

# Эмиссия парниковых газов из водных экосистем Сибири

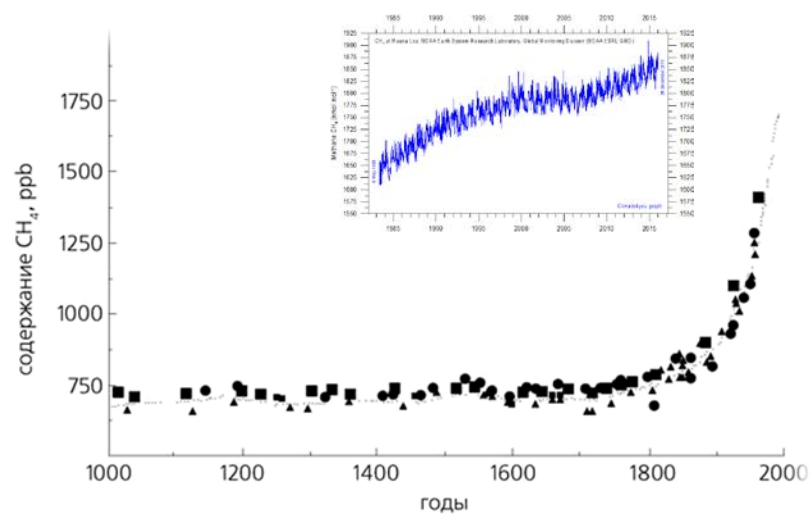
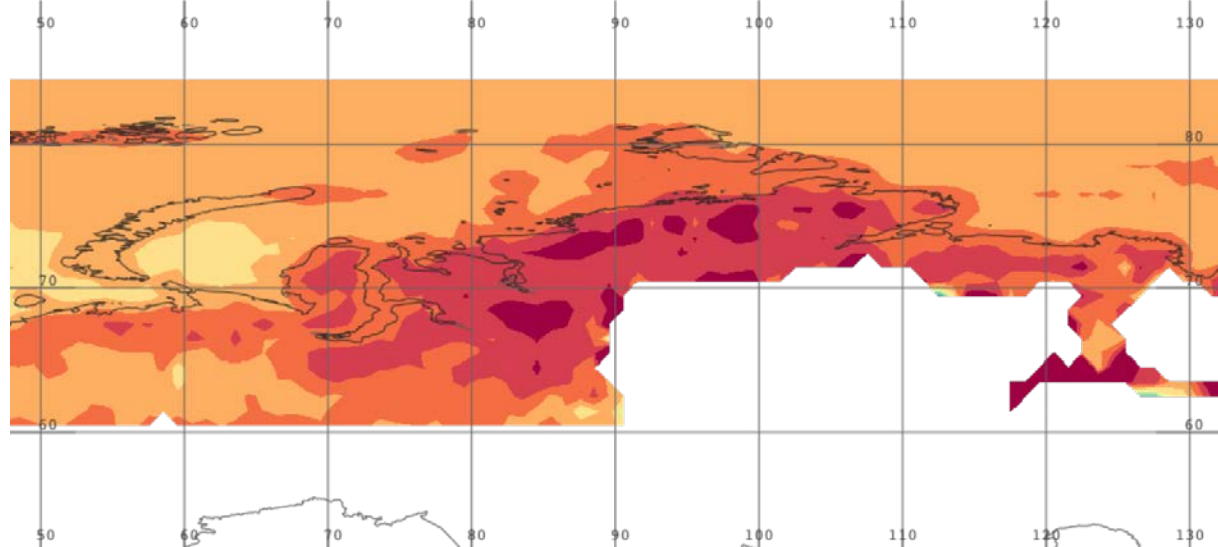
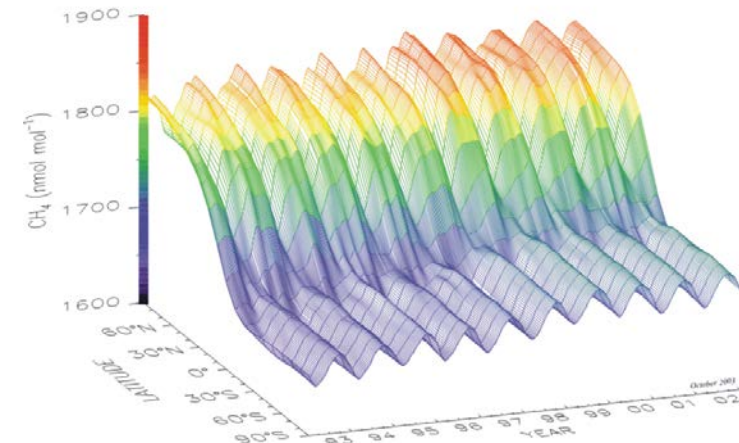
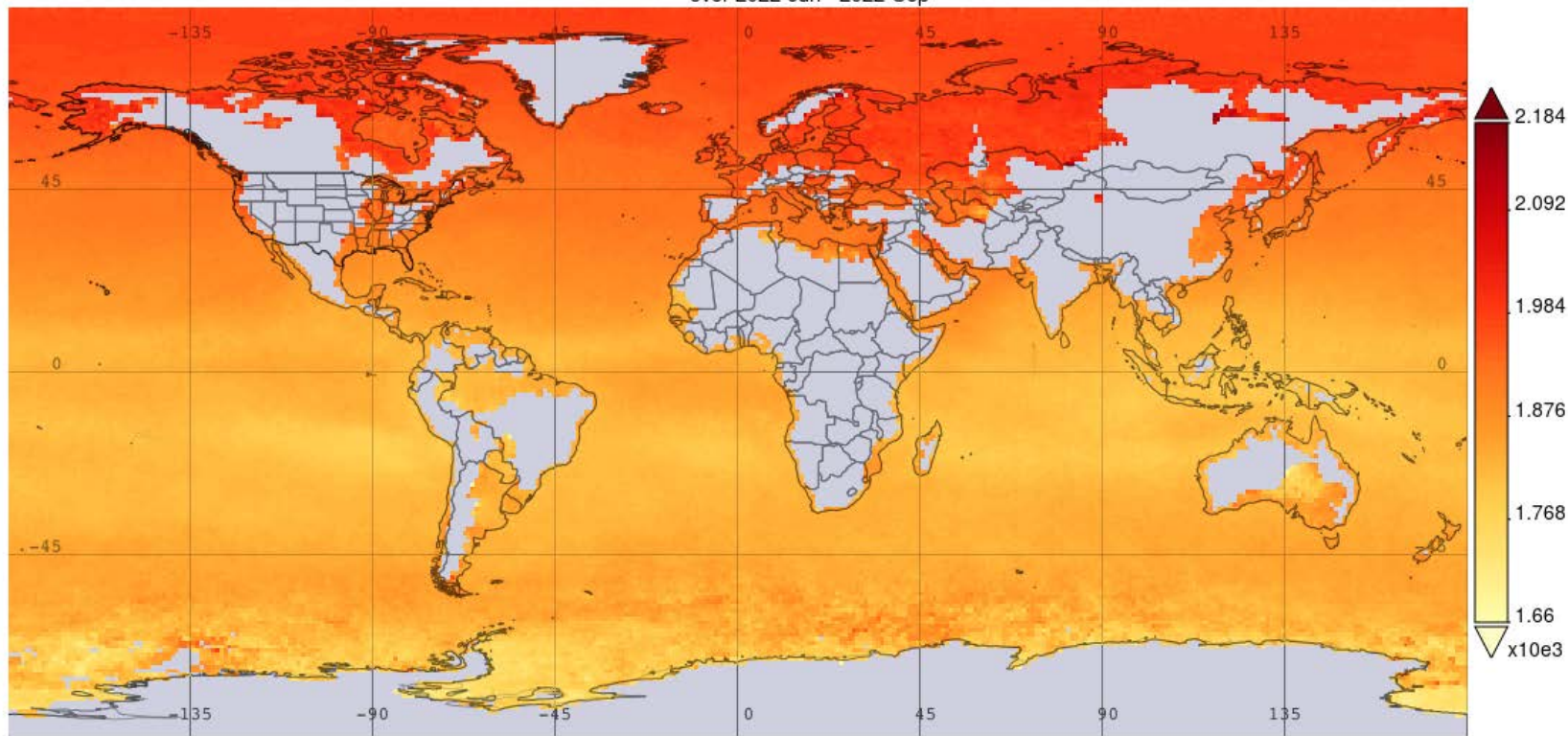


Ирина Репина

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

МГУ им. М.В. Ломоносова

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



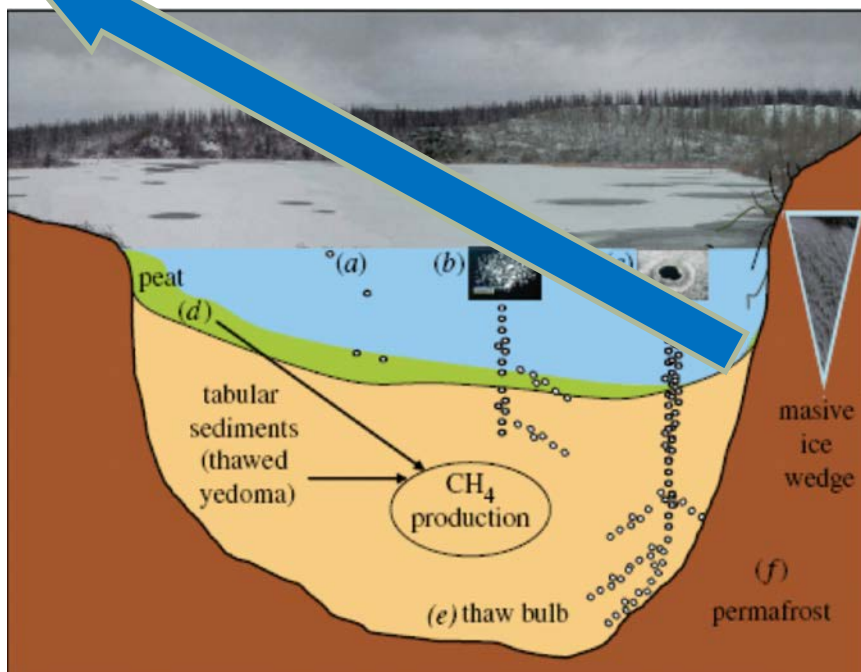
# Эмиссия метана термокарстовыми озерами



