

Обратное моделирование как метод измерения эмиссии метана из полигонов ТБО: сравнение различных подходов

А.Ф. Сабреков^{1,2}, И.Е. Терентьева¹, М.В. Глаголев¹⁻⁴, О.Р. Коцюрбенко^{2,3}

¹Томский Государственный Университет

²Югорский Государственный Университет,

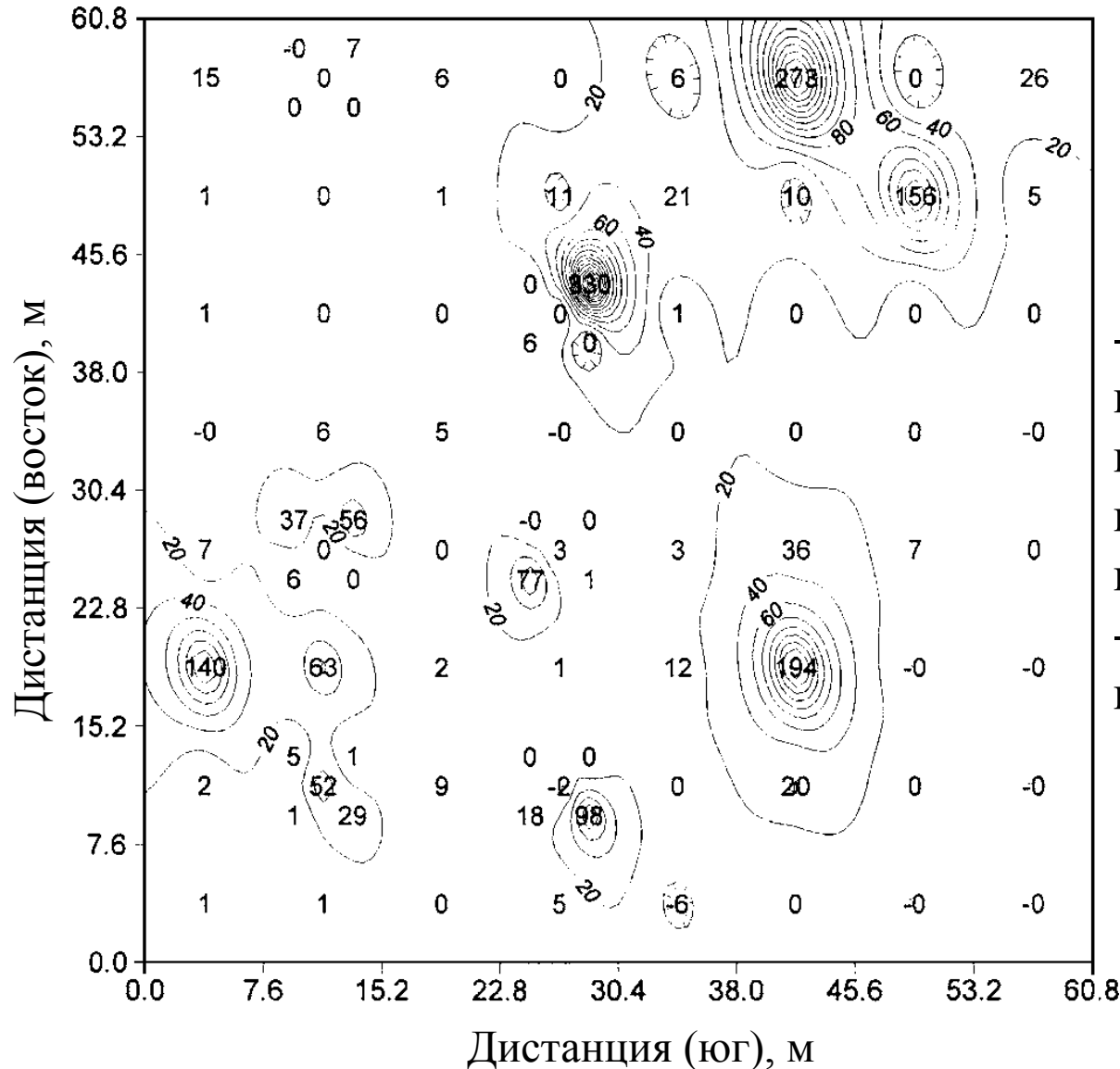
³МГУ им. М.В. Ломоносова,

⁴Институт лесоведения РАН

sabrekovaf@gmail.com

Почему не камерный метод

Взято из [Abichou et al., 2006]



Проблемы применения камерного метода на ПЗО:

- Ярко выраженная временная и пространственная вариабельность удельного потока (УП);
- Невозможность установки на многих ПЗО

