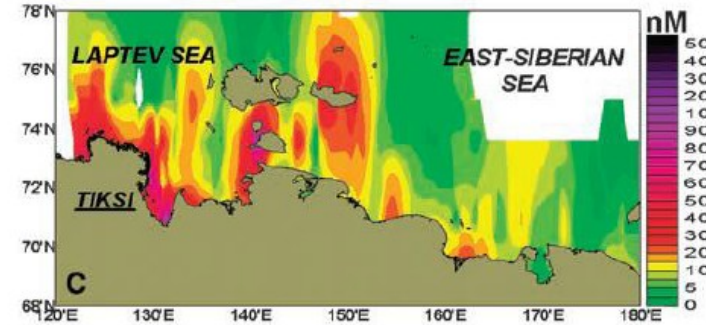
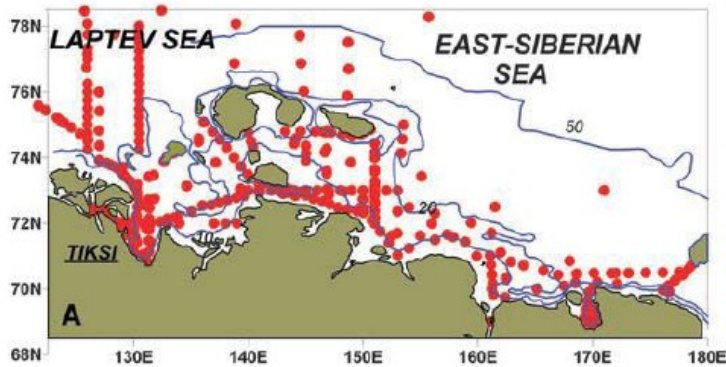


Оценки стабильности запасов субаквальных гидратов

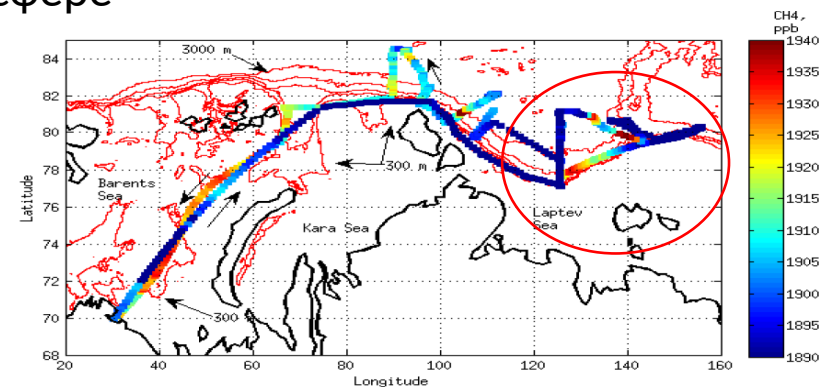
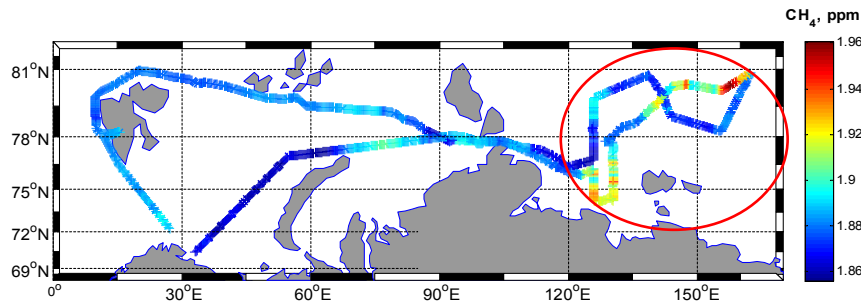
климатическая модель GFDL / модель донных отложений ИФА РАН
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2

климатическая модель IBM PAN / модель донных отложений ИФА РАН
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2



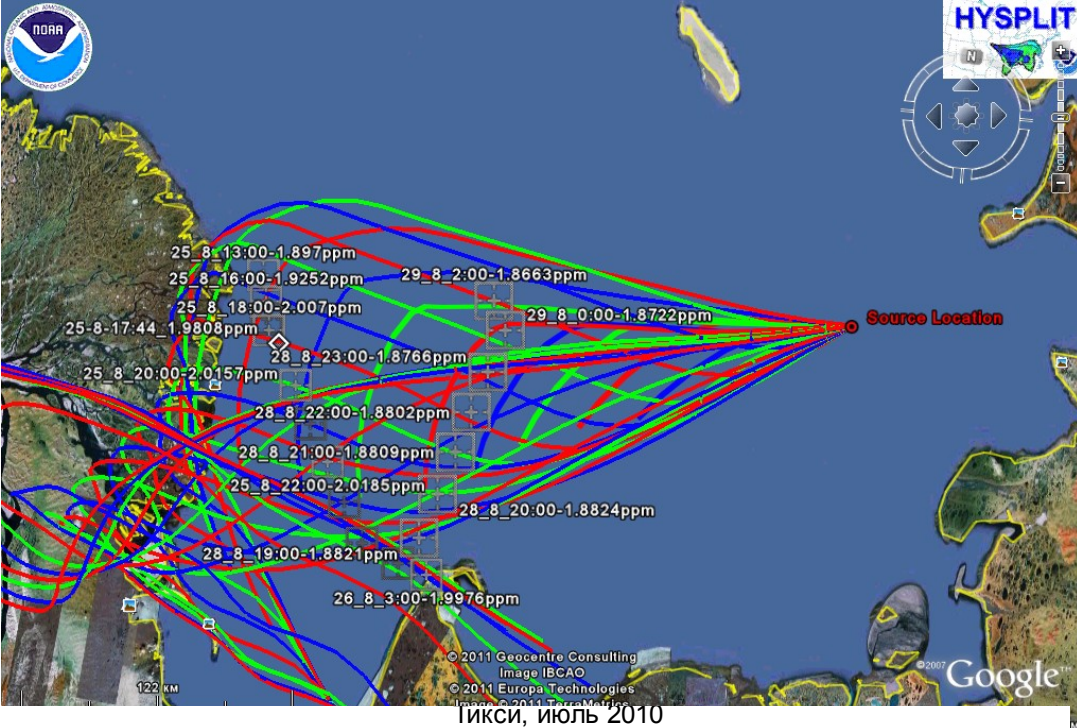


Shakhova et al, 2010: а) положение станций; б) концентрация метана у дна; в) концентрация метана у поверхности; г) в атмосфере