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

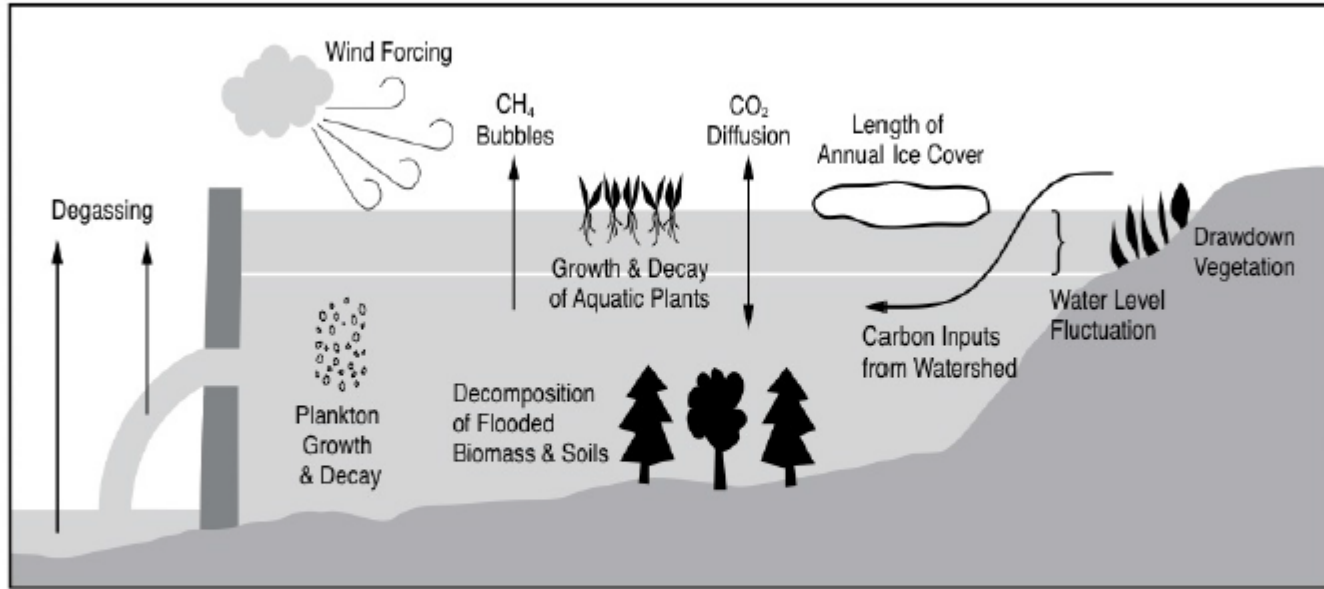
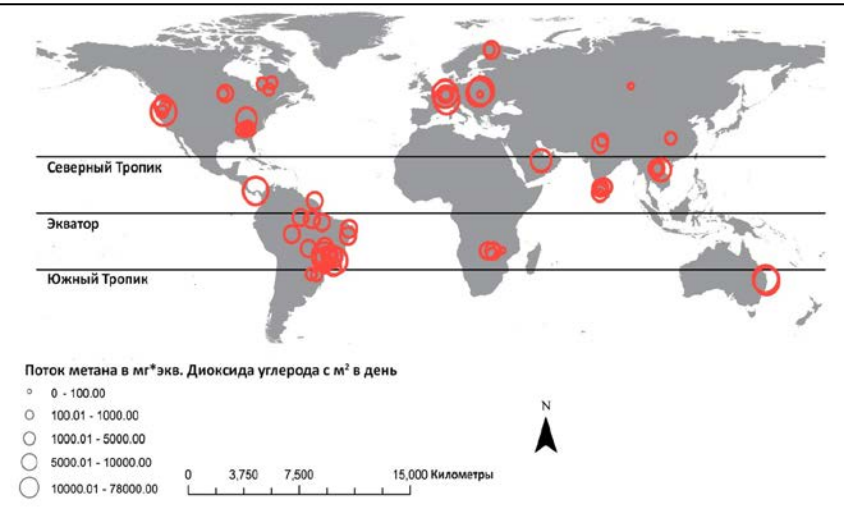


Интенсивный источник (“hotspot”) – может быть источником значительную часть зимы



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

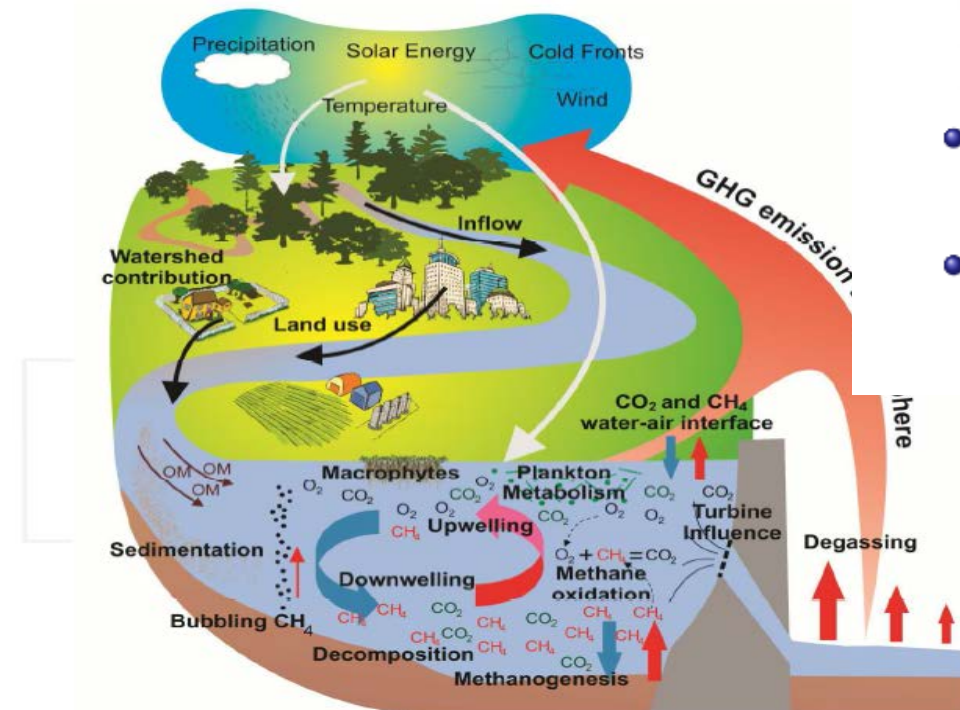
# Эмиссия парниковых газов из водохранилищ



- 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 CO<sub>2</sub>. При этом в донных отложениях ежегодно захоранивается 5,21 млн тонн парниковых газов.





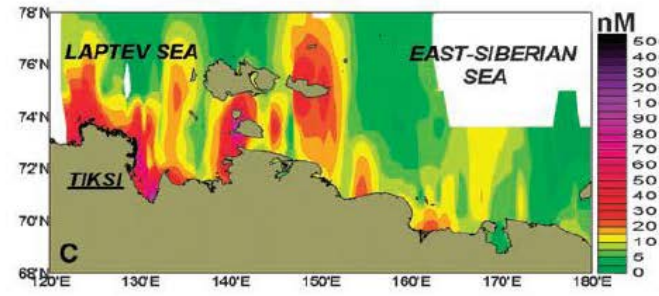
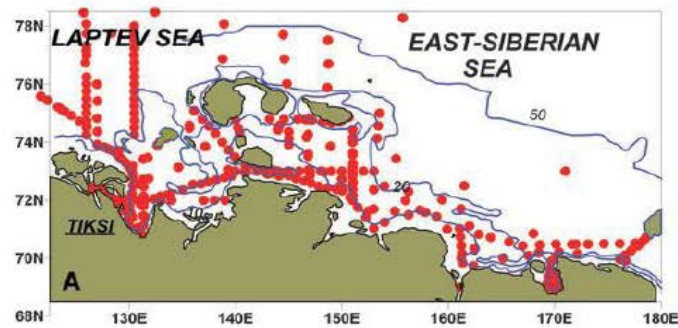
## Мотивация

Пресные воды вносят большой вклад в выбросы парниковых газов в континентальном масштабе. Потоки парниковых газов из великих рек зависят от изменений климата и могут иметь серьезные последствия для глобального углеродного цикла.

Крупные реки объединяют биогеохимический сигнал огромного водораздела, который часто охватывает несколько климатических зон, и являются связующим звеном между наземными и морскими экосистемами, а также атмосферой.

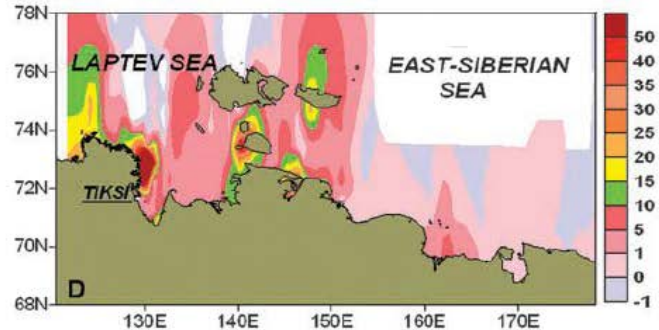
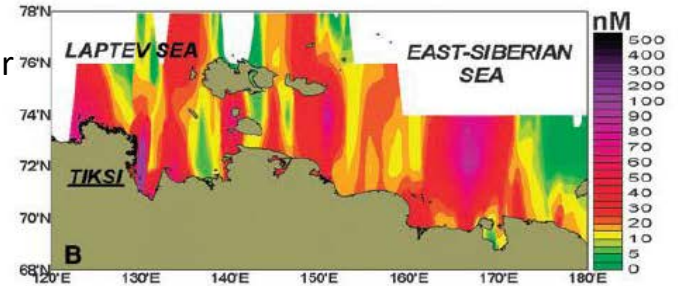
Реки могут быть значительным источником метана и углекислого газа, поскольку органический углерод образуется не только в результате биогеохимических процессов в воде, но и переносится с грунтовыми водами и поверхностным стоком, в частности, с торфяников.

Важно изучить роль великих сибирских рек как источника парниковых газов на арктическом шельфе. Арктические реки переносят в океан высокие концентрации различных растворенных веществ и твердых частиц, а парниковые газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  могут составлять значительную часть общего углерода, уносимого в устье реки и ее притоков.



Dissolved CH<sub>4</sub> in surface water

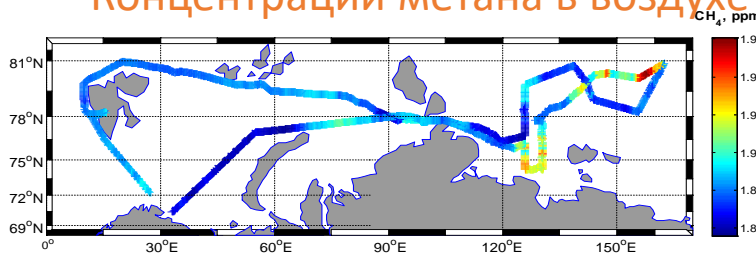
Dissolved CH<sub>4</sub> in bottom water



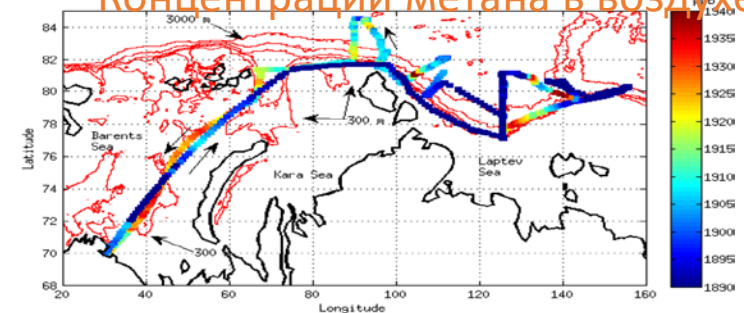
Fluxes of CH<sub>4</sub> to the atmosphere