Используемые методы

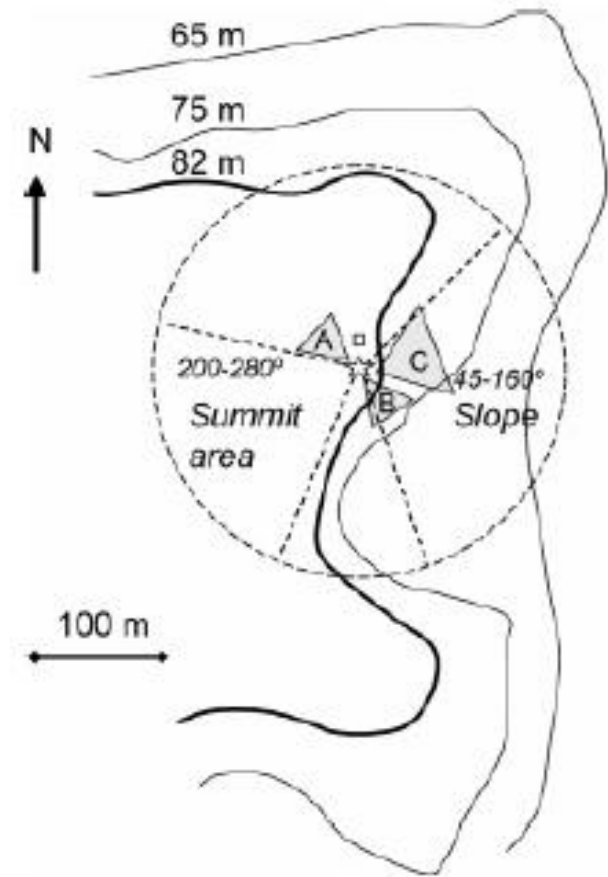
1. Метод микровихревых пульсаций (eddy covariance)
2. Метод вертикального зондирования шлейфа (vertical radial plume mapping)
3. Метод с использованием калибровочного потока дополнительной примеси (double tracer technique, tracer correlation method, tracer gas release-based remote sensing method, dynamic plume tracer dispersion method)
4. Обратное Лагранжево моделирование
5. Обратное Эйлерово моделирование

Метод микровихревых пульсаций

$$F \approx \overline{\rho_d} \overline{w's'}$$

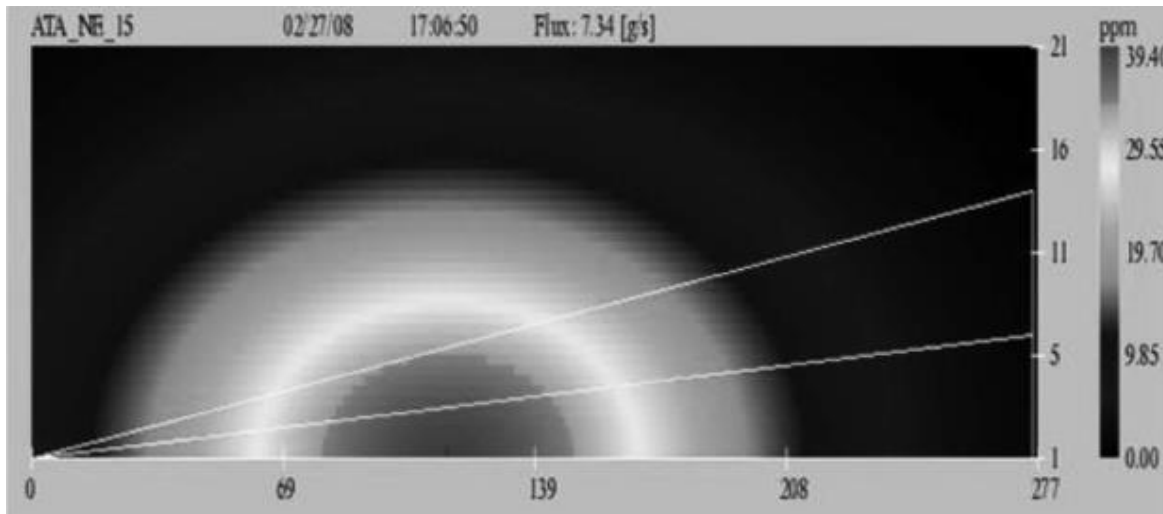
Проблемы:

- стоимость и энергообеспечение;
- наличие сложного рельефа и/или малая площадь участков
- прочие проблемы метода микровихревых пульсаций: необходимость наличия развитой турбулентности, длительность измерений; неоднородность удельного потока в пространстве



Взято из [Lohila et al., 2007]