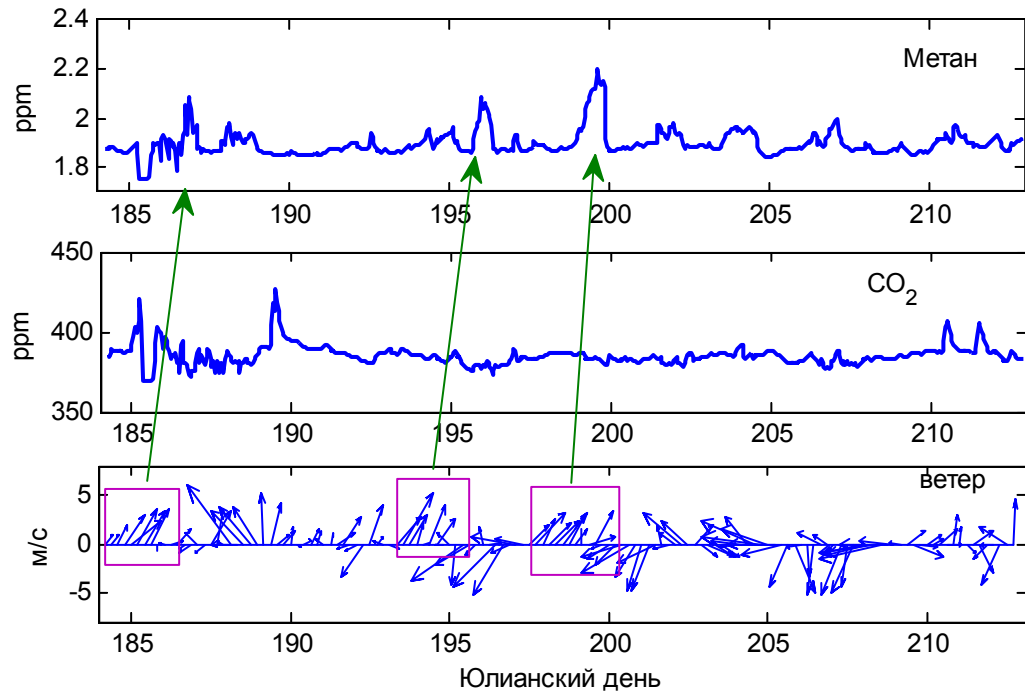


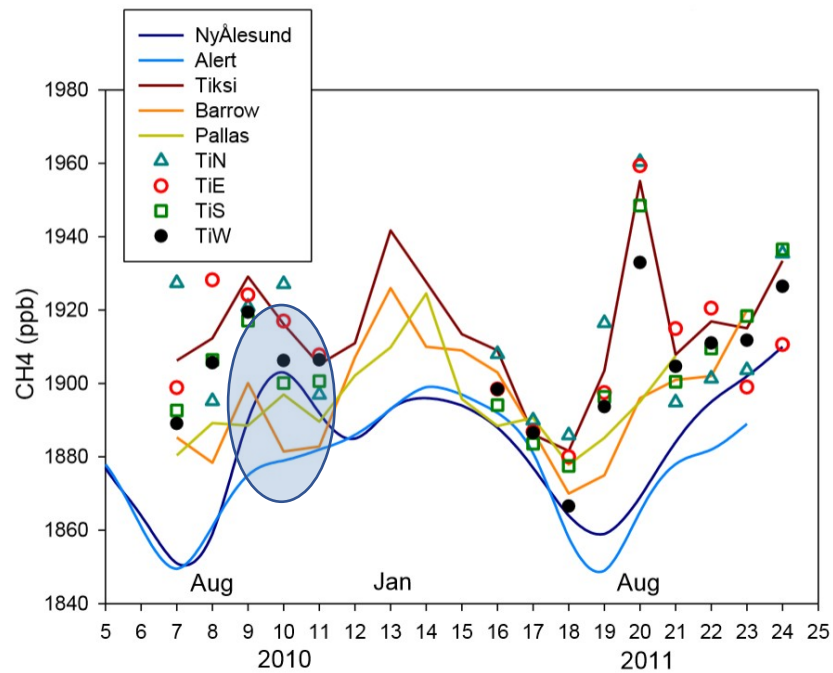
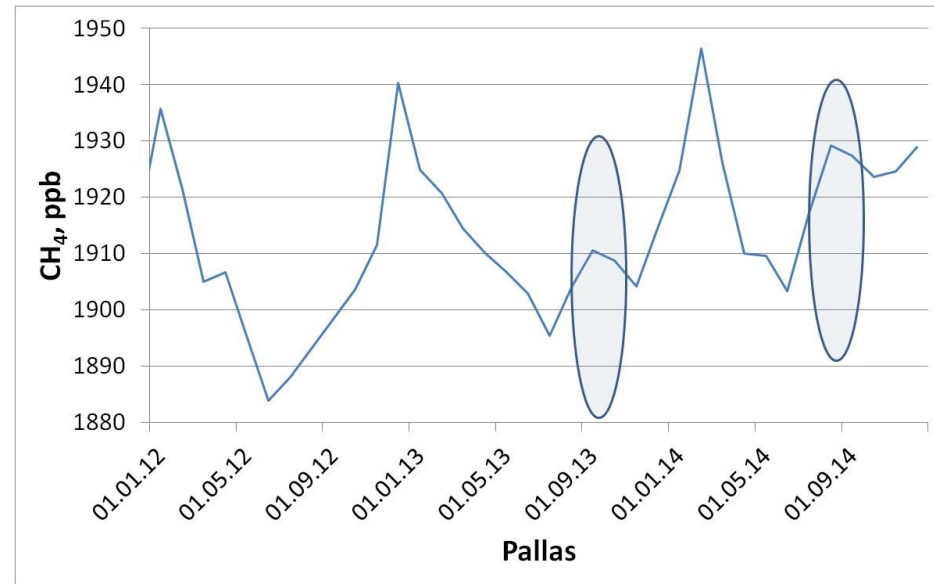
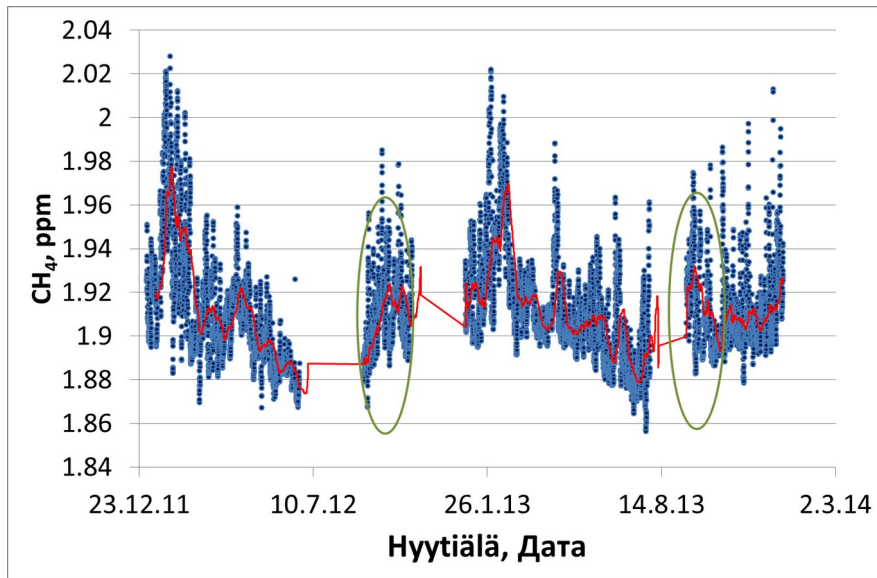
Концентрации метана в атмосфере по данным судовых измерений (Репина и др.)