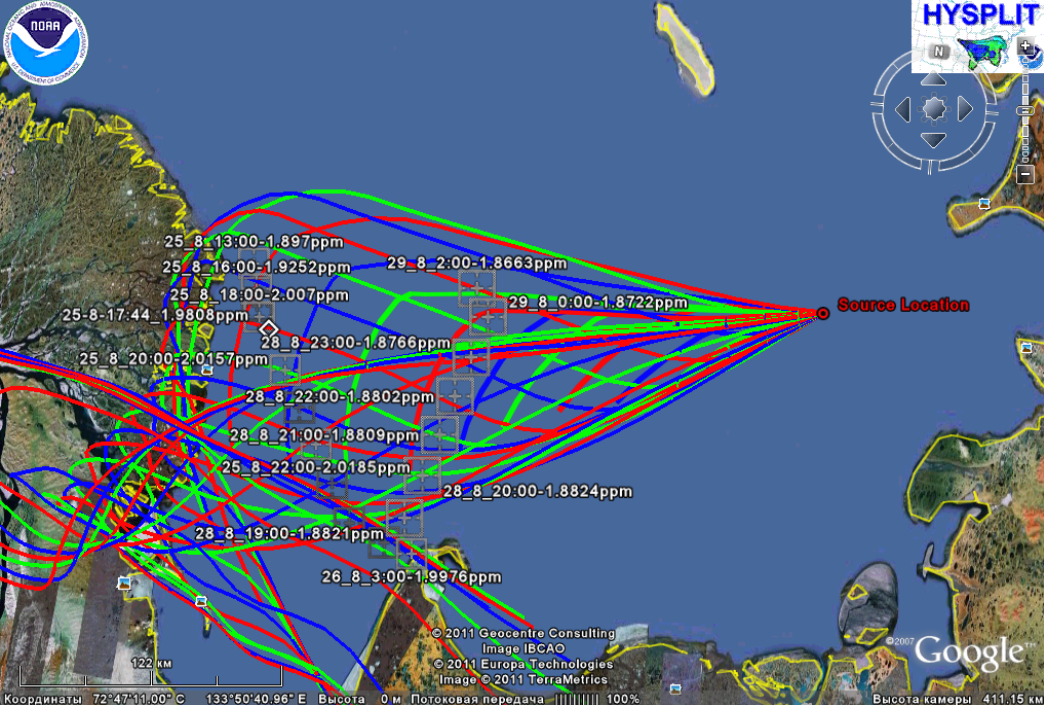
Проблема заключается в том, что исследования последних лет показали регулярное увеличение концентраций метана в морях восточной Арктики. Это известный график, показывающий количество растворенного метана в морской воде и его эмиссию в атмосферу и наши измерения концентрации углекислого газа в атмосфере. Также эти моря, в отличие от мирового океана, служат источником углекислого газа в атмосферу. Что касается метана, то рассматривается возможность существования как морских, так и речных источников увеличения его концентрации. Ответа на этот вопрос пока не получено.

Концентрации метана в воздухе

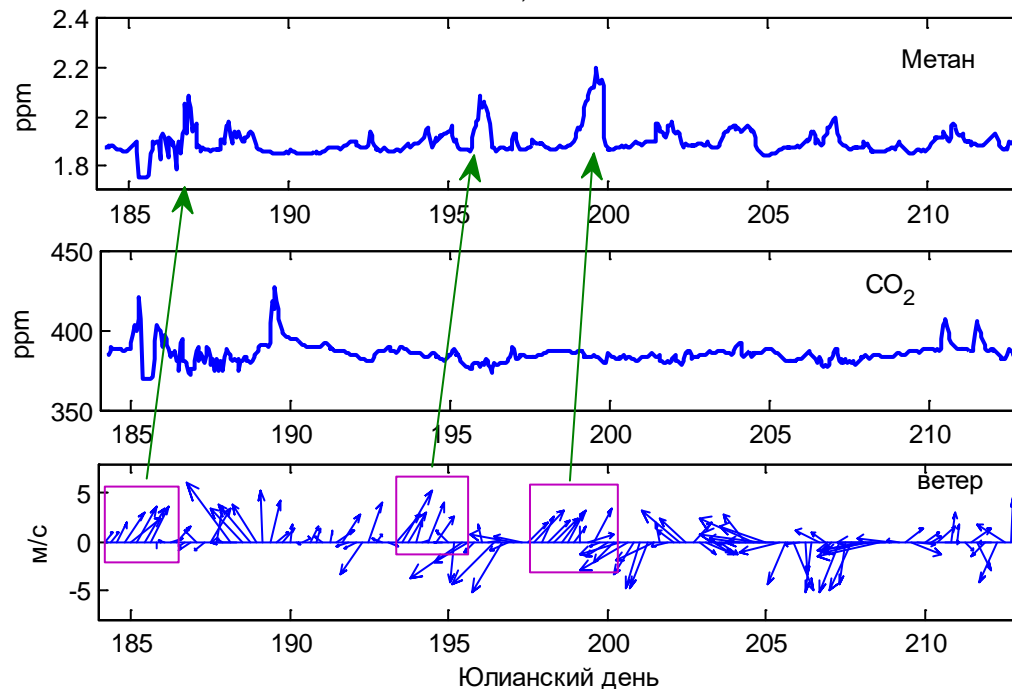
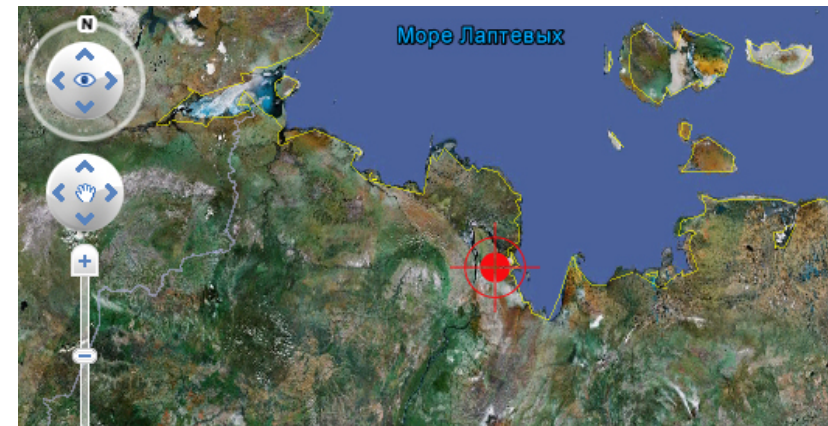


Концентрации метана в воздухе



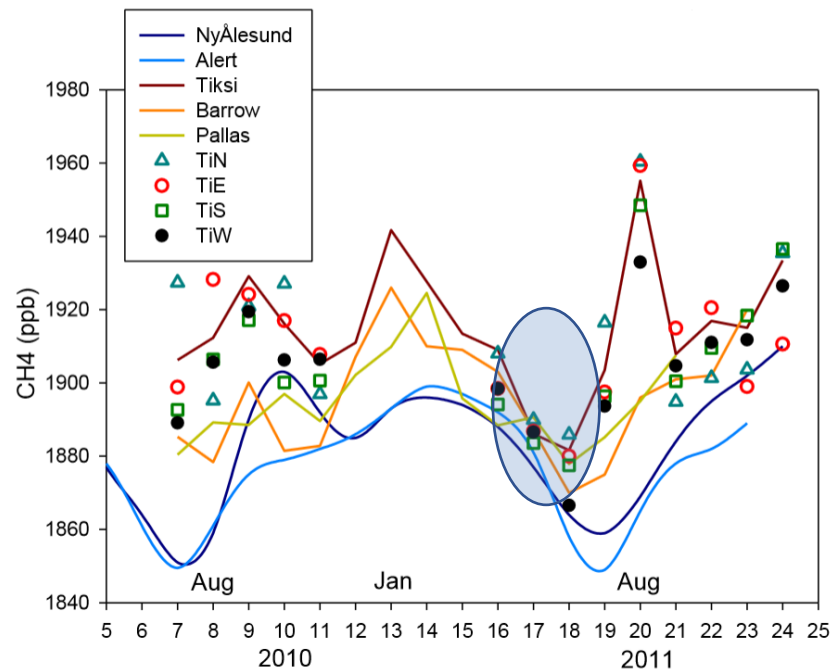
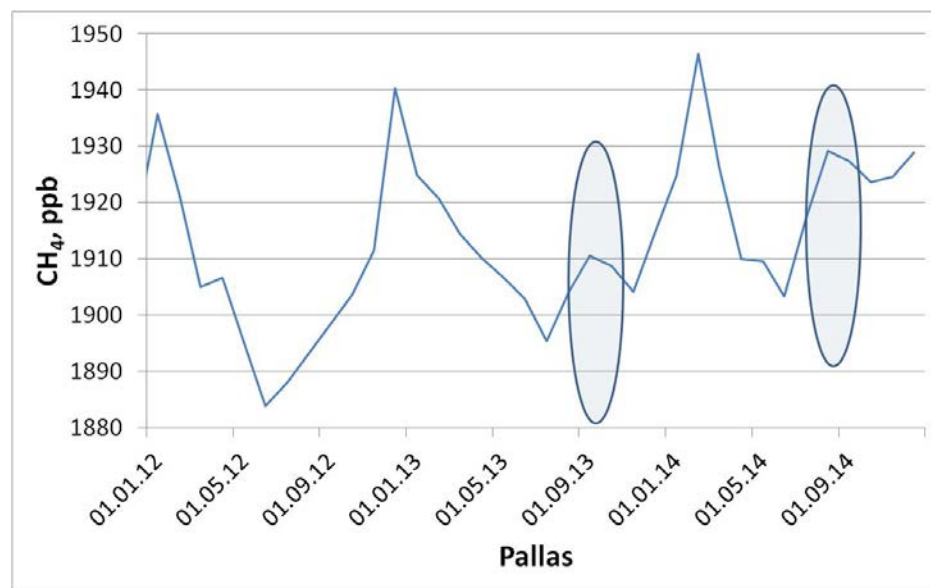
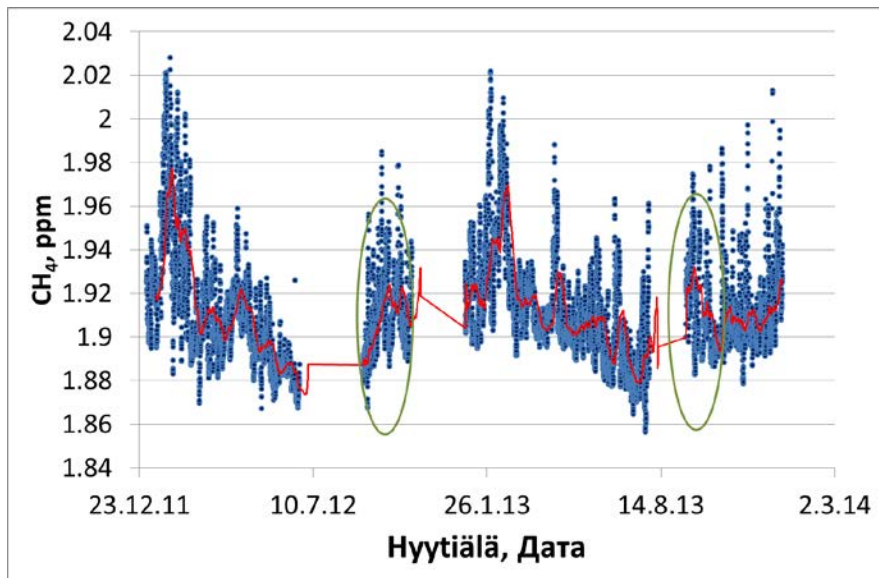