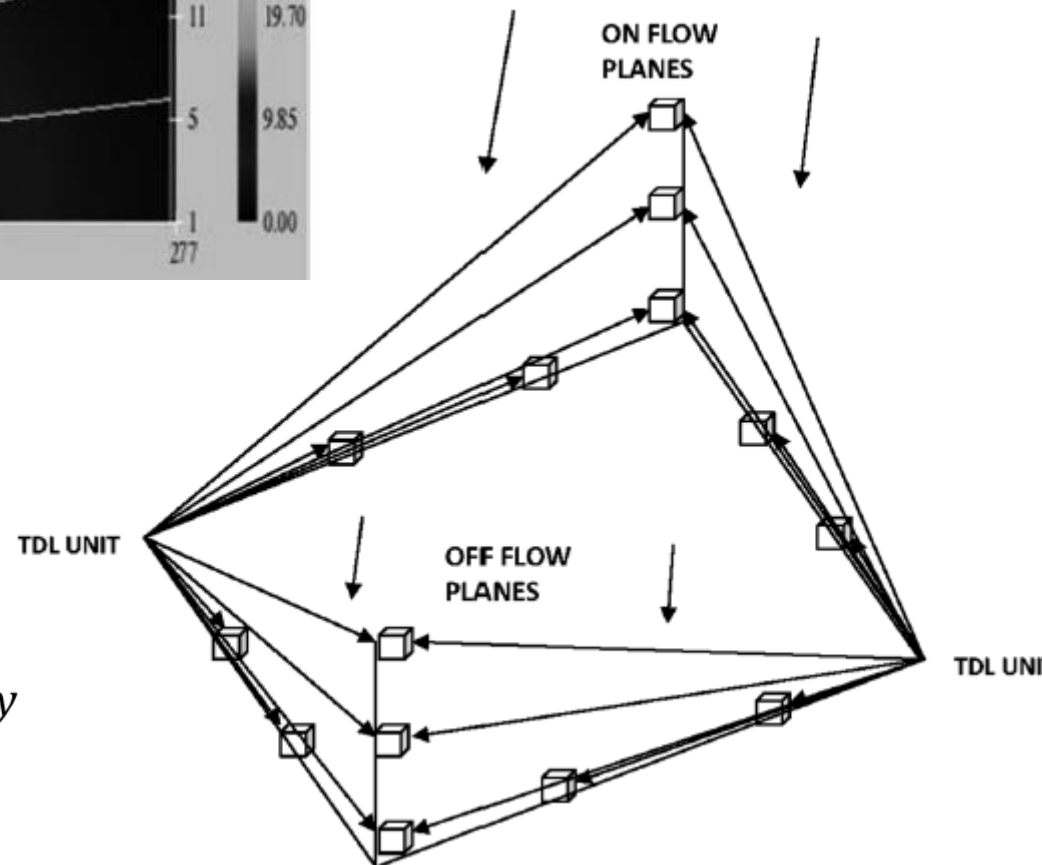
Vertical radial plume mapping



$$Total\ Flux = c \cdot w \cdot Area$$

грамм/с = грамм/м³ · м/с · м²

$$Total\ Flux = \int_0^Y \left(\int_0^Z c(y,z) \cdot w(z) dz \right) dy$$



Взято из [Goldsmith Jr. et al., 2012]

Vertical radial plume mapping

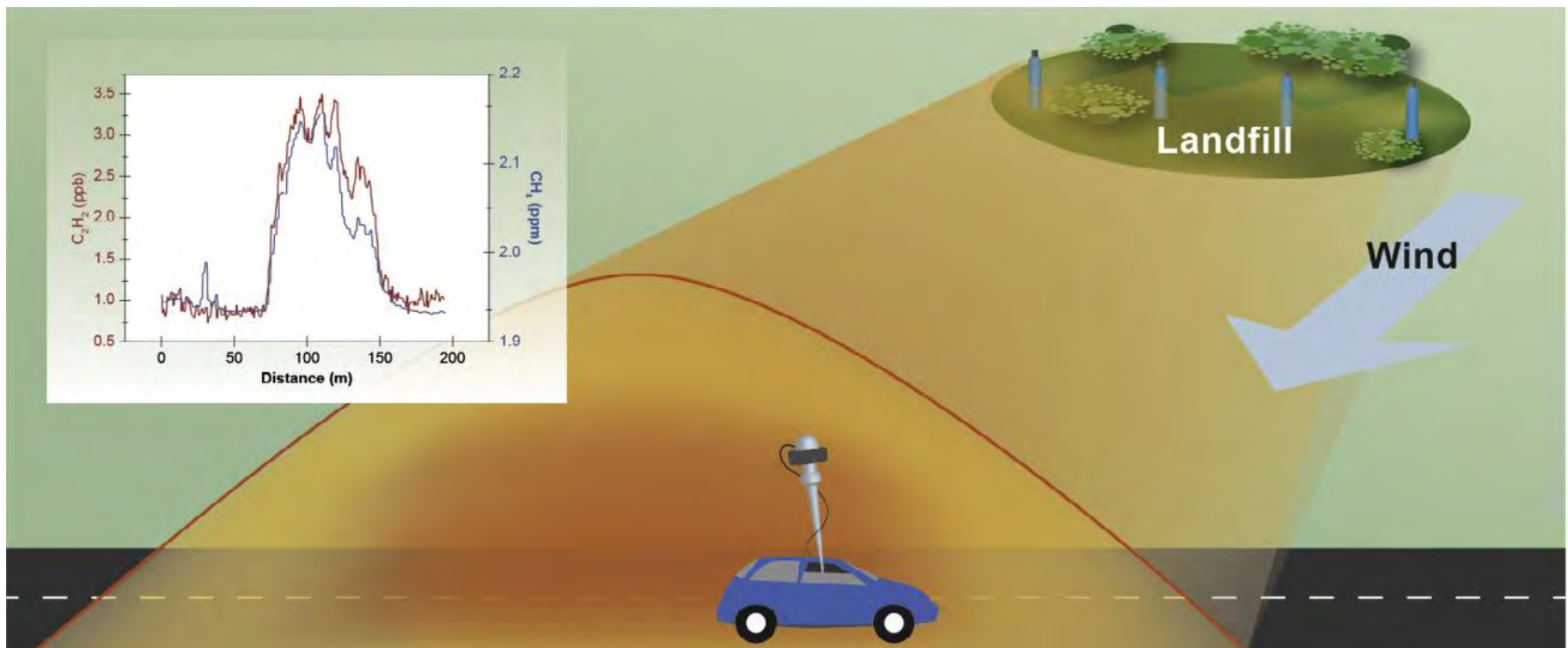
Проблемы:

- неровная и неоднородная поверхность формирует воздушные потоки, приводящие к некорректным результатам измерений
- высокая стоимость приборов и сложность установки на ТБО
- наличие развитой турбулентности

Tracer correlation method

$$E_{\text{methane}} = Q_{\text{tracer}} \times \frac{C_{\text{Methane}} - C_{\text{Methane,background}}}{C_{\text{tracer}} - C_{\text{tracer,background}}}$$

$$E_{\text{methane}} = Q_{\text{tracer}} \times \frac{\int_{\text{plume start}}^{\text{plume end}} (C_{\text{methane}} - C_{\text{methane background}}) dx}{\int_{\text{plume start}}^{\text{plume end}} (C_{\text{tracer}} - C_{\text{tracer background}}) dx} \frac{MW_{\text{methane}}}{MW_{\text{tracer}}}$$



Взято из [Mønster et al., 2014]

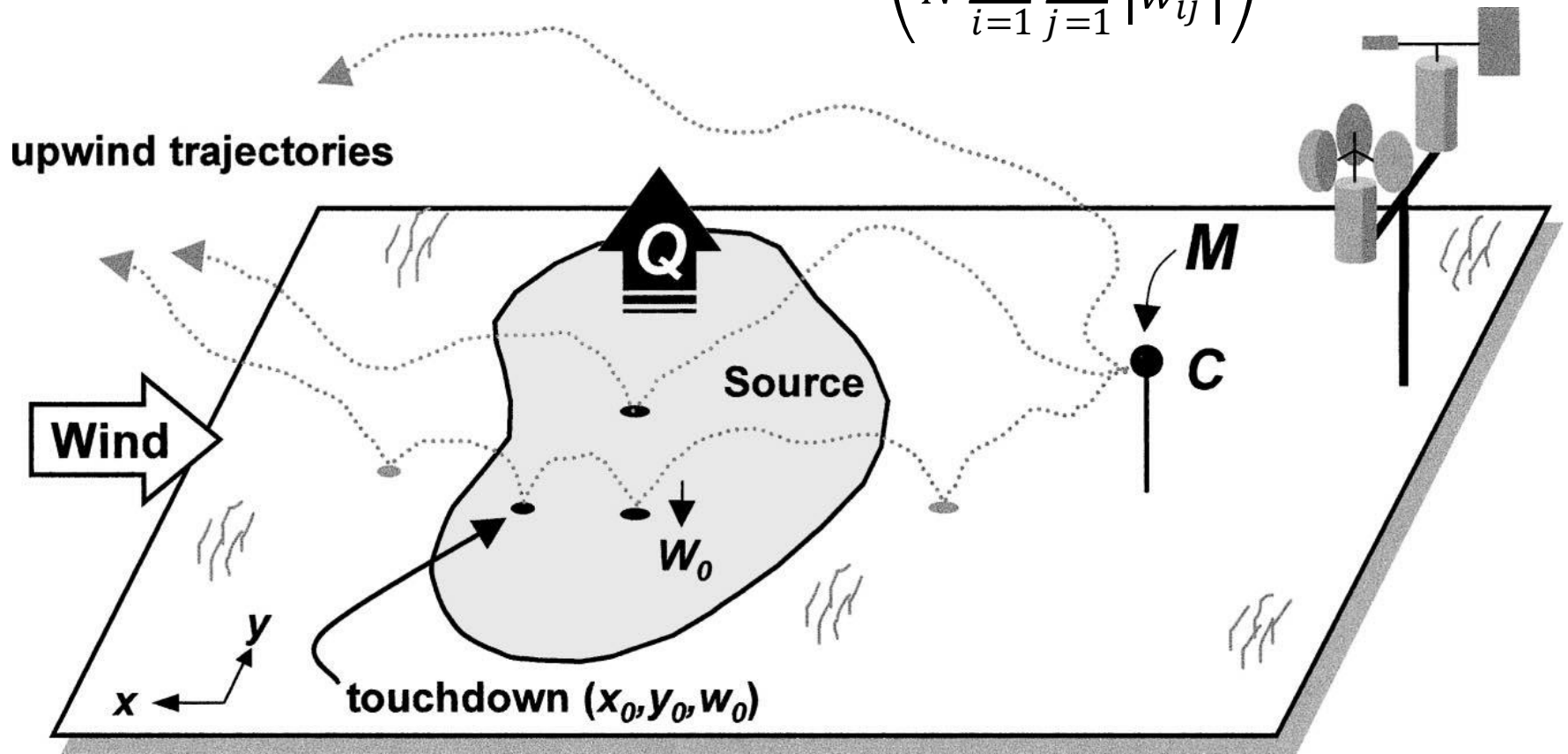
Tracer correlation method

Проблемы:

- высочайшая стоимость оборудования и измерений
- дорожная сеть вокруг объектов есть далеко не всегда
- сложный рельеф непредсказуемо влияет на измерения
- сложность при разделении близко расположенных источников

Обратное Лагранжево моделирование (ОЛМ)

$$Q = (\bar{C}(\text{изм1.5м}) - C_{\text{фон}}) \cdot \left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{|w_{ij}|} \right)^{-1}$$



Взято из [Flesch et al., 2004]

Обратное Лагранжево моделирование (ОЛМ)

Входные данные: u_* , L , σ_u , σ_v , σ_w , C (изм1.5м), $h_{\text{анем}}$, U , вычисленные по усреднённым за 15-20 минут данным измерений ультразвукового анемометра, а также координаты расположения источника

Структура модели: $N = 20000$, дистанция расчёта – 500 м

$$d\mathbf{X}(t) = \mathbf{V}(t)dt$$

$$d\mathbf{V}(t) = \mathbf{a}(t, \mathbf{X}(t), \mathbf{V}(t))dt + \sqrt{C_0 \bar{\varepsilon}(\mathbf{X}(t), t)} d\mathbf{W}(t)$$

Значения параметров модели заданы согласно [Thomson, 1987; Flesch et al., 1995; 2004], тип турбулентности – Гауссова.

Решение уравнений: неявный метод Эйлера

Обратное Эйлерово моделирование (ОЭйЛМ)

Входные данные: u_* , L , $C(\text{изм}1.5\text{м})$, $C(\text{изм}6\text{м})$, $h_{\text{анем}}$, U ,
вычисленные по усреднённым за 15-20 минут данным измерений
ультразвукового анемометра, а также координаты расположения
источника

Структура модели: уравнение в частных производных

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left((K_z(z,t) + D_0) \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) + u_x(z,t) \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}$$

Граничные условия: $(K_z(z,t) + D_0) \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q$; $C|_{z=Z} = C_{\text{изм},6\text{м}}$; $C|_{x=0} = C_{\text{фон}}$

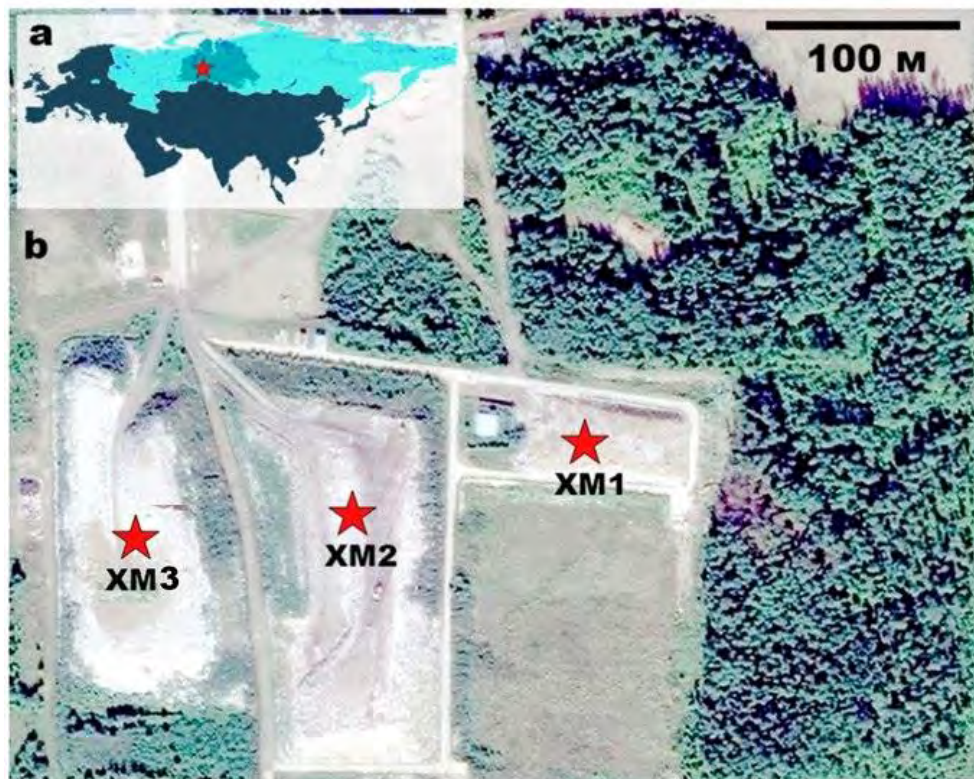
Значения параметров модели заданы согласно [Foken and Nappo, 2008] в соответствии с теорией подобия Монина-Обухова.

Решение уравнений: метод расщепления по направлениям (схема Кранка-Николсон по оси z , схема предиктор-корректор по оси x);
поиск минимума вёлся методом Ньютона.