а) 2007, б) 2013



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.





Концентрации метана, измеренные в арктических обсерваториях. Октябрьский максимум наблюдается в западном секторе.

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)

- **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 .

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

Метан над СЛО. Наличие источников метана в акватории СЛО вполне вероятно. Однако, по состоянию на конец 2021 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.

Насколько возможна дестабилизация газогидратов в морях Восточной Арктики (метановая катастрофа)?

- Нет достоверных сведений о существовании метаногидратов и подводной мерзлоты на шельфе Восточной Арктики
- Глубины предполагаемого залегания метаногидратов слишком велики для значимого повышения придонной температуры
- Источниками метана на шельфе МВА могут служить как резервуары, в которых содержится ранее синтезированный газ (гидраты, находящиеся в донных отложениях и природные углеводороды), так и органические осадки в придонном слое, где он постоянно образуется в процессе микробиального метаногенеза
- Для достоверных оценок необходимо привлекать спутниковые данные и данные моделирования

Метод закрытых камер

Изменение концентрации метана в камере со временем

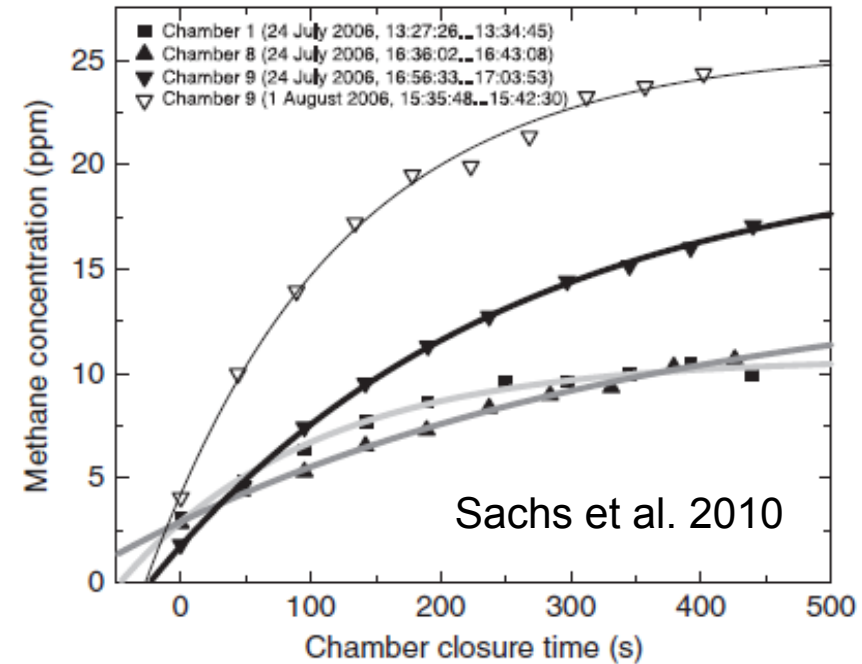
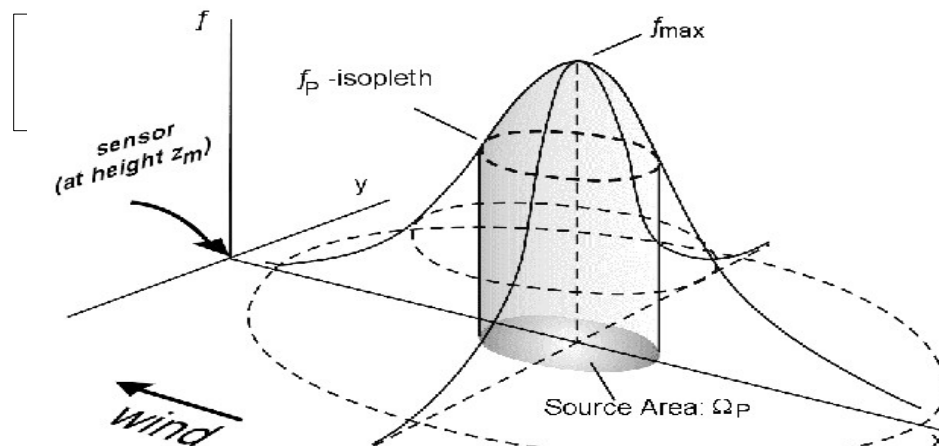


Fig. 4. Examples for nonlinear evolution of CH_4 concentration in the closed chamber headspace for different microsites and dates. The exponential fits of the form $c\text{CH}_4 = \beta_1 + \beta_2 \exp(\beta_3 t)$ are also given for each concentration curve.

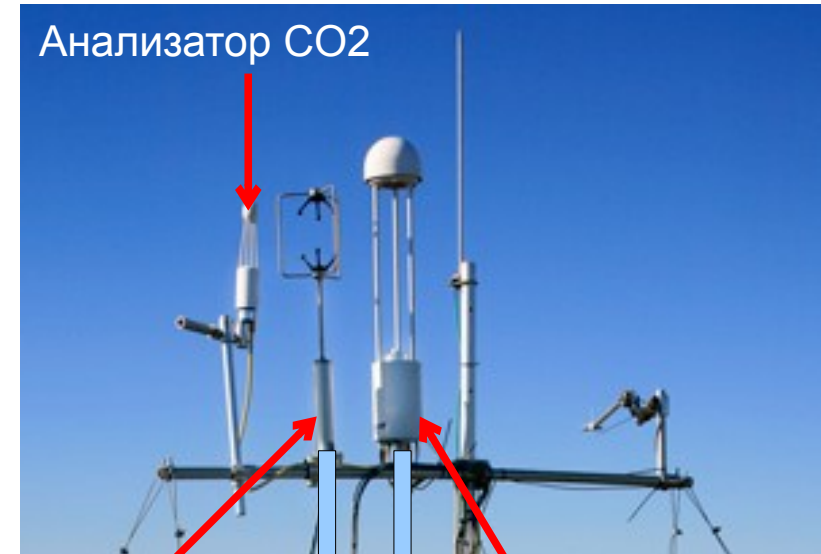
- Измерение локальных потоков метана на подстиляющей поверхности (на данном микроэlemente ландшафта)