Тикси, июль 2010



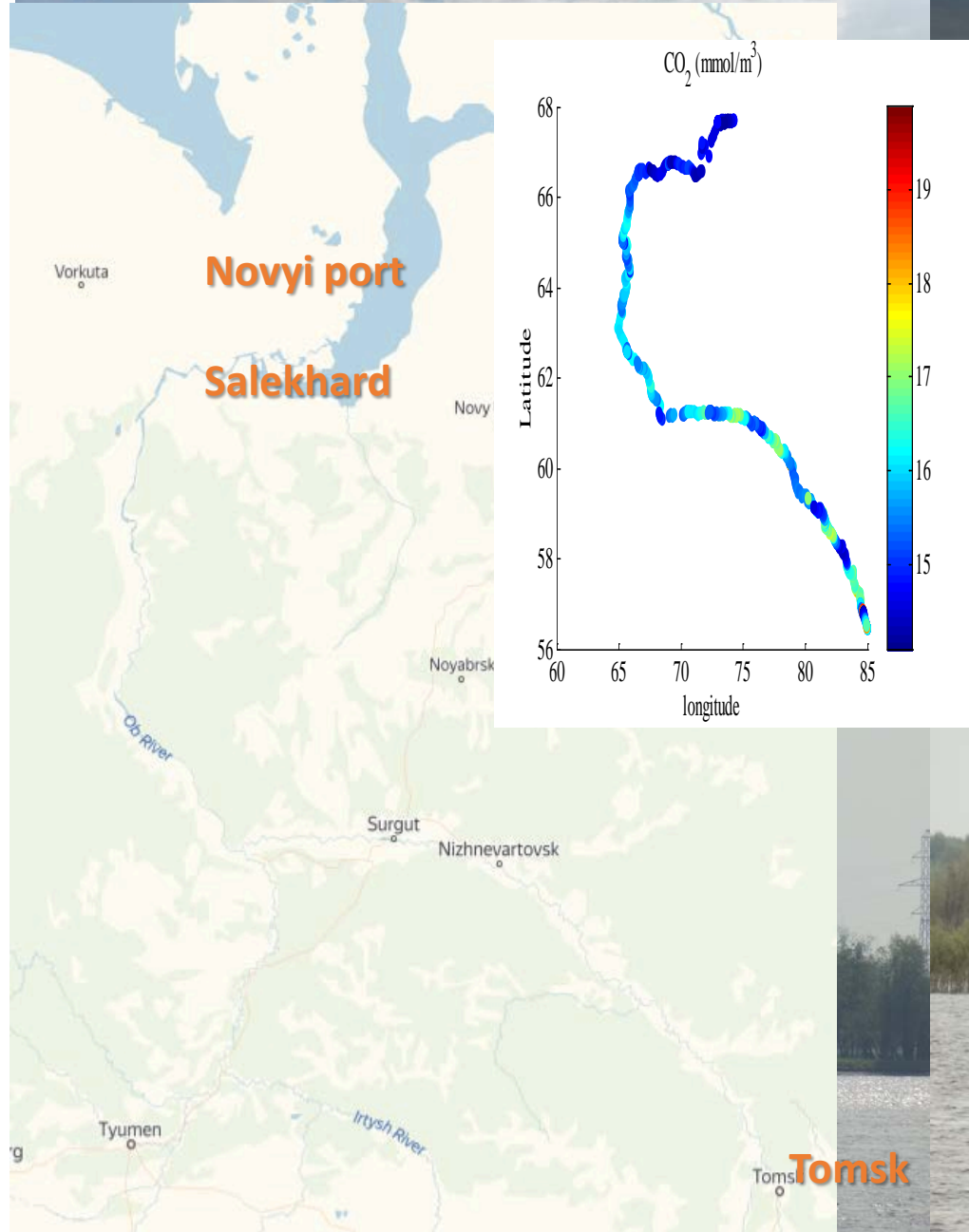
Обнаружено увеличение концентраций метана при ветре, направленном со стороны моря. По данным судовых наблюдений было рассчитано вероятное расположение источника метана в море Лаптевых. Наблюдалось регулярное увеличение концентраций метана при направлении ветра со стороны предполагаемого источника. Предполагаемая рассчитанная мощность источника 170 – 380 мг/м<sup>2</sup>/сут.





**Измерения  
концентраций метана  
на Арктических  
обсерваторияхю  
октябрьский максимум  
наблюдается на  
западных станциях.**

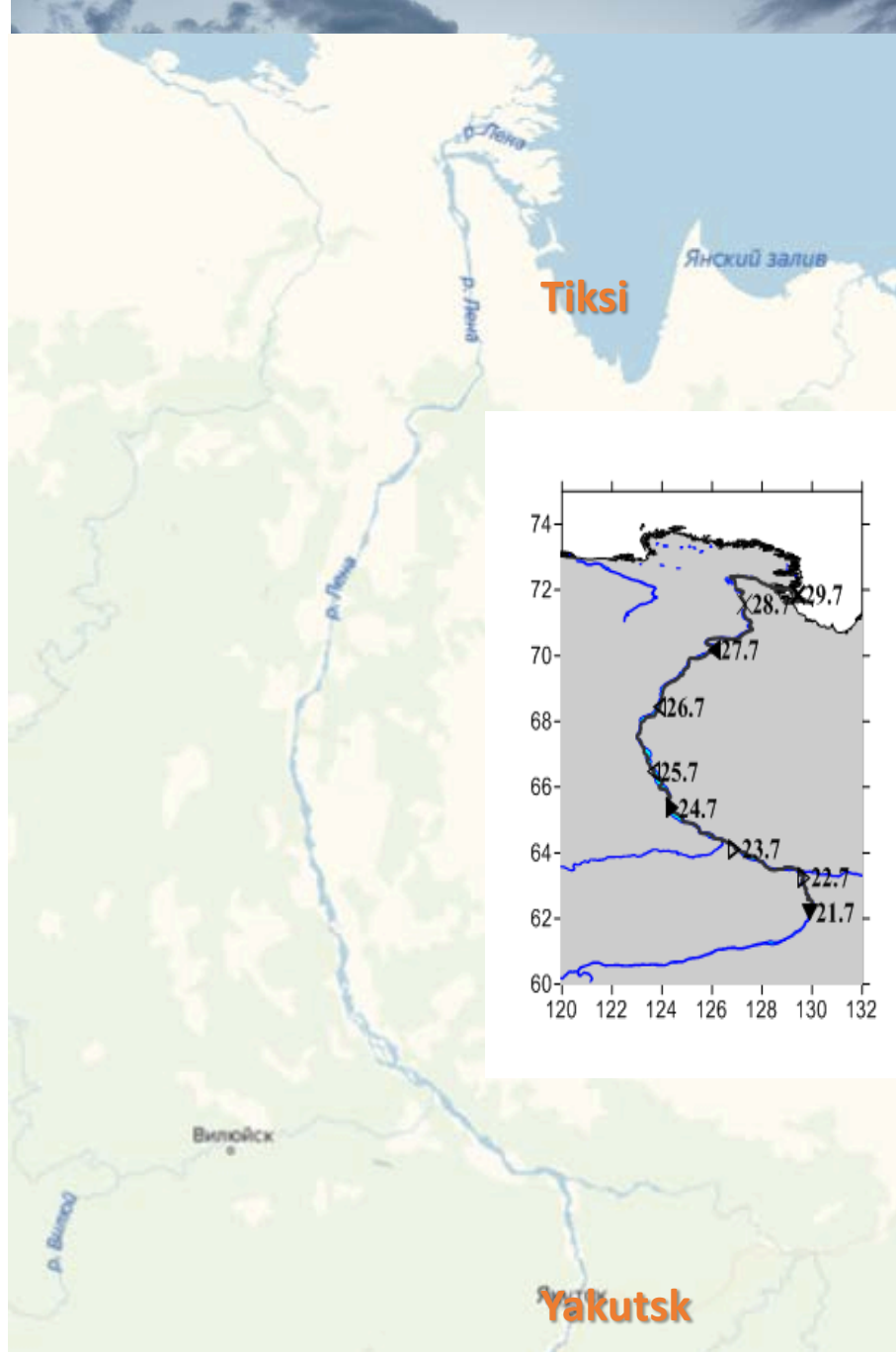
# Река Обь



Река Обь является третьей по величине рекой Арктики и тринадцатой рекой в мире по годовому расходу (427 км<sup>3</sup>) с общим водосбором 2,99 млн км<sup>2</sup>. Река Обь также играет важную социально-экономическую роль, поскольку плотность населения в ее бассейне значительно превышает плотность населения любой другой реки Арктики. Основная часть водораздела реки Обь расположена в пределах заболоченных территорий Западно-Сибирской низменности, которая является значительным источником парниковых газов в атмосфере Северного полушария. Здесь, наряду со значительными природными источниками (торфяники, тундра, озера), находятся крупнейшие в мире месторождения добычи газа - антропогенные источники метана. Важным фактором круговорота углерода является преобладание в бассейне Оби прерывистой и спорадической вечной мерзлоты.

# Река Лена

Река Лена охватывает огромный водосборный бассейн со сложной геологической и тектонической историей, пересекает зоны умеренного, субарктического и арктического климата. В ее бассейне преобладает сплошная вечная мерзлота. Кроме того, у нее есть огромная разветвленная Дельта (третья по величине в мире после рек Меконг и Миссисипи), через которую значительное количество углеродсодержащих соединений попадает в море Лаптевых.