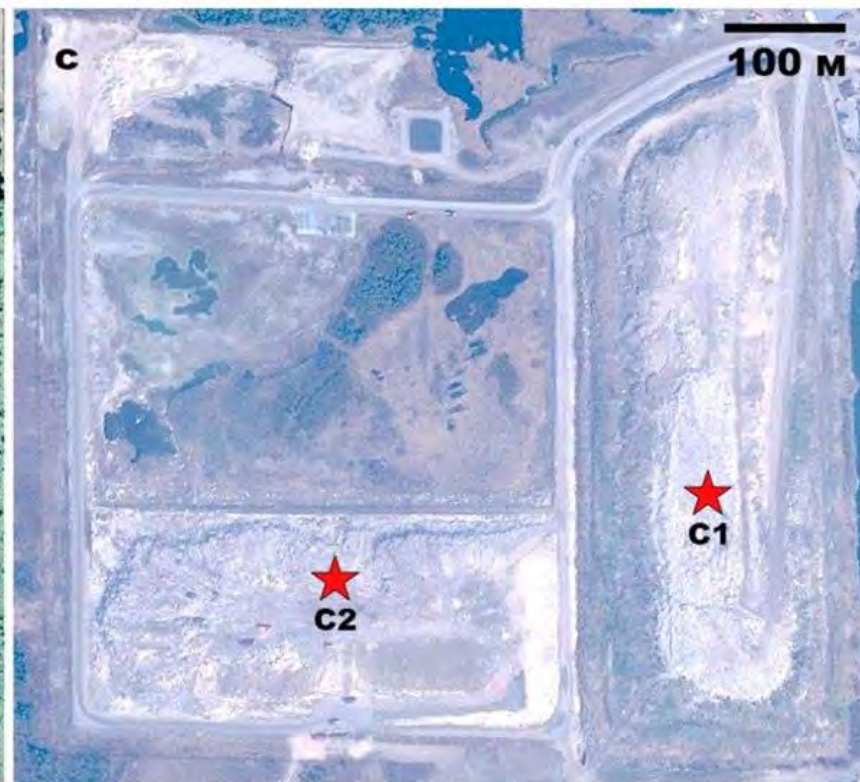
Объекты исследования

Карта	Длина, ширина и высота крыши, м	Статус
ХМ2	180×70×18	Активна с 1997 по настоящее время, заполняется мелкогабаритным мусором
ХМ3	125×60×16	Активна с 1997 по настоящее время, последние 3 года используется только для крупногабаритных отходов
С1	300×60×34	Закрыта в 2007, рекультивирована в 2015, оборудована аэрационными трубами (1 труба на 500 м ² площади крыши)
С2	220×60×28	Закрыта в 2013, частично рекультивирована в 2015 (50% площади)