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»**



<http://www.indiana.edu/~climate/SAM/ExpDes/ExpDesignNEW.htm>



Акустический анемометр

Анализатор CH4

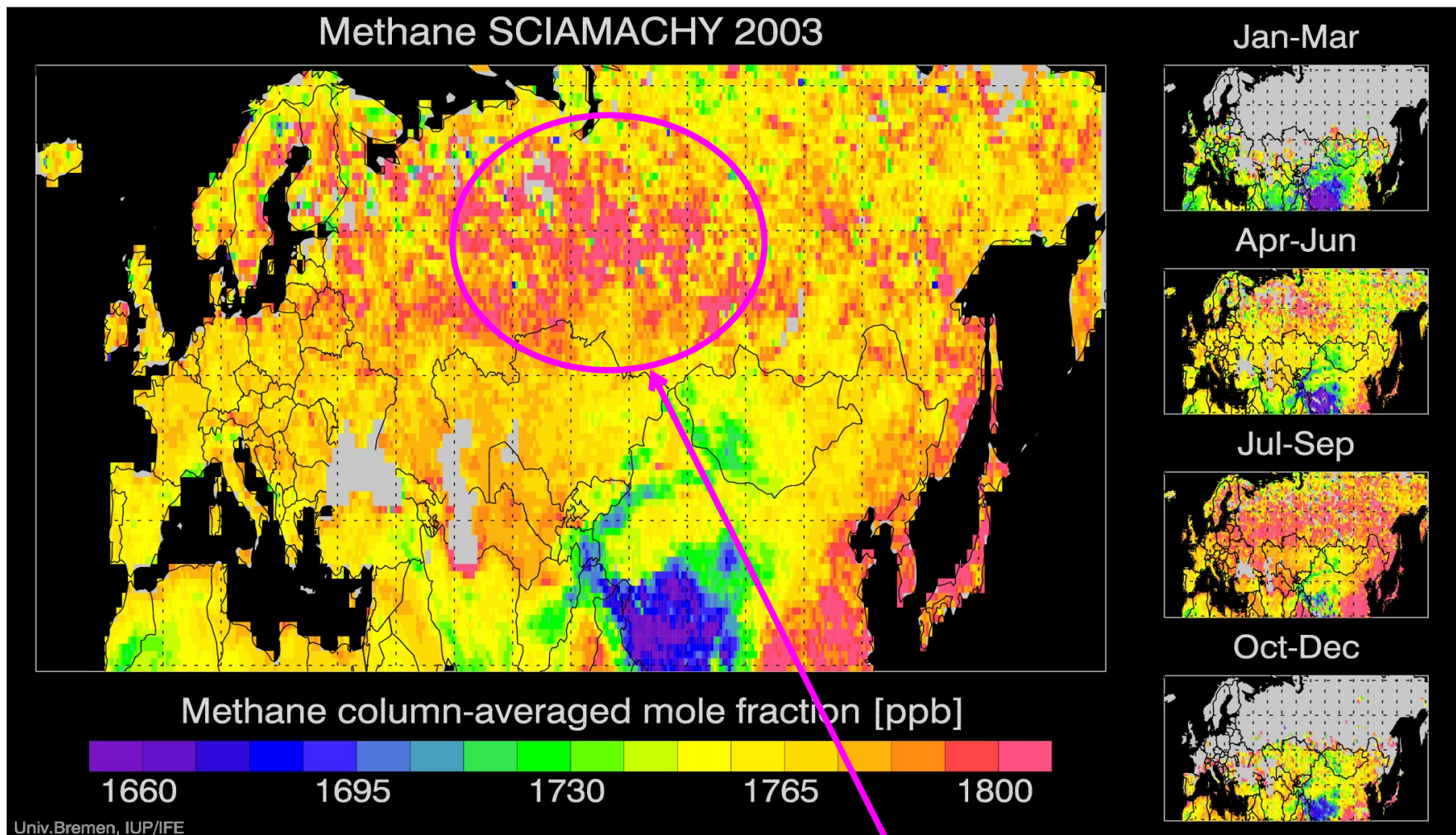
W C

Измерения с частотой $n \cdot 10$ Гц



Турбулентный поток газа

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)

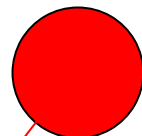
3) **AIRS** (Atmospheric Infrared Sounder, <http://airs.jpl.nasa.gov/>)

Максимум концентрации метана над Западной Сибирью указывает на высокие приземные выбросы.

Два типа спутниковых спектрометров

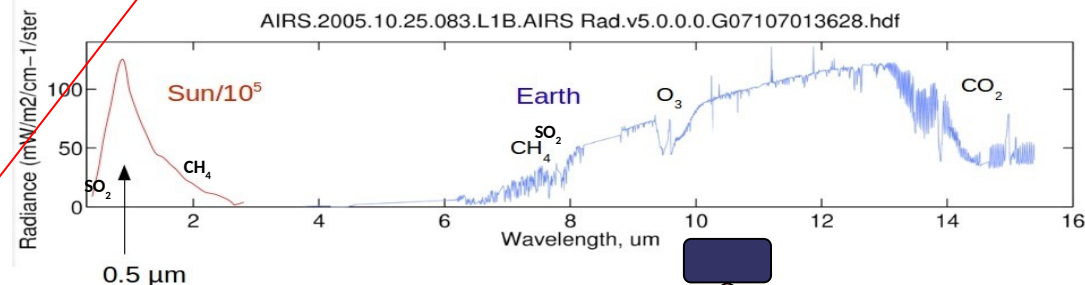
T ~ 6000 K

Излучение Солнца отраженное от земной поверхности



Тепловое излучение земной поверхности и атмосферы

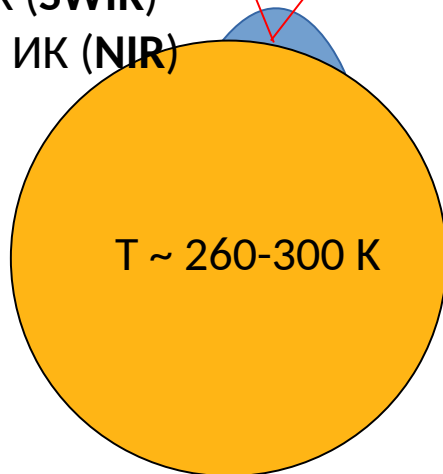
Schematic distribution of energy in spectra of the Sun and the Earth



OMI, SCIAMACHY,
OMPS, etc

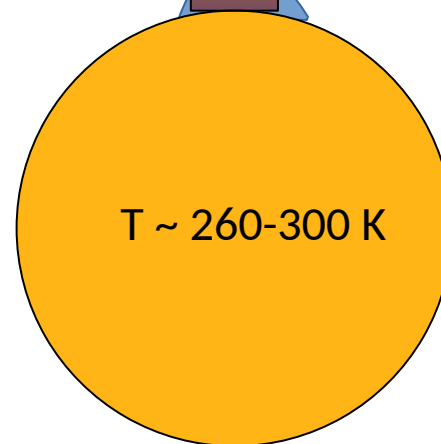


Коротковолновое излучение ИК (SWIR) или ближнее ИК (NIR)



T ~ 260-300 K

Thermal IR (TIR)
AIRS, IASI, CrIS, etc



T ~ 260-300 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.