**Лена – 2017**



**Моторная яхта Николь  
(Лена– 2017)**



**Судно ОМ-341  
(Обь-2016)**



**Обь-2016**



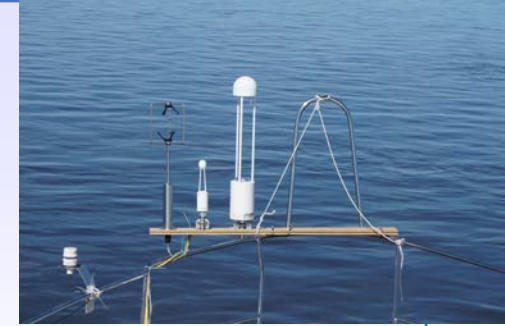
**Лена – 2022**



# Метод турбулентных пульсаций



## Turbulent fluxes



$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'}$$

Sensible heat flux [W/m<sup>2</sup>]

$$LE = \rho_a L_v \overline{w'q'}$$

Latent heat flux [W/m<sup>2</sup>]

$$\tau = -\rho_a \overline{w'u'}$$

Momentum flux [kg/ms<sup>2</sup>]

$$F_c = \rho_a \overline{w's'} \approx \overline{w'\rho_c'}$$

Flux density of substance c [ $\mu$ mol/m<sup>2</sup>s]

$\rho_a$

Air density

$c_p$

Specific heat of air

$L_v = 3147.5 - 2.37T_K$

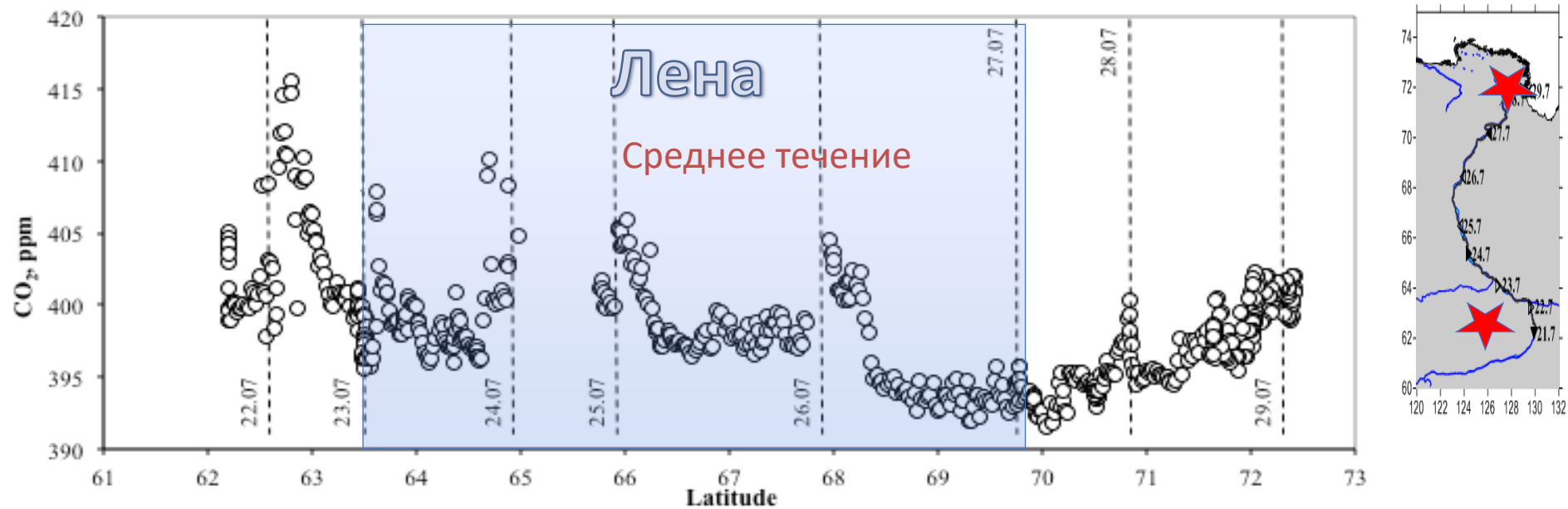
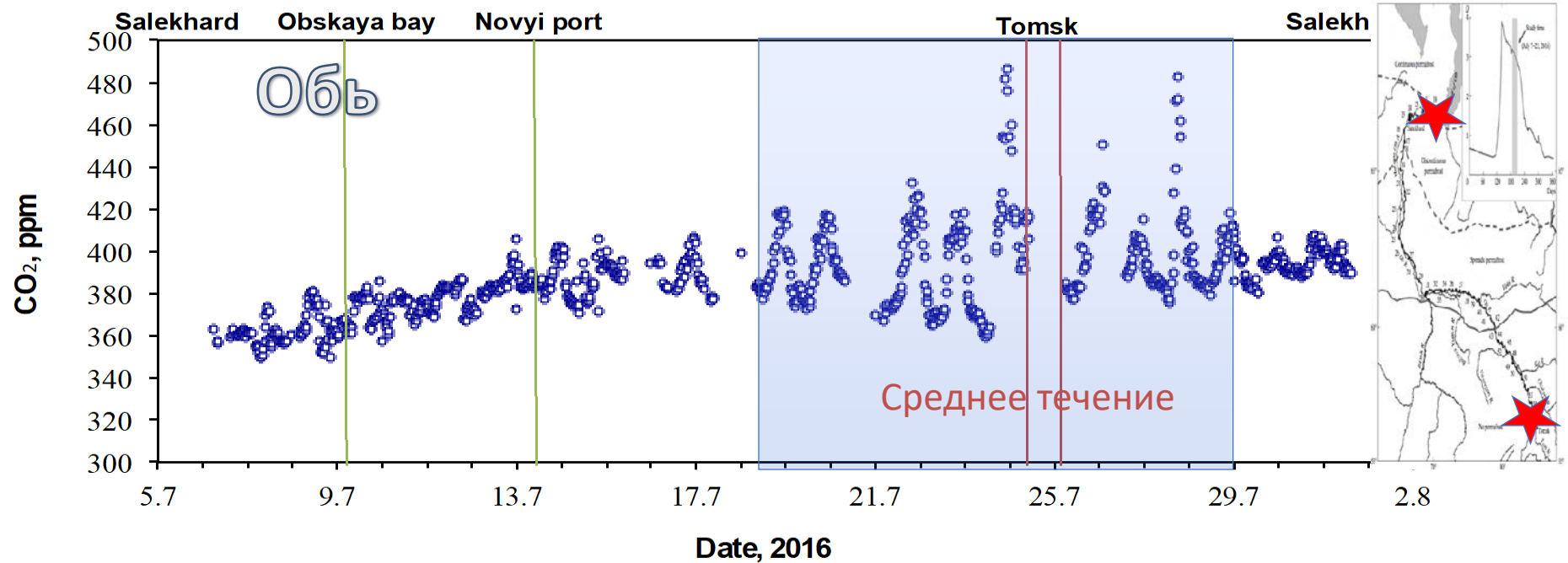
Latent heat of vaporization of air (2260kJ/kg at 100C=373K)

Aubinet et al. 2000 eq. 19

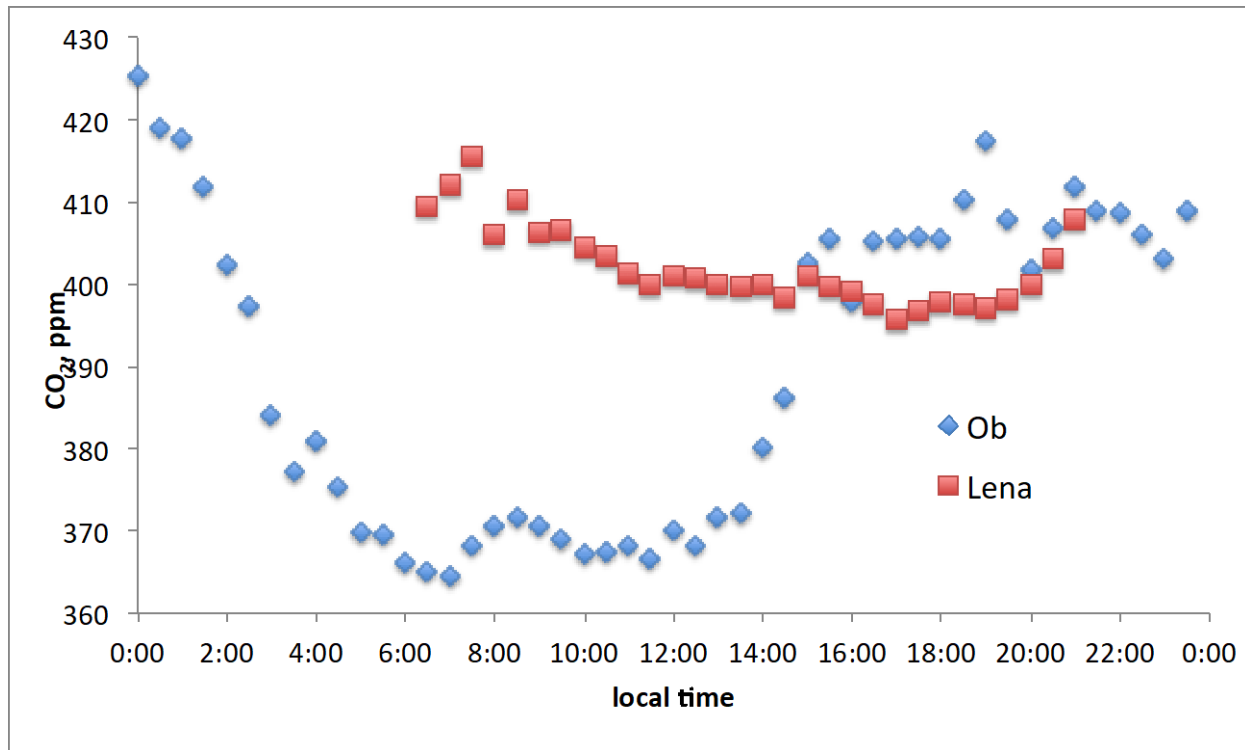
$w', u', T', q', s', \rho_c'$

Deviation from average of vertical and horizontal wind speed, temperature, water vapor mixing ratio, mixing ratio of substance c, density of substance c

