Анализ загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы городов Сибири по данным наземного и спутникового мониторинга

Кузьминых Р.А.[1], Рапута В.Ф.[1], Ярославцева Т.В.[1,2], Леженин А.А.[1]

[1] ИВМиМГ СО РАН,
[2] Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора

План доклада:

1) Модель реконструкции поля атмосферного загрязнения
2) Методика интерполяции поля концентрации примеси с использованием наземных и спутниковых наблюдений. Результаты
3) Методика построения минорантных и мажорантных полей загрязнения на базе данных наземных измерений. Результаты

Модель реконструкции поля загрязнения

Суммарная концентрация примеси в атмосфере q(x,y) представляется в виде:

$$q(x,y) = \sum_{i=1}^{n} q_i(x,y) \qquad (1)$$

где **n** - количество узлов сетки (источников), **qi(x,y)** – концентрация, создаваемая i–м источником, расположенным в точке с координатами (xi,yi).

$$q_i(x,y) = \frac{A \cdot M_i}{r_i^2} \cdot exp\left(\frac{-2r_{max}}{r_i}\right) \cdot g\left(x - x_i, y - y_i\right) + B \qquad (2)$$

A - константа, агрегирующая параметры источника и метеорологических условий; **B** - величина, отражающая степень оседания взвешенных веществ на снежный покров; **Mi** - эмиссия узла-источника; **ri** - расстояние от узла-источника до т-ки наблюдений, **r_max** - расстояние от источника, на котором достигается максимум приземной концентрации; **g(x,y)** – повторяемость направлений выноса примеси.

Модель реконструкции поля загрязнения

При наличии данных измерений концентрации примеси Sj, j=1,…,m в атмосфере города на m постах, параметры A, B можно оценить методом наименьших квадратов, исходя из минимума целевого функционала, с учётом соотношений (1), (2):

$$\sum_{j=1}^{m} \left\{ A\, q\left(x_j, y_j\right) + B - S_j \right\}^2 \rightarrow \min \qquad (3)$$

Детекция снежного покрова

I вариант (Для растрового изображения)

1) Переводим растр в одноканальное изображение;
2) Нормируем значения в пикселях от 0 до 1;
3) Определяем пороговое значение интенсивности тона пикселя.

II вариант (Для геопривязанного изображения)

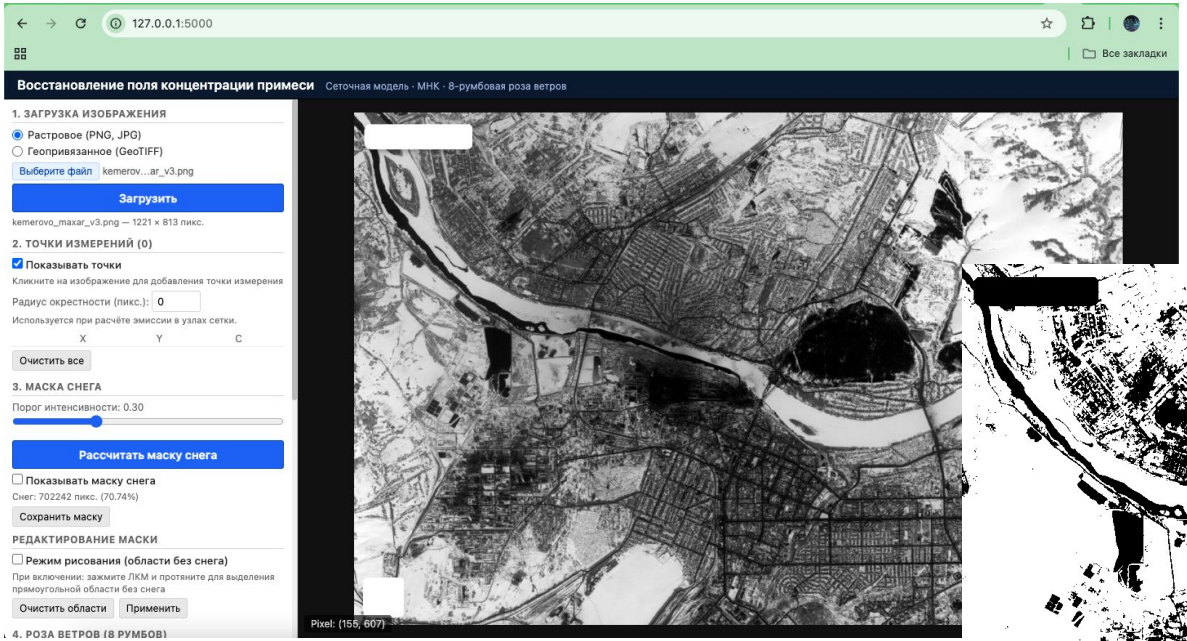
1) Рассчитываем значения NDSI:

NDSI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR),

где значения NDSI от -1 до +1, Green – видимый зеленый (Visible Green), SWIR – коротковолновый инфракрасный (Short Wave Infrared).

2) Определяем пороговое значение интенсивности тона пикселя.

Маска снега (Кемерово)

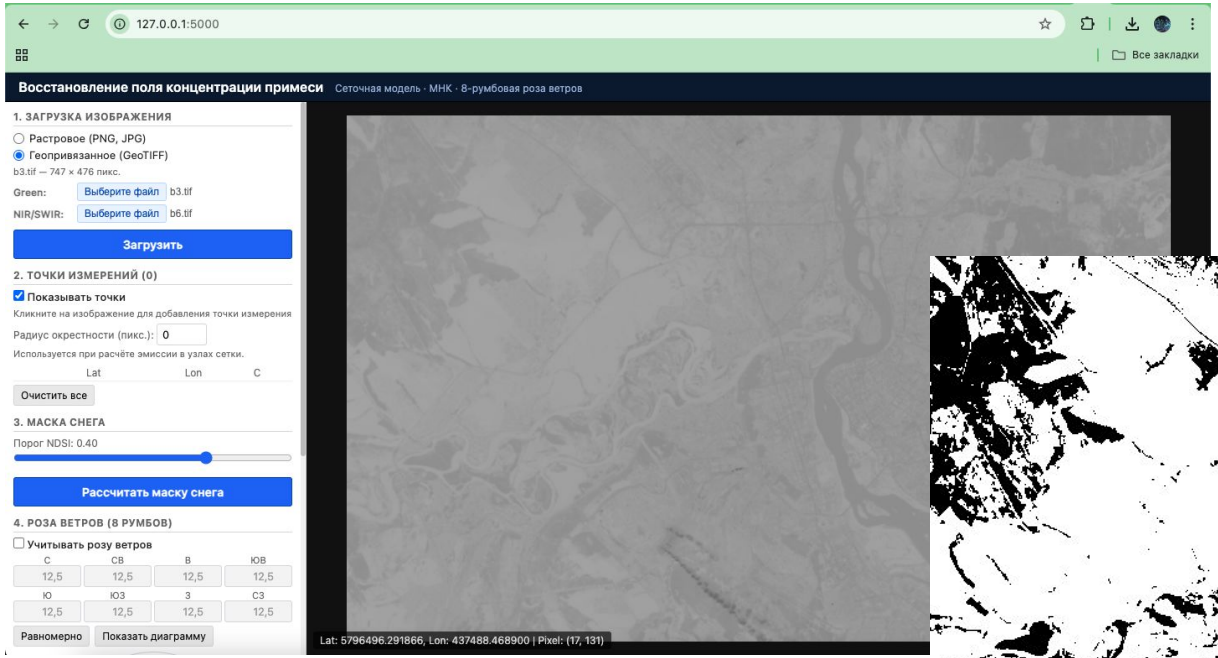