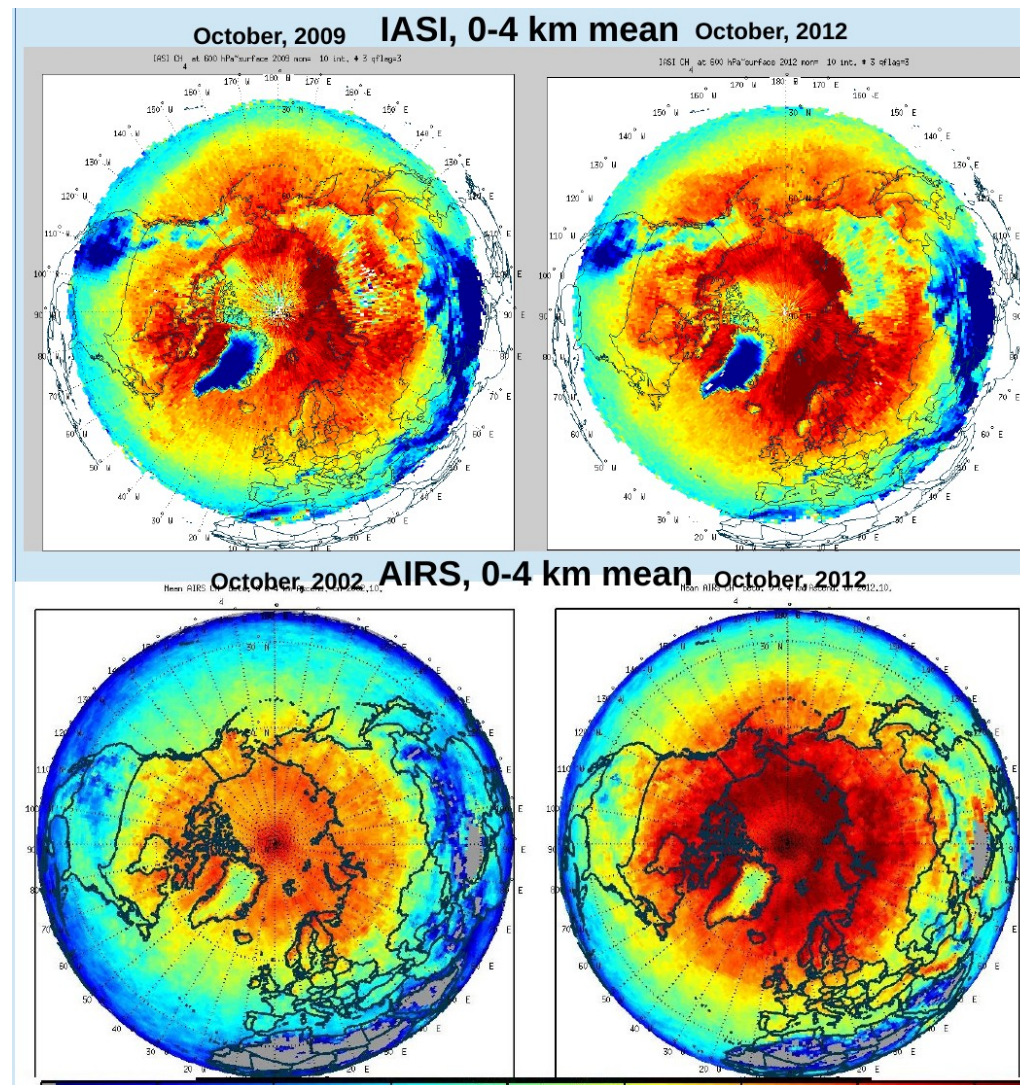
AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) /Aqua – это дифракционный спектрометр разработанный в НАСА (последняя версия данных № 6), на орбите с 2002 года.

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

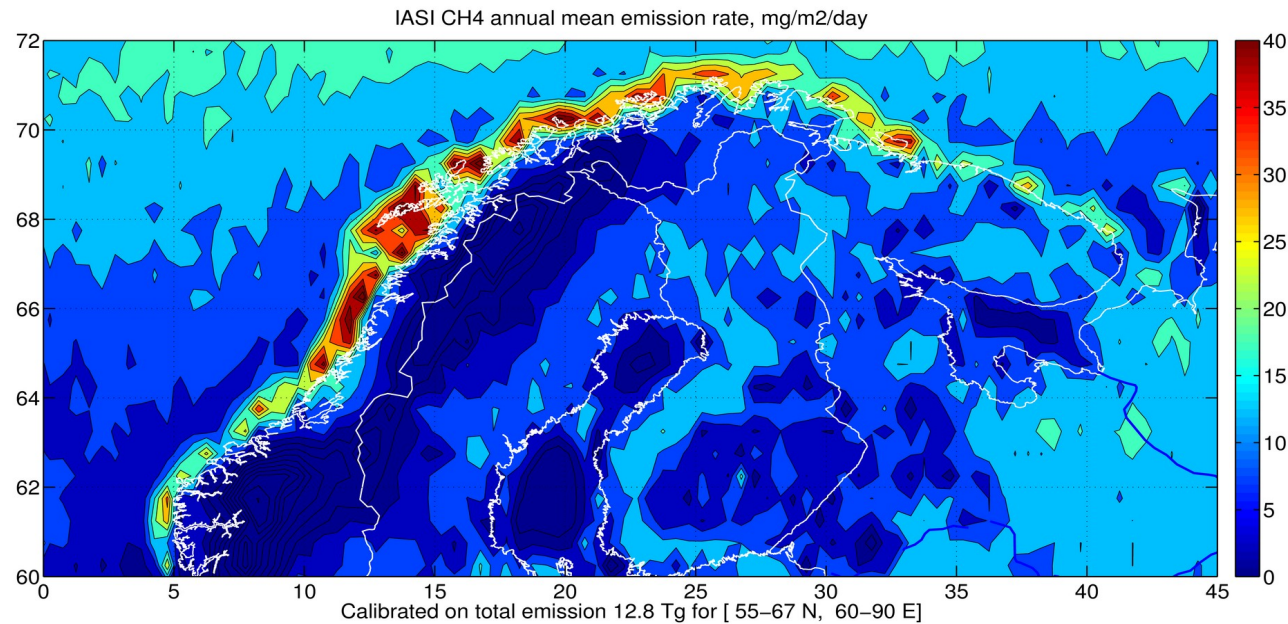
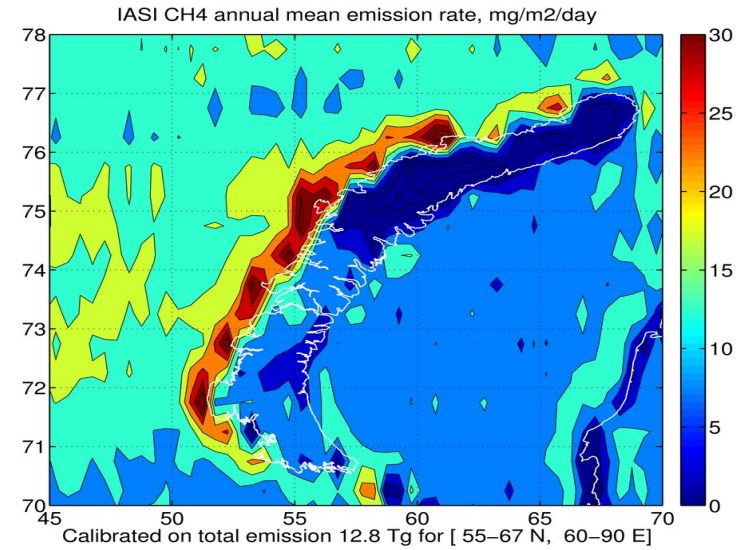
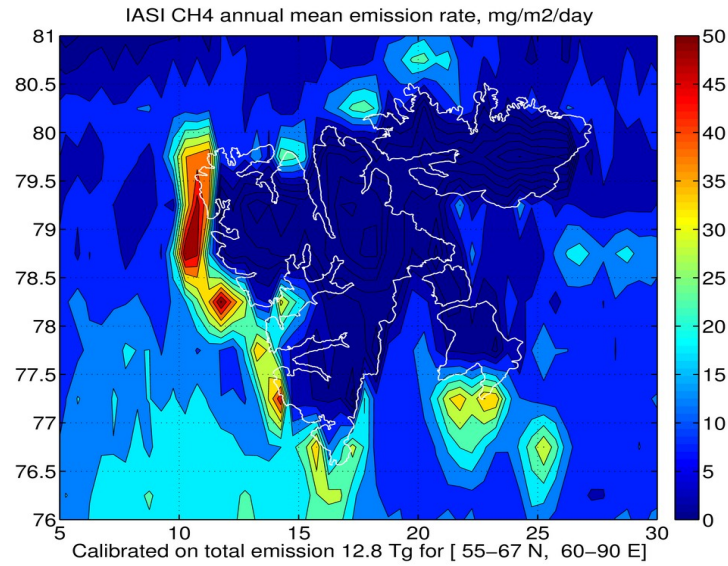
Спектральное разрешение AIRS $\sim 2 \text{ см}^{-1}$ Спектральное разрешение IASI $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$