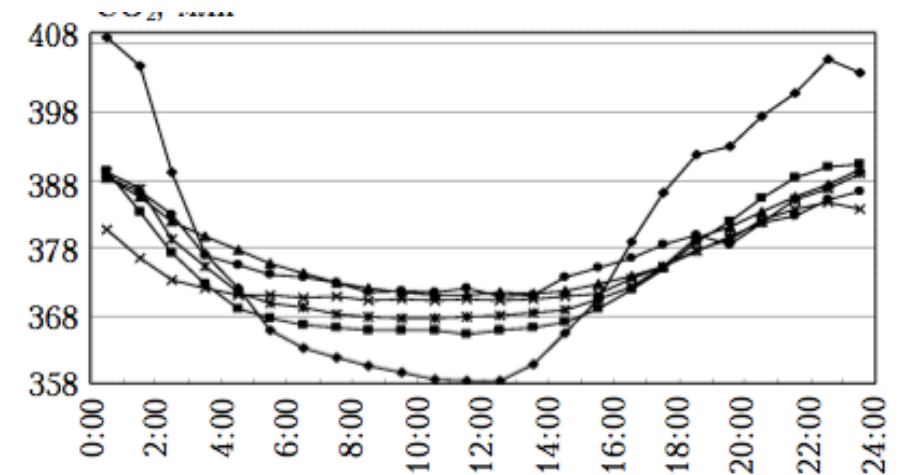
# Концентрации CO<sub>2</sub>

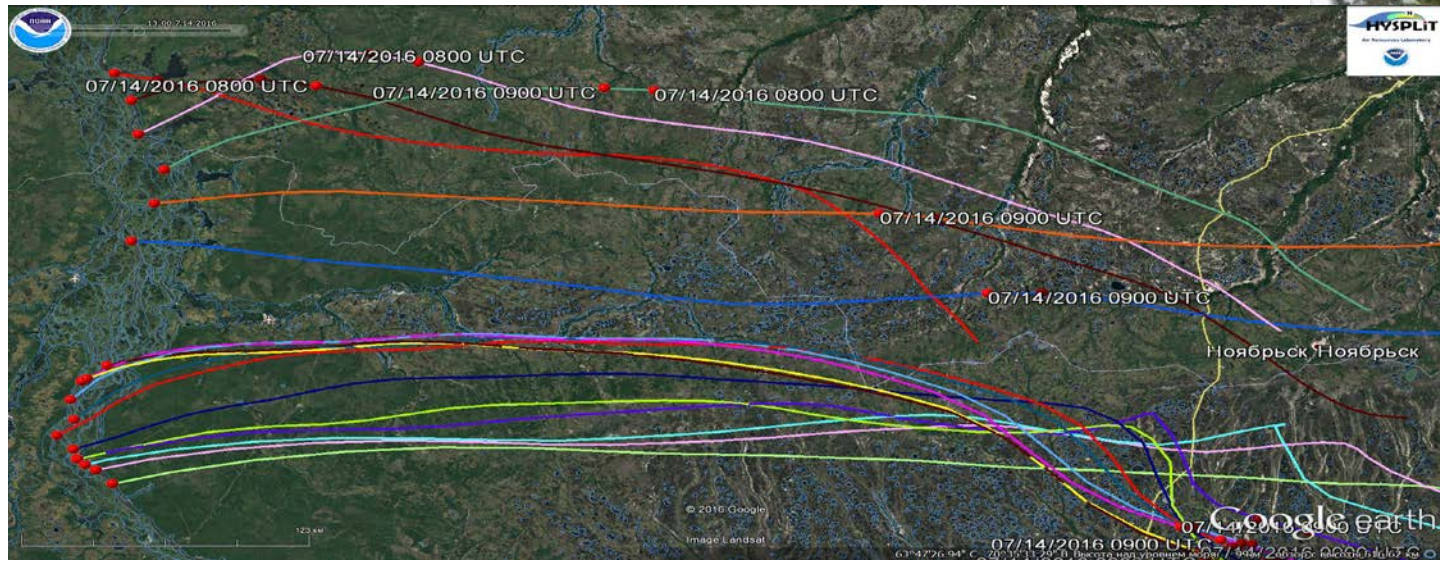
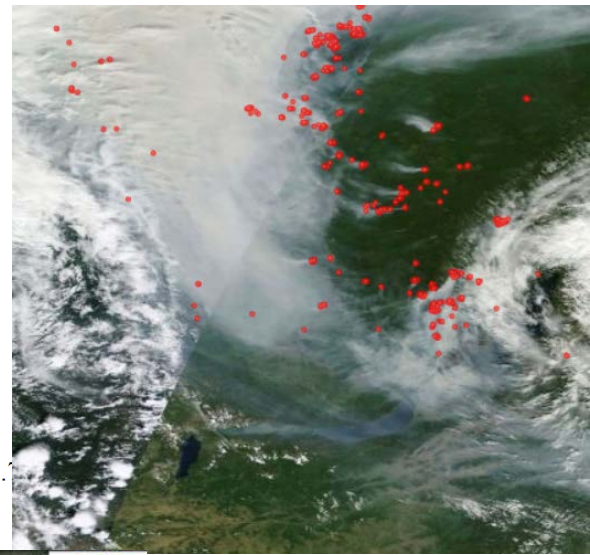
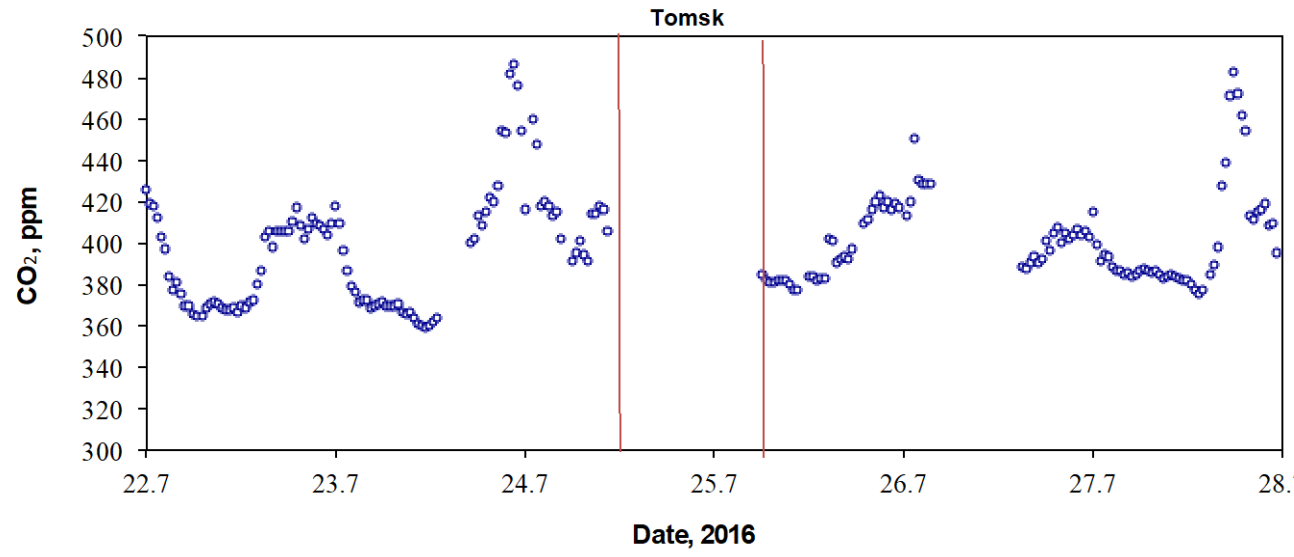


## Суточный ход концентраций $\text{CO}_2$ в среднем течении рек (22 Июля 2016 и 22 июля 2017)



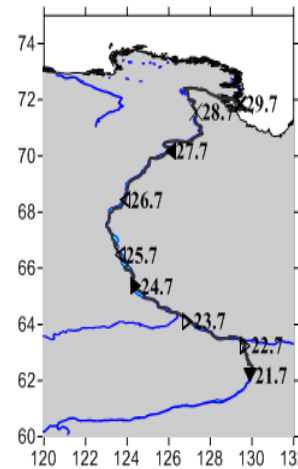
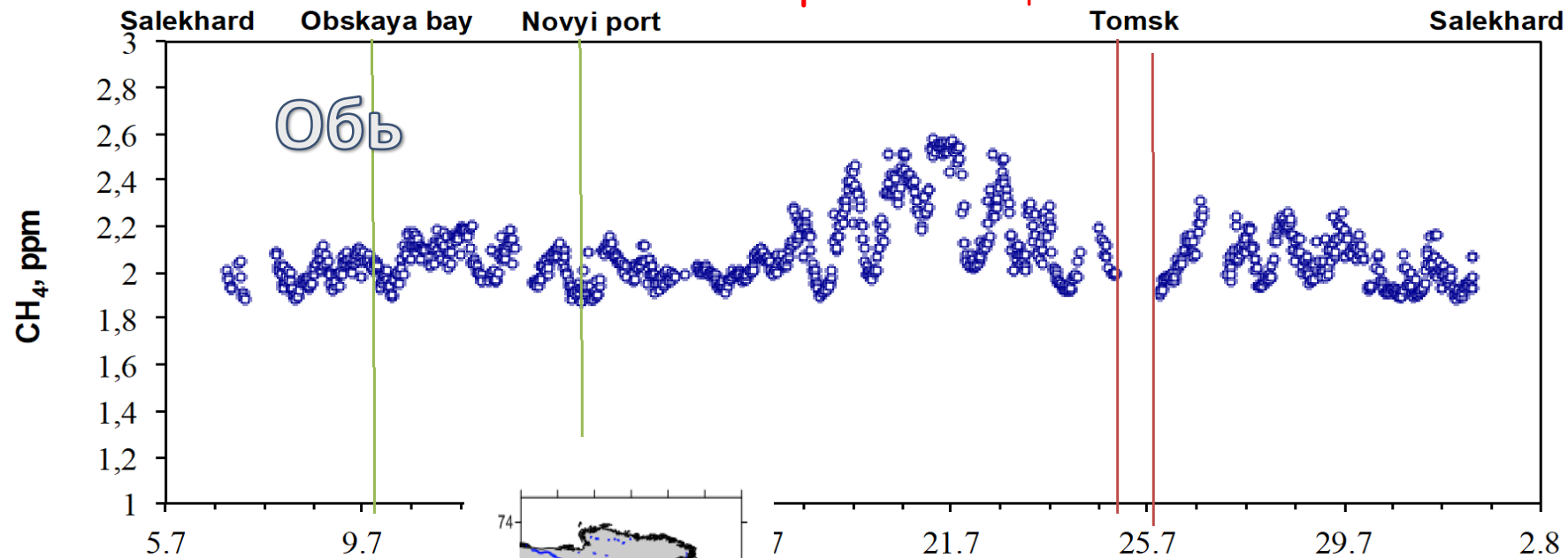
Средний суточный ход концентраций  $\text{CO}_2$  в западной сиббири по данным наземных станций (Arshanov et al., 2009)