Объекты исследования

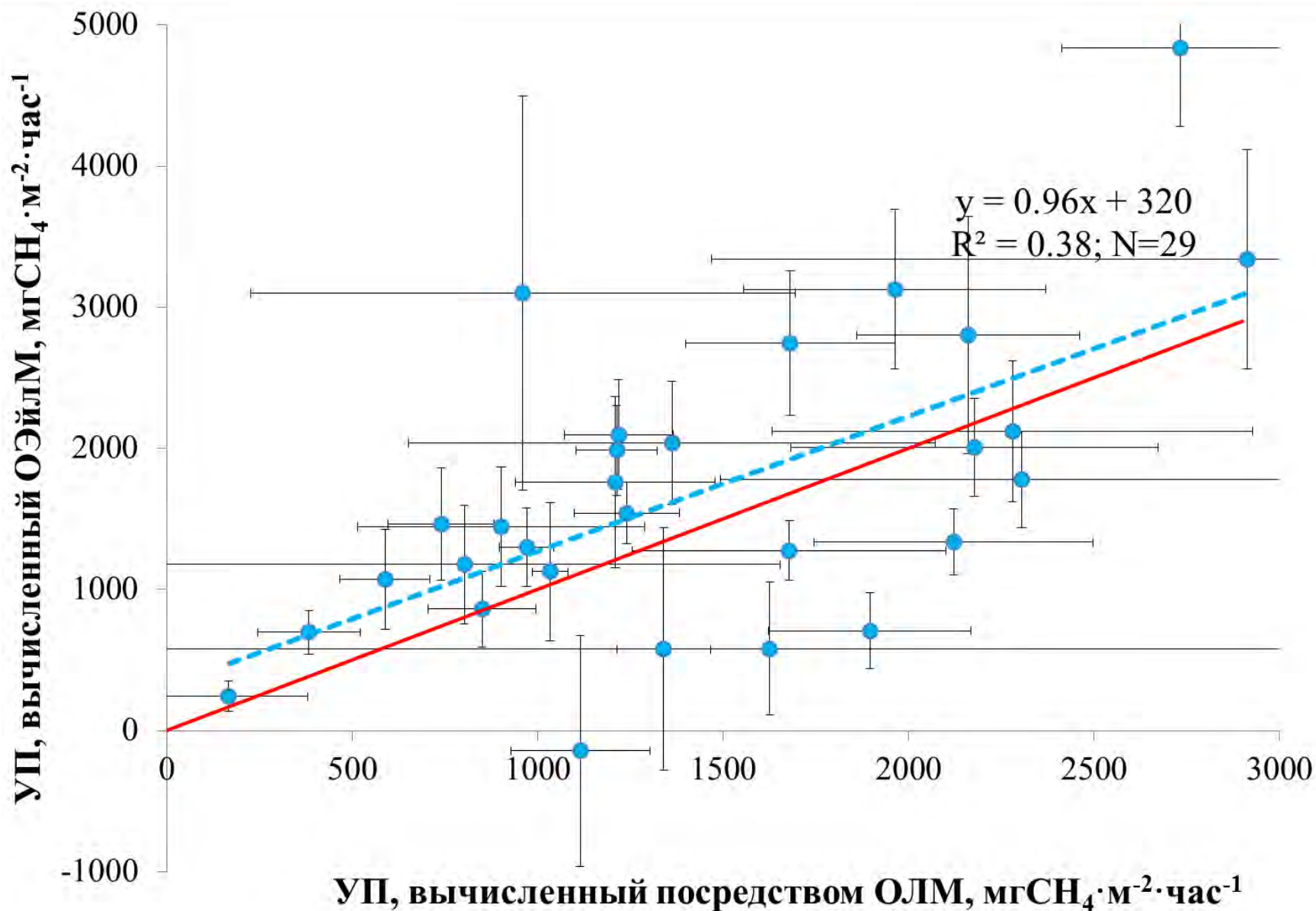


Полигон захоронения ТБО Ханты-Мансийска



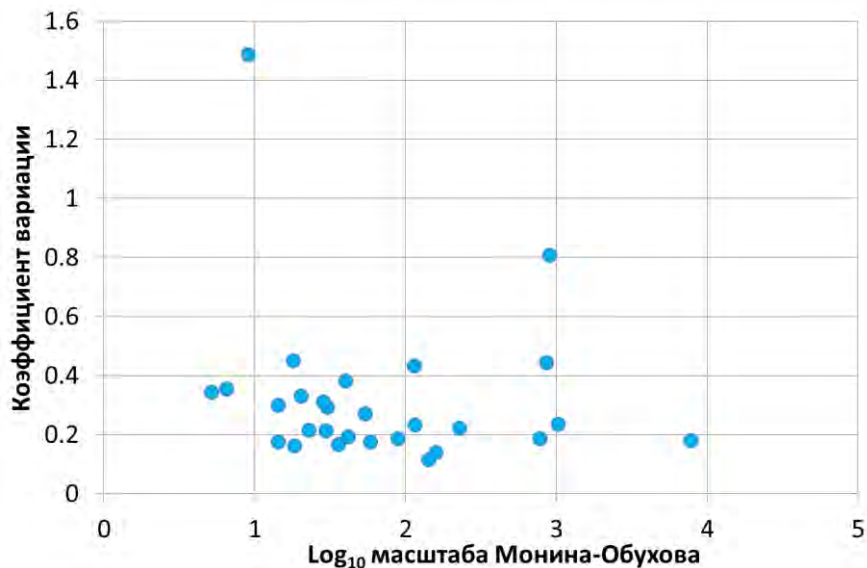
Полигон захоронения ТБО Сургута

Сопоставление результатов ОЭйЛМ и ОЛМ

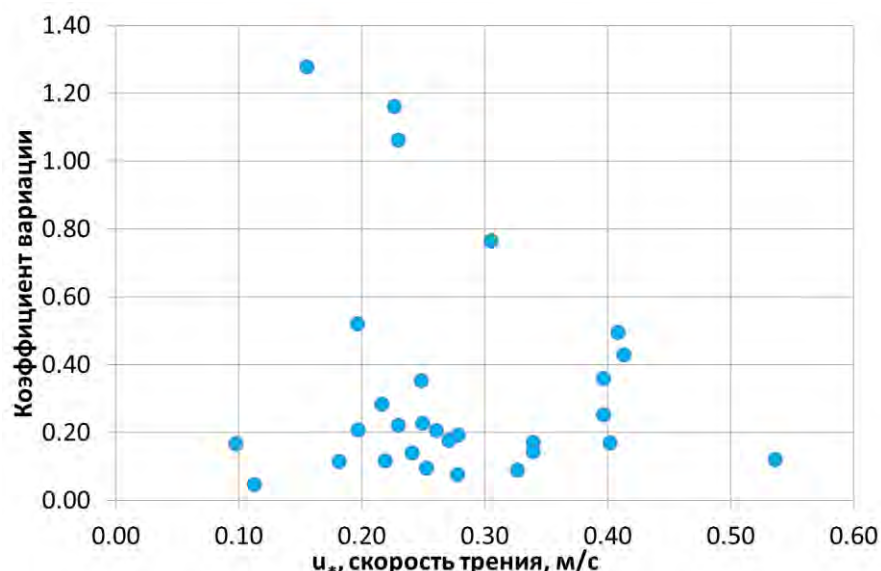
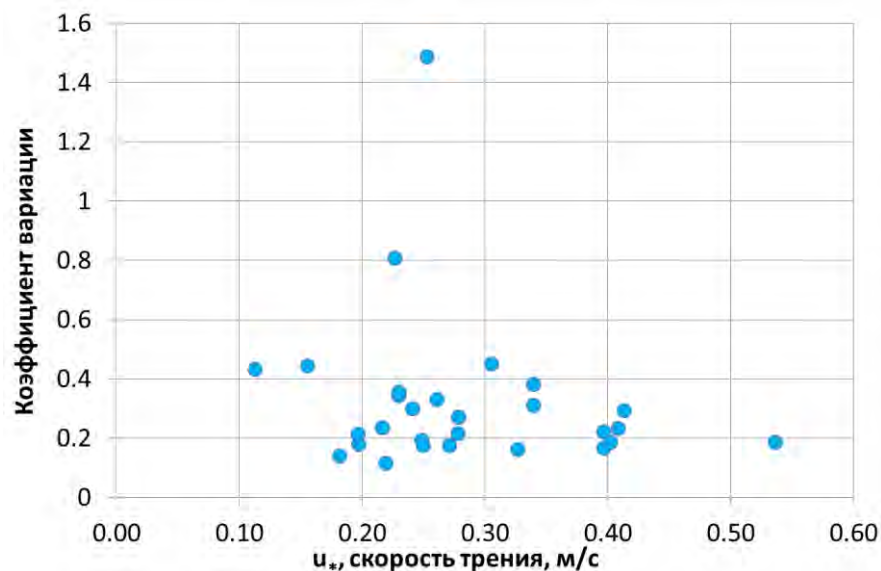
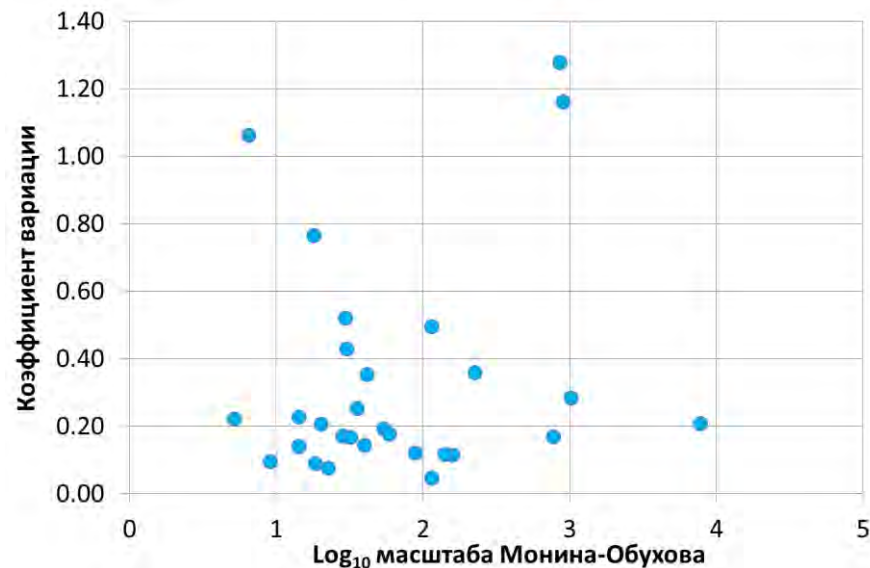


Причины высокой погрешности измерений

ОЭйЛМ



ОЛМ



Воспроизводимость результатов

Полигон и даты	Величина удельного потока, $\text{мгCH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$	
	ОЭйлМ	ОЛМ
ХМЗ 18-19.07	1760 ± 604	1210 ± 268
	1445 ± 424	902 ± 388
С2 15-16.05	862 ± 268	851 ± 145
	708 ± 270	1896 ± 273
ХМЗ 18-19.09	1780 ± 343	2305 ± 813
	2037 ± 435	1363 ± 710

Чувствительность ОЭйлМ и ОЛМ к входным данным

$$S = \left| \left(\Delta y / \Delta k_i \right) \cdot \left(k_i / y \right) \right|$$

Параметр	ОЭйлМ			ОЛМ		
	Среднее	Мин	Макс	Среднее	Мин	Макс
u_*	0.91	0.41	1.30	1.90	0.08	5.15
L	0.12	0.001	0.44	0.68	0.12	3.64
$C(\text{изм}1.5\text{м})$	2.49	1.31	8.04	1.17	0.02	2.47
$C_{\text{фон}}$	0.19	0.005	1.03	0.79	0.12	2.62
z_0	0.20	0.006	1.04	0.81	0.02	2.47
σ_w	-	-	-	0.81	0.002	2.23

Выводы

1. Используемые методы дают близкие оценки эмиссии метана из полигонов ТБО.
2. Погрешность измерений обоих методов колеблется в пределах 10-30%, большие погрешности ассоциированы с направлением ветра с окружающих полигонов, а не со слабой турбулентностью
3. Чувствительность ОЛМ к входным данным в целом выше, чем ОЭйЛМ
4. Значения эмиссии, полученные ОЭйЛМ, воспроизводятся лучше, чем значения, полученные ОЛМ

Задачи на повестке

1. Отражение в моделях воздушных течений на неоднородном рельефе и оценке того, как это влияет на величину получаемого удельного потока
2. Анализ работы при других величинах эмиссии из других «сложных» для изучения из-за своей неоднородности источников метана – озёр, геологических просачиваний (сипов и вулканов)
3. Поиск фильтров, способных эффективно отсеивать измерения, несущие некорректную информацию из-за влияния сторонних источников

Спасибо за внимание