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



Сравнение среднемесячных спутниковых снимков за октябрь 2009 (2002) и октябрь 2012

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



Пресноводные экосистемы в карбоновом цикле

(Tranvik et al. 2009)

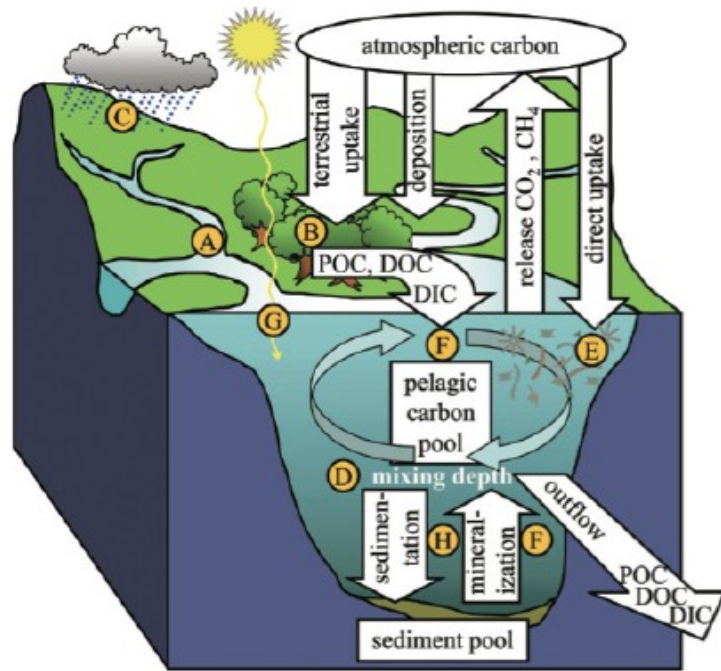


Fig. 2. Schematic diagram showing pathways of carbon cycling mediated by lakes and other continental waters. The letters correspond to rows in Table 1.

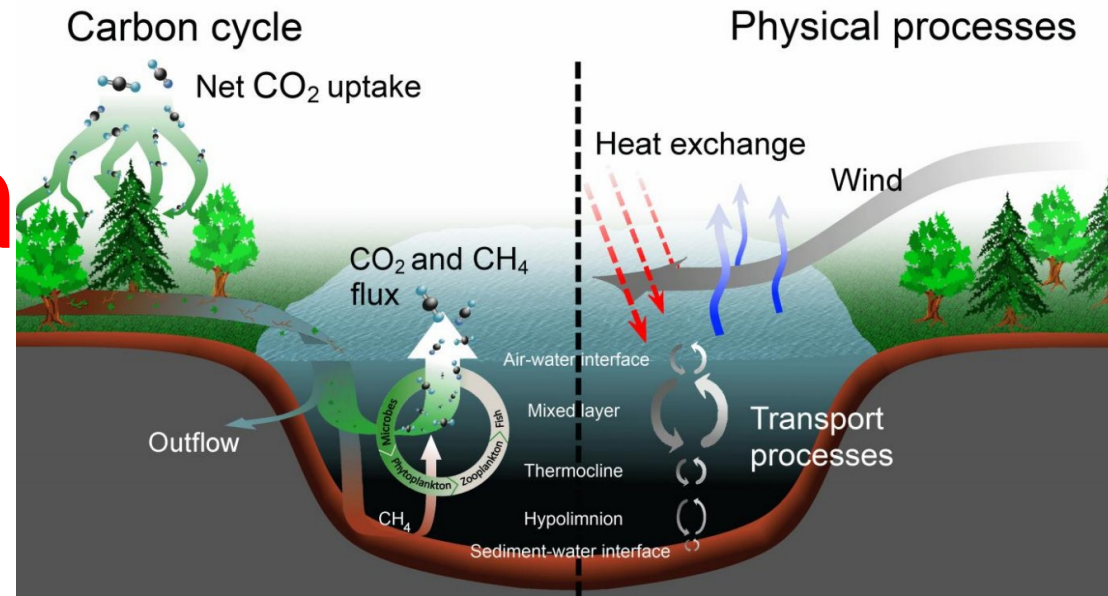
(Bastviken et al. 2011)

Latitude	Fluxes												Area (km ²)
	Total open water			Ebullition			Diffusive			Stored			
	Emiss.	<i>n</i>	CV	Emiss.	<i>n</i>	CV	Emiss.	<i>n</i>	CV	Emiss.	<i>n</i>	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												