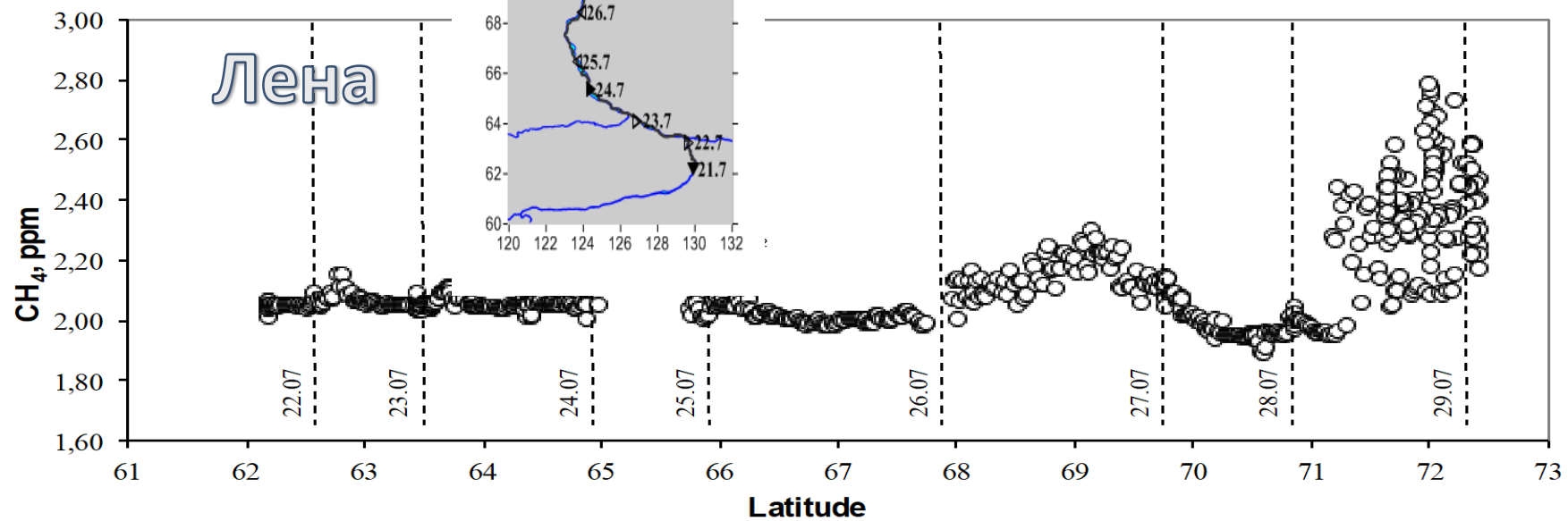




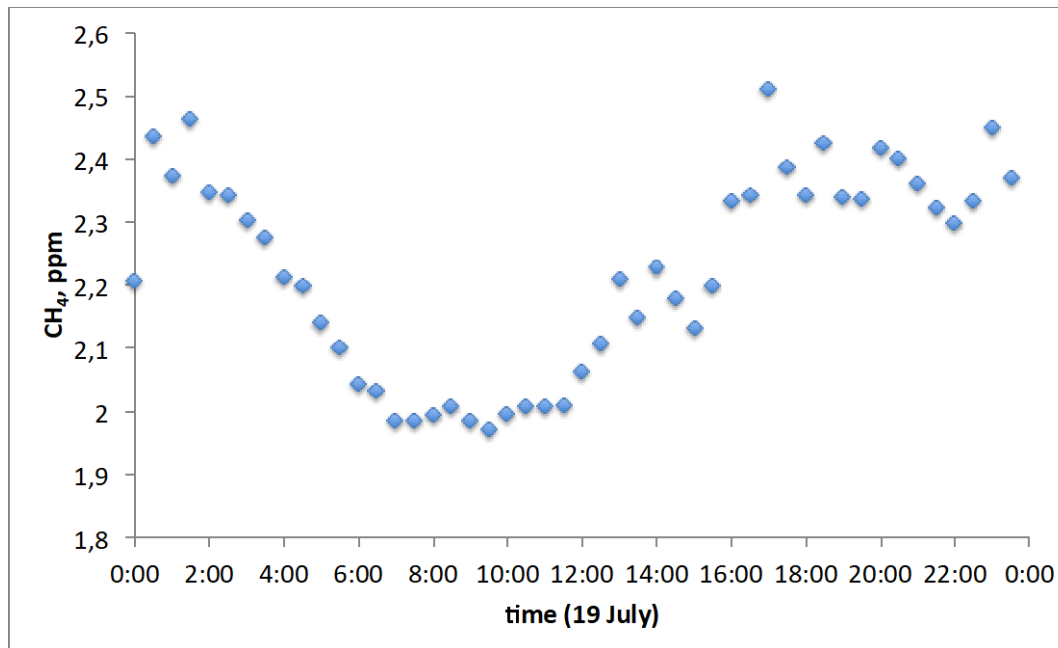
# Концентрации CH<sub>4</sub>



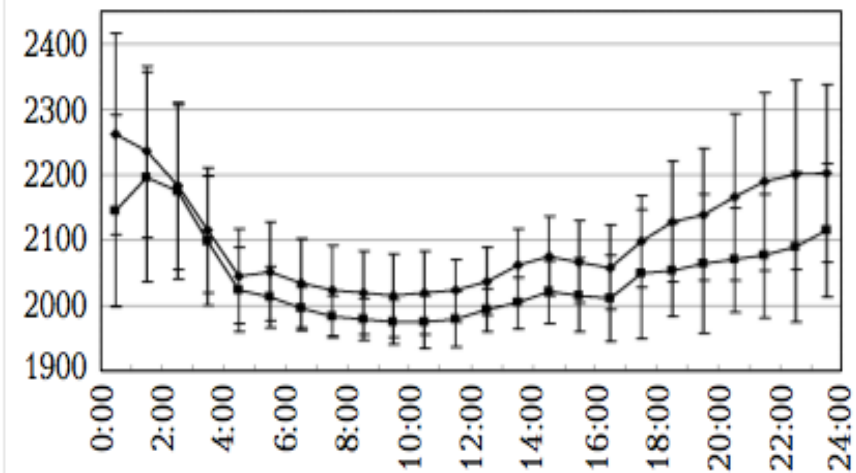
late, 2016

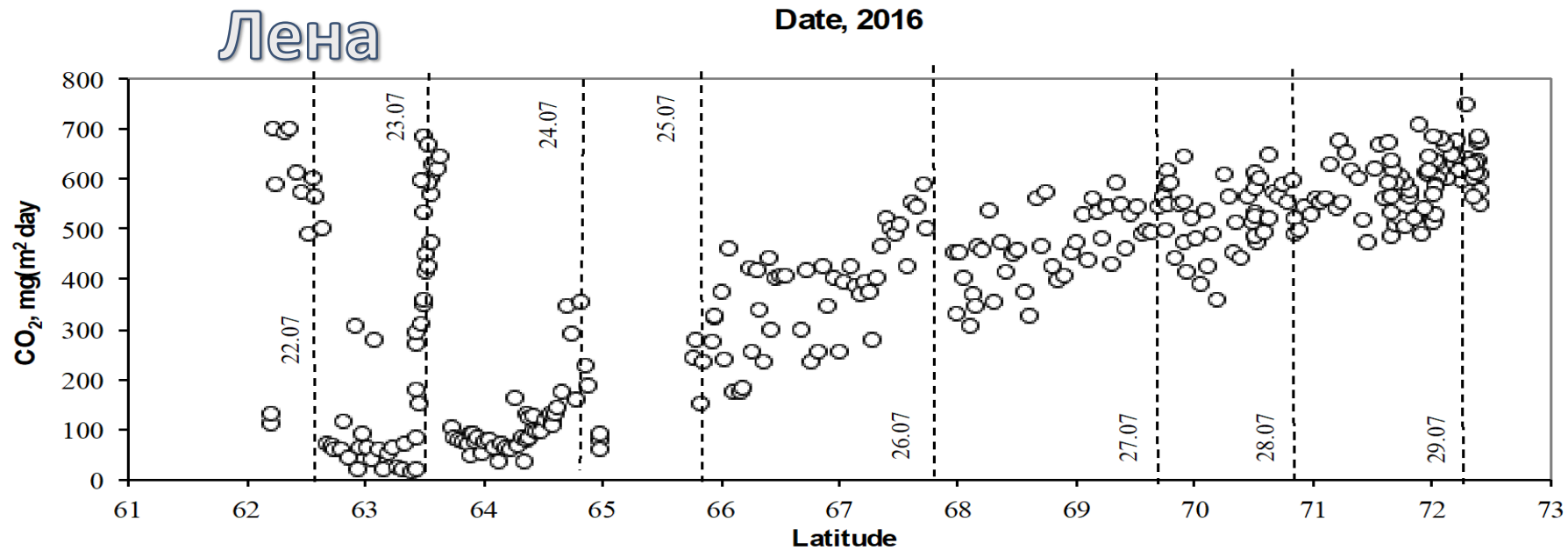
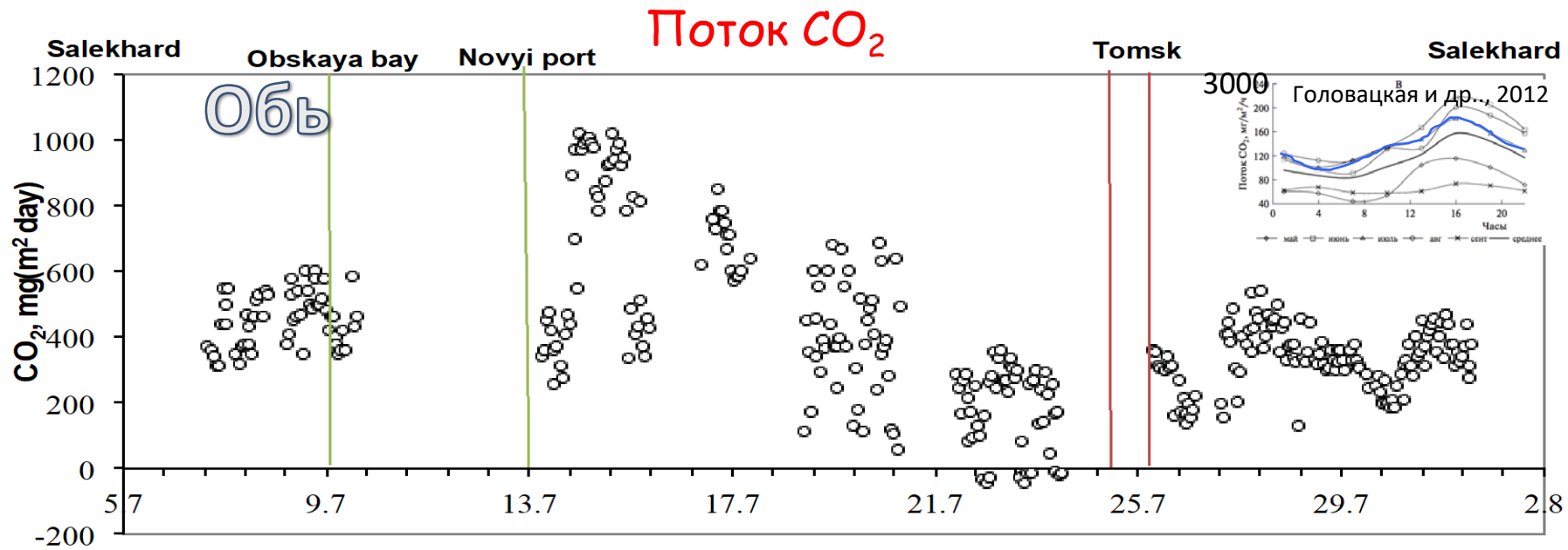