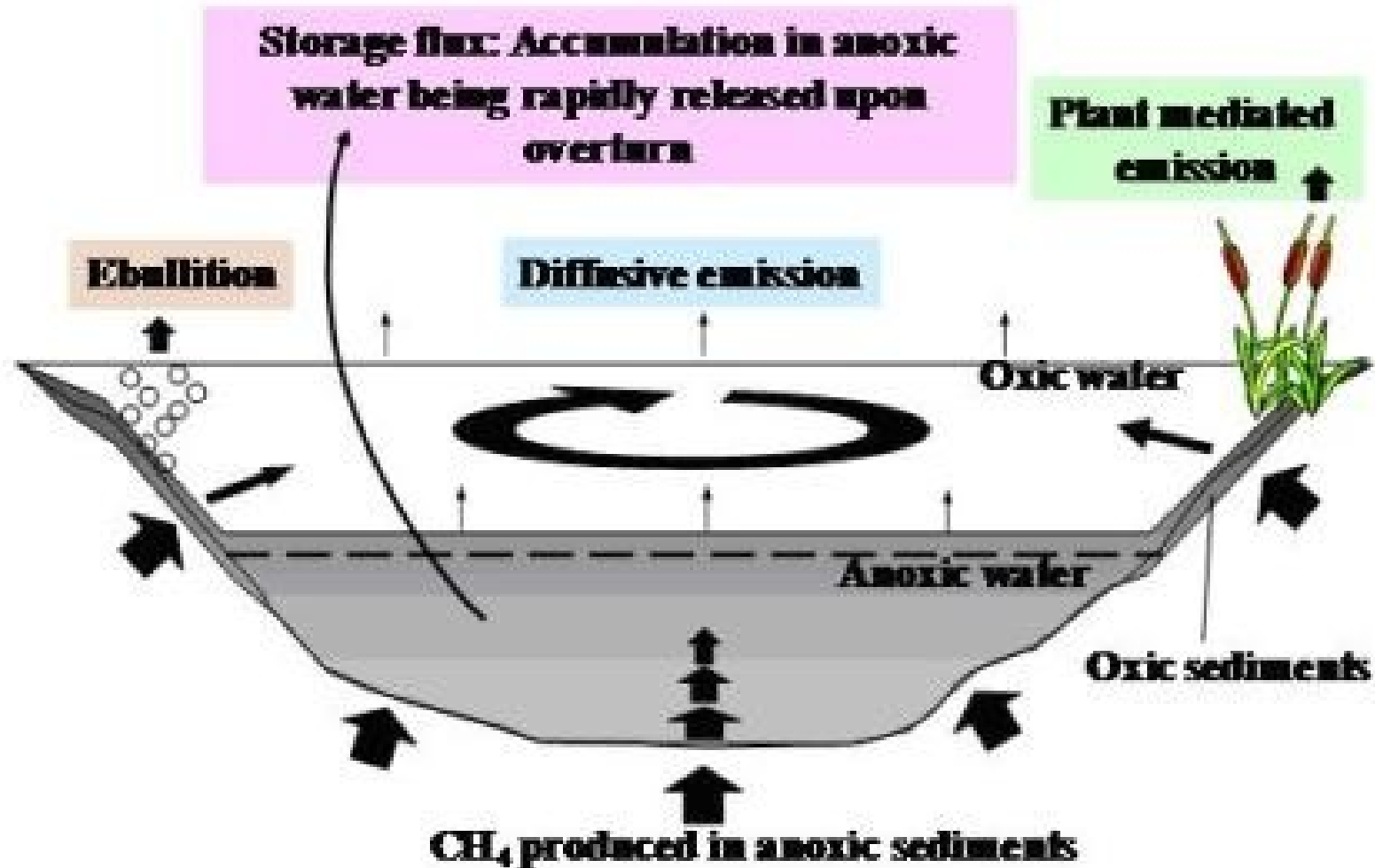
- Total freshwater methane emission is 104 Tg yr⁻¹, i.e. 50% of global wetland emission (177-284 Tg yr⁻¹, IPCC, 2013)
- greenhouse warming potentials from freshwater-originating CO₂ and CH₄ are roughly equal

Общее количество озер 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.

Озера



CH₄ emission from lakes



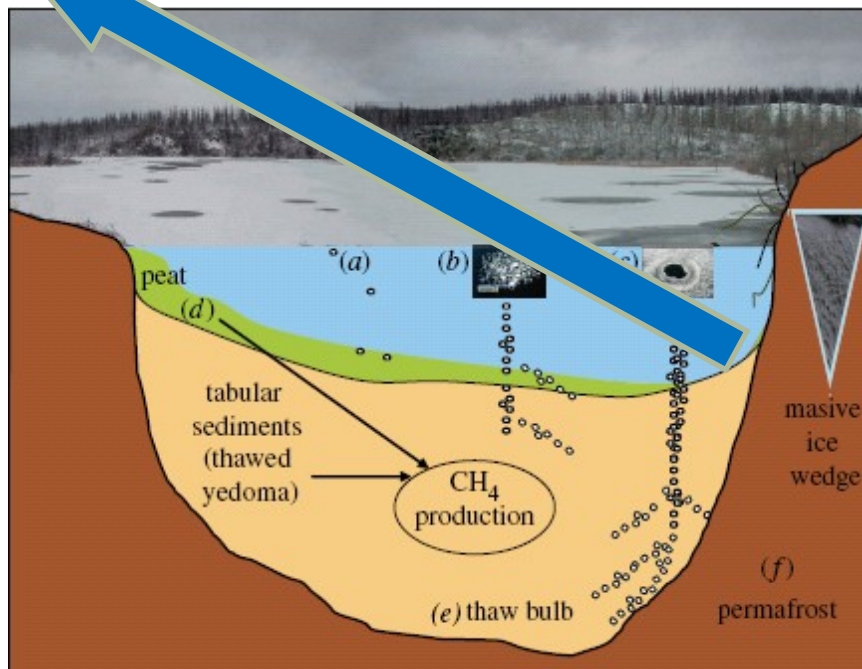
Эмиссия метана термокарстовыми озерами



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

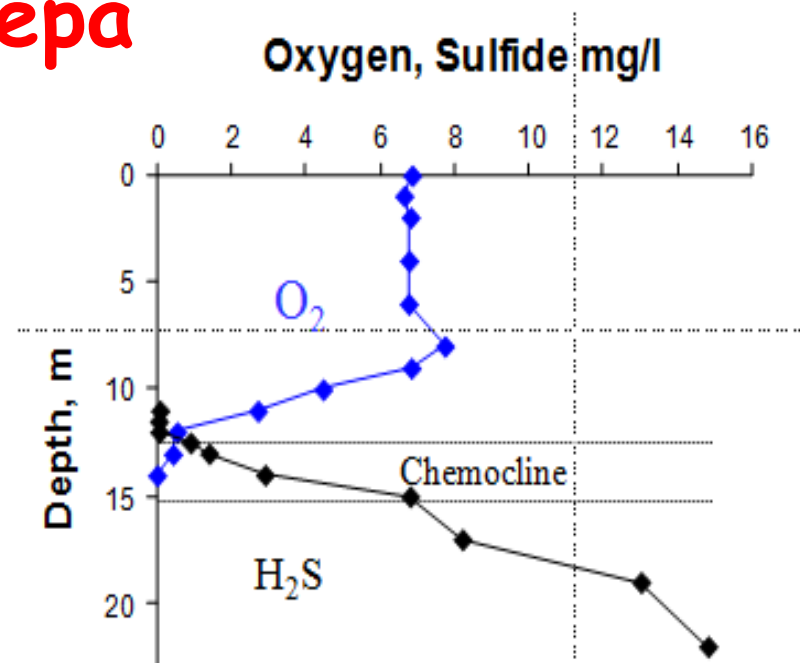
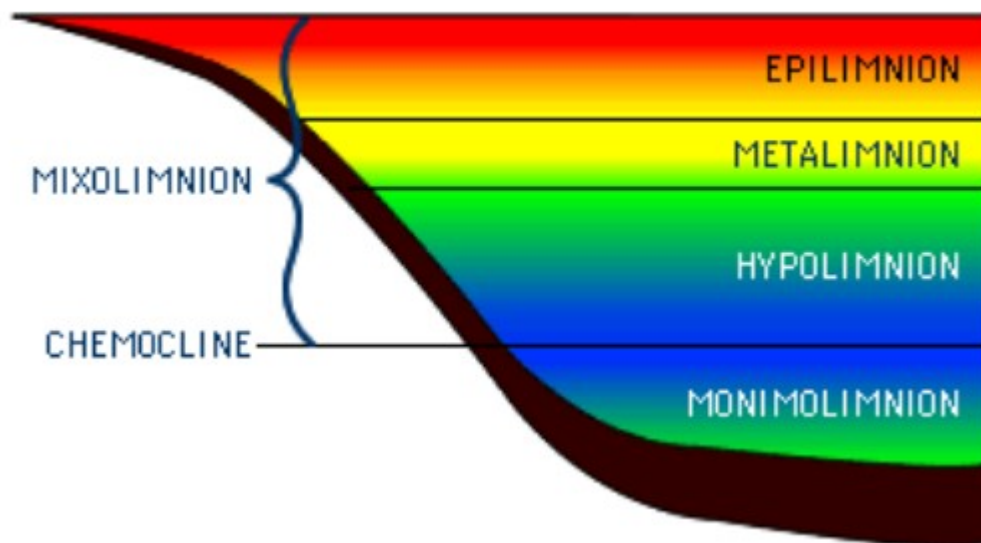


Интенсивный источник ("hotspot") – может быть источником значительную часть зимы



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

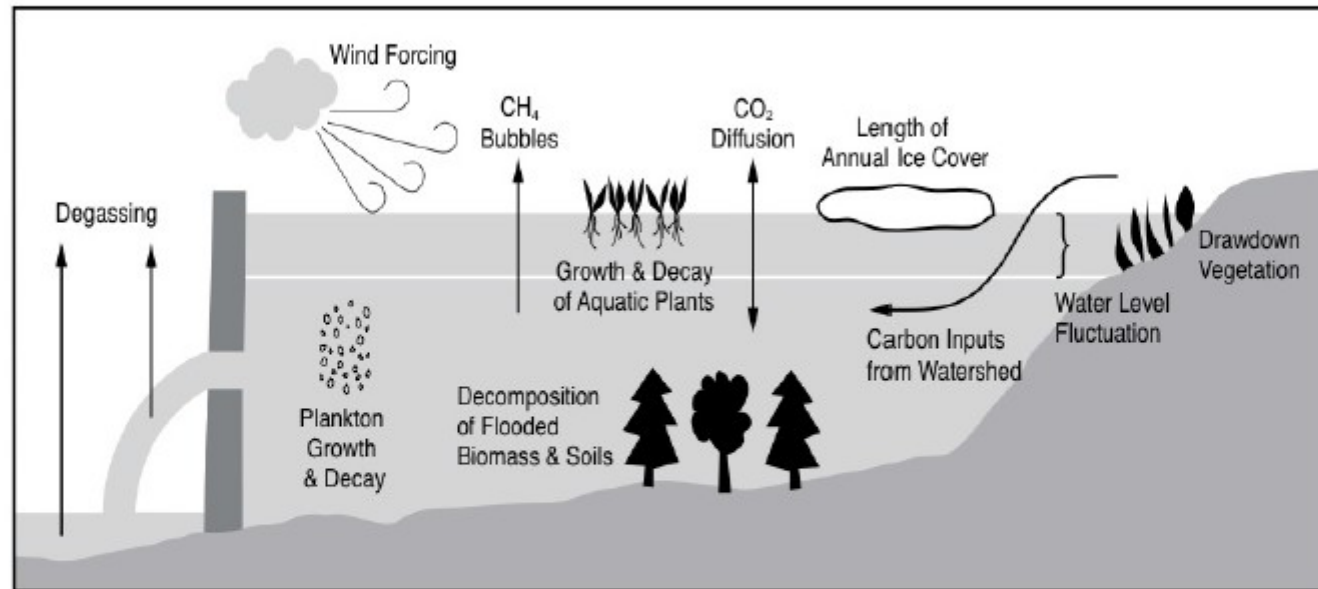
Меромиктические озера



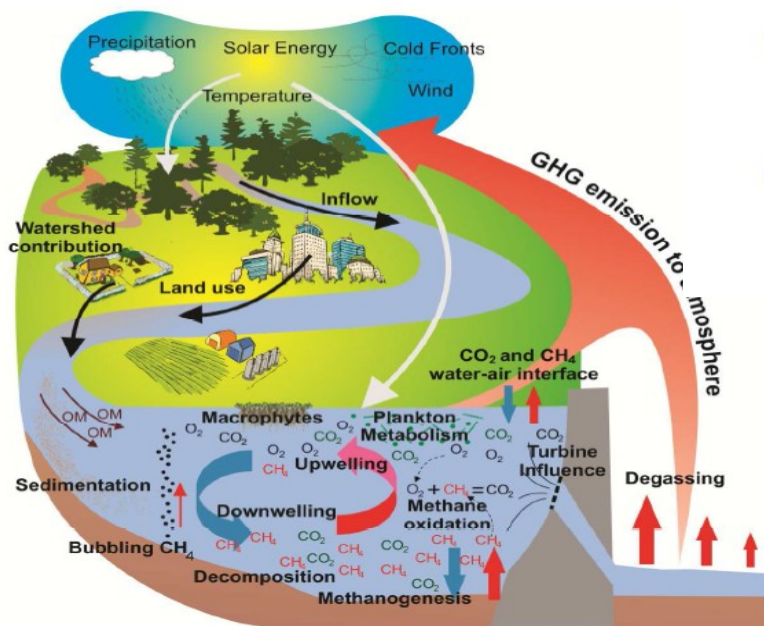
В монимолимнионе нет кислорода и накапливается сероводород. Многие из этих озер являются солеными, а в придонных слоях присутствует сульфатсодержащая вода.

- Монимолимнион: глубокий слой, высокие значения солености
- Хемолимнион : сильный градиент солености
- Миксолимнион: верхний слой (т.т., еpi-, meta-, and hypolimnion)

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



Репина Ирина Анатольевна

Профессор РАН, доктор физико-математических наук
Заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

repina@ifaran.ru