## Суточная изменчивость концентраций $\text{CH}_4$ в среднем течении Оби (19 Июля 2016)

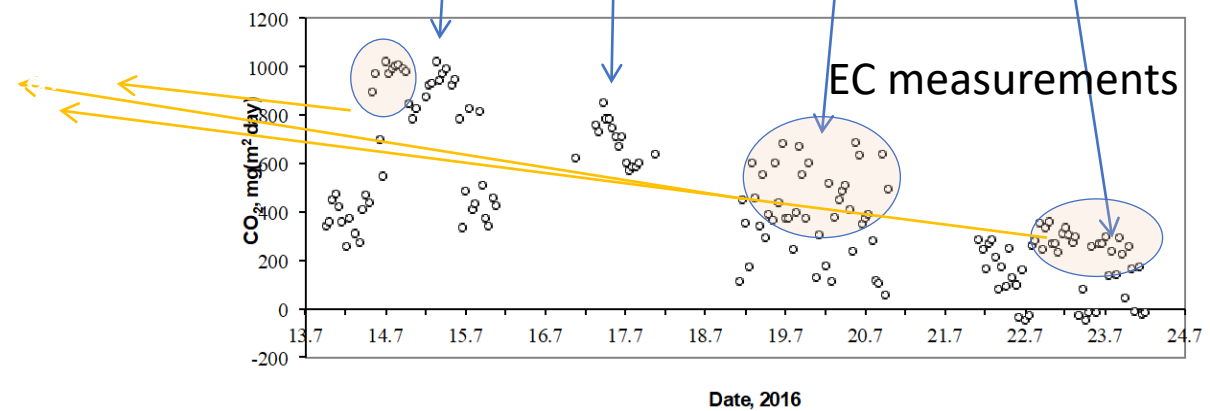
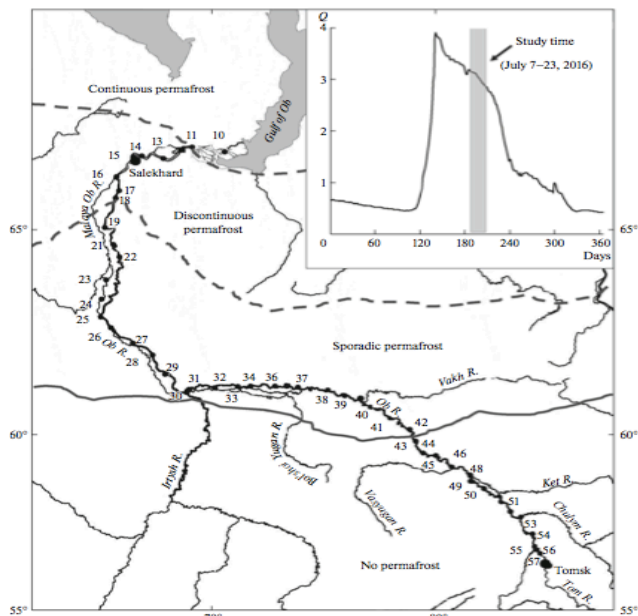
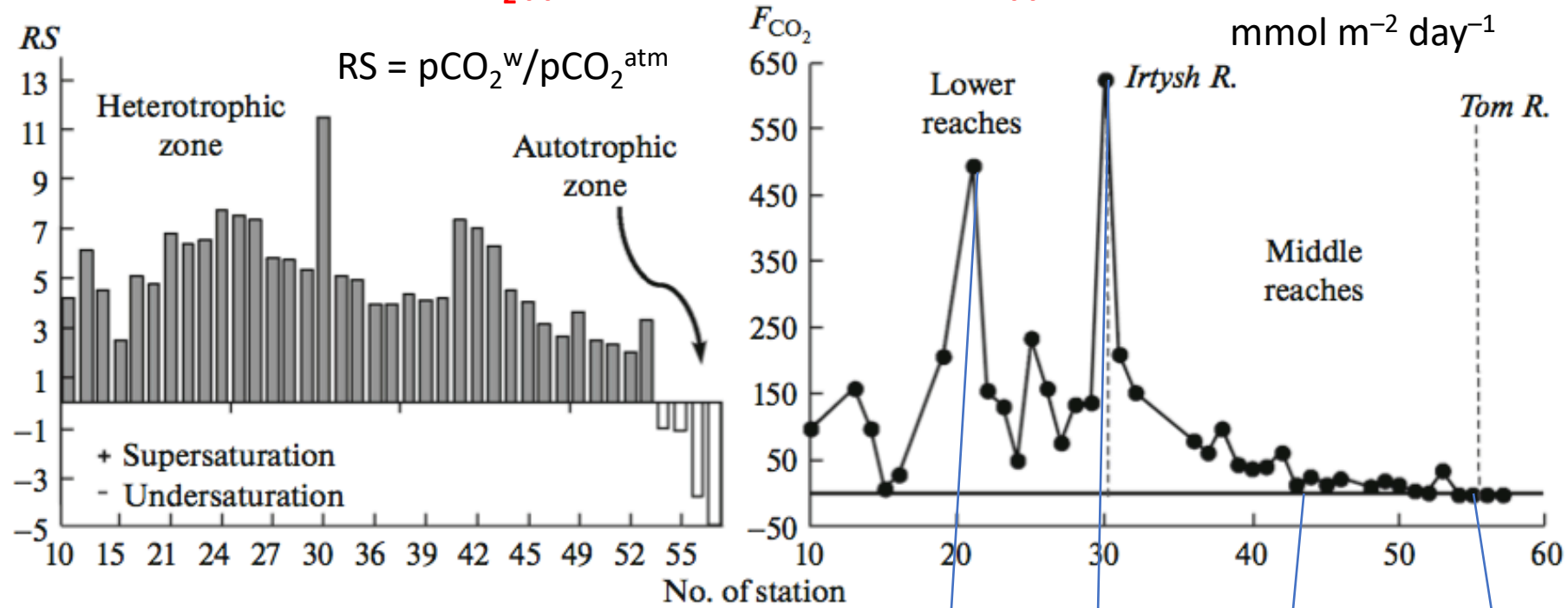


Средняя суточная изменчивость  $\text{CH}_4$  в Западной Сибири по данным наземных станций (Arshanov et al., 2009)





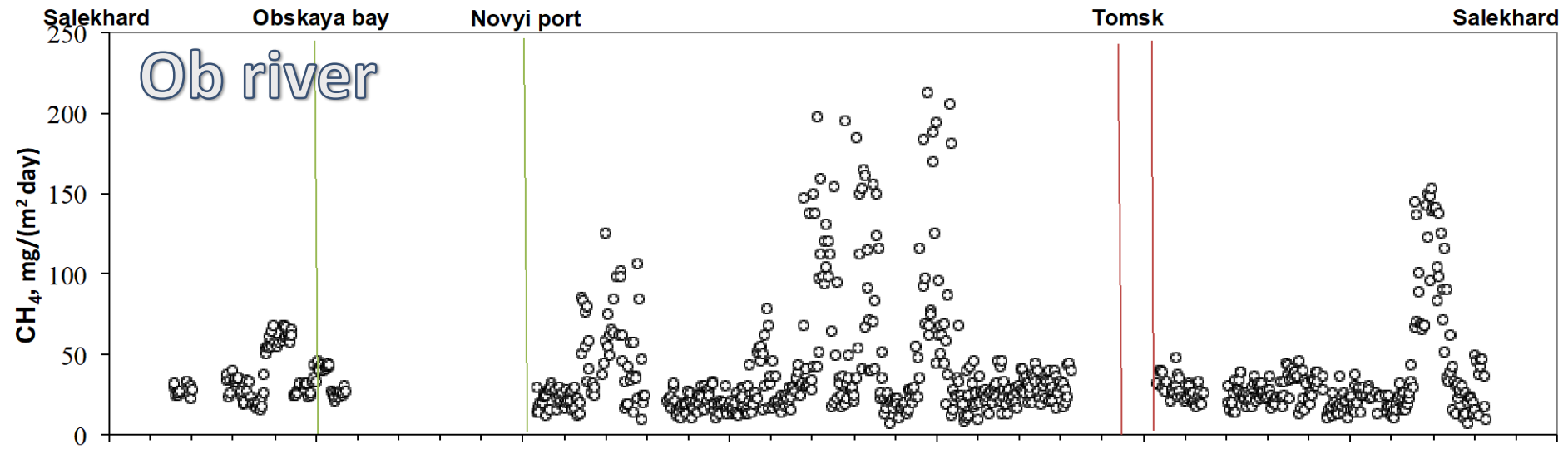
# Расчет потоков CO<sub>2</sub> для Оби балансовым методом



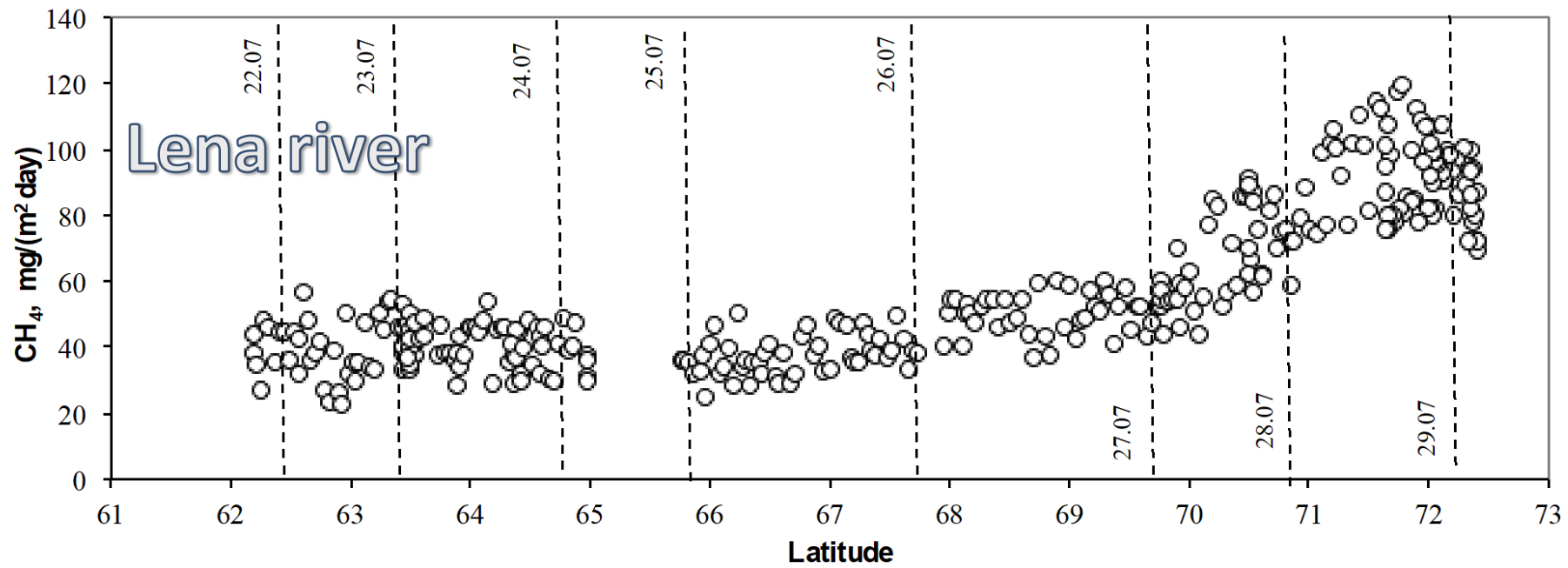
$$F_{CO_2} = K_0 \cdot k \cdot \Delta pCO_2$$

$$k = 0.31u^2 (660/Sc_x)^{0.5}$$

# Поток CH<sub>4</sub>



2.8



## Средние потоки и концентрации CH<sub>4</sub>

Река	Среднее течение		дельта	
	CH <sub>4</sub> nmol	CH <sub>4</sub> mg/(m <sup>2</sup> day)	CH <sub>4</sub> nmol	CH <sub>4</sub> mg/(m <sup>2</sup> day)
Ob	25.0 ± 5.48	25.0 ± 6.35	32 ± 6.31	30.0 ± 3.52
Lena	34 ± 7.43	43 ± 8.68	240.0 ± 39.3	105 ± 15.76

Остров Самойлоского: 20 mg/(m<sup>2</sup>day) (Sachs et al., 2008)

Талики: 80 mg/(m<sup>2</sup>day) (Laurion et al., 2010)

Притоки и небольшие реки: 100-200 mg/(m<sup>2</sup>day) (Bussmann, 2013)

# Выводы

Наши прямые измерения концентраций и потоков углекислого газа и метана показали, что сибирские реки являются источником эмиссии парниковых газов в течение всего лета. В среднем течении обеих рек значения эмиссии как углекислого газа, так и метана практически одинаковы.

Обнаружен широтный тренд в пространственном распределении характеристик  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  вод в главном русле рек Обь и Лена. Тренд определяется ландшафтно-геохимическими условиями водосборного бассейна и степенью деградации вечной мерзлоты.

Избыточные концентрации метана и углекислого газа в среднем течении рек в основном связаны с наземными источниками. Повышенные концентрации метана в дельте Лены могут быть вызваны как повышенными концентрациями метана в реке, так и в морских источниках.