Расчет маски снега для растрового рисунка

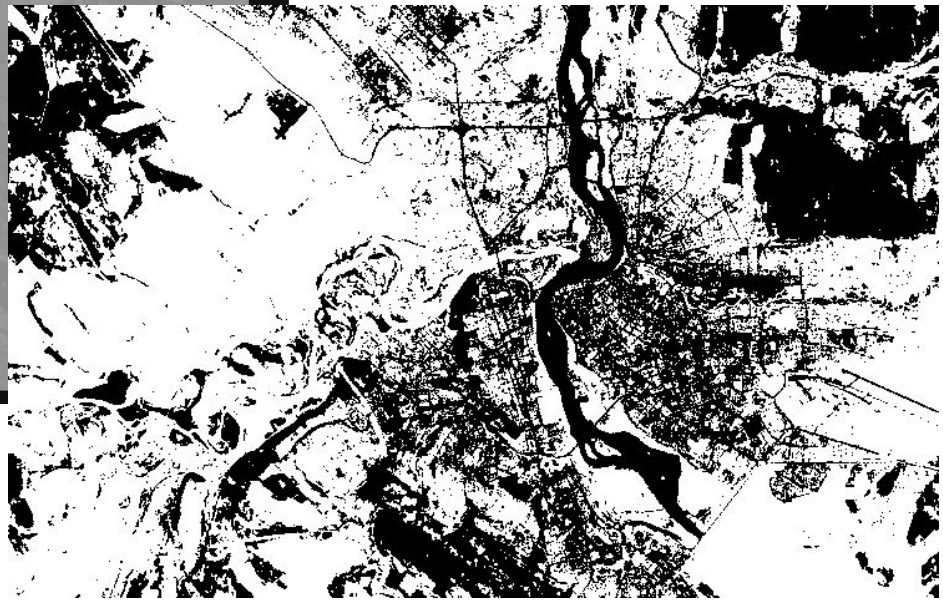


Маска снега для г. Кемерово
(белым выделен детектированный снег)

Маска снега (Иркутск)

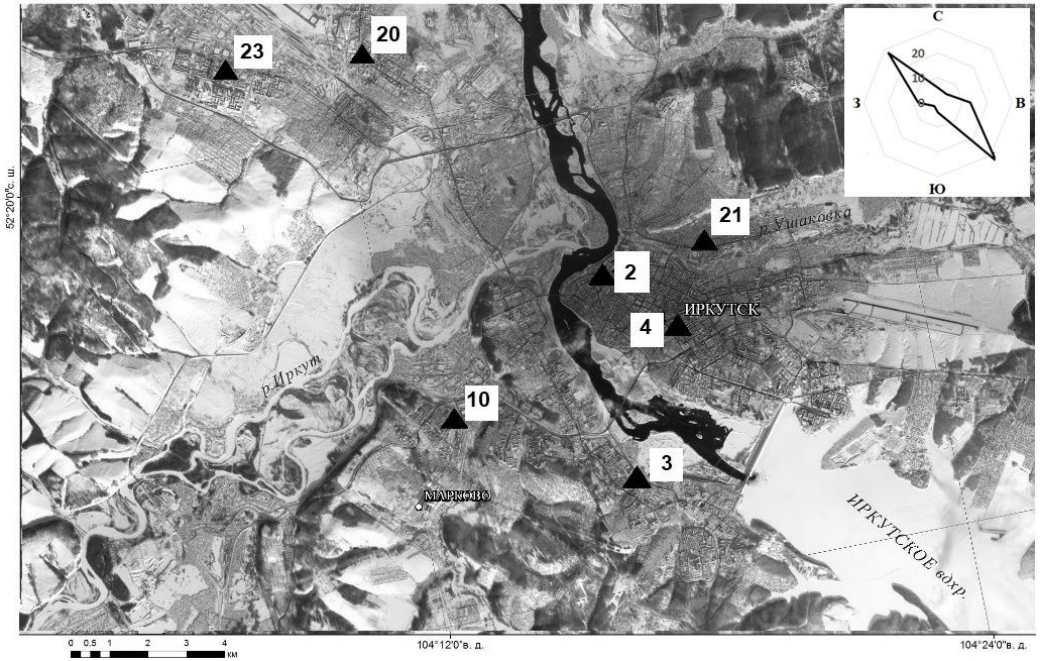


Расчет маски снега для мультиспектрального снимка изображения



Маска снега для г. Иркутск
(белым выделен детектированный снег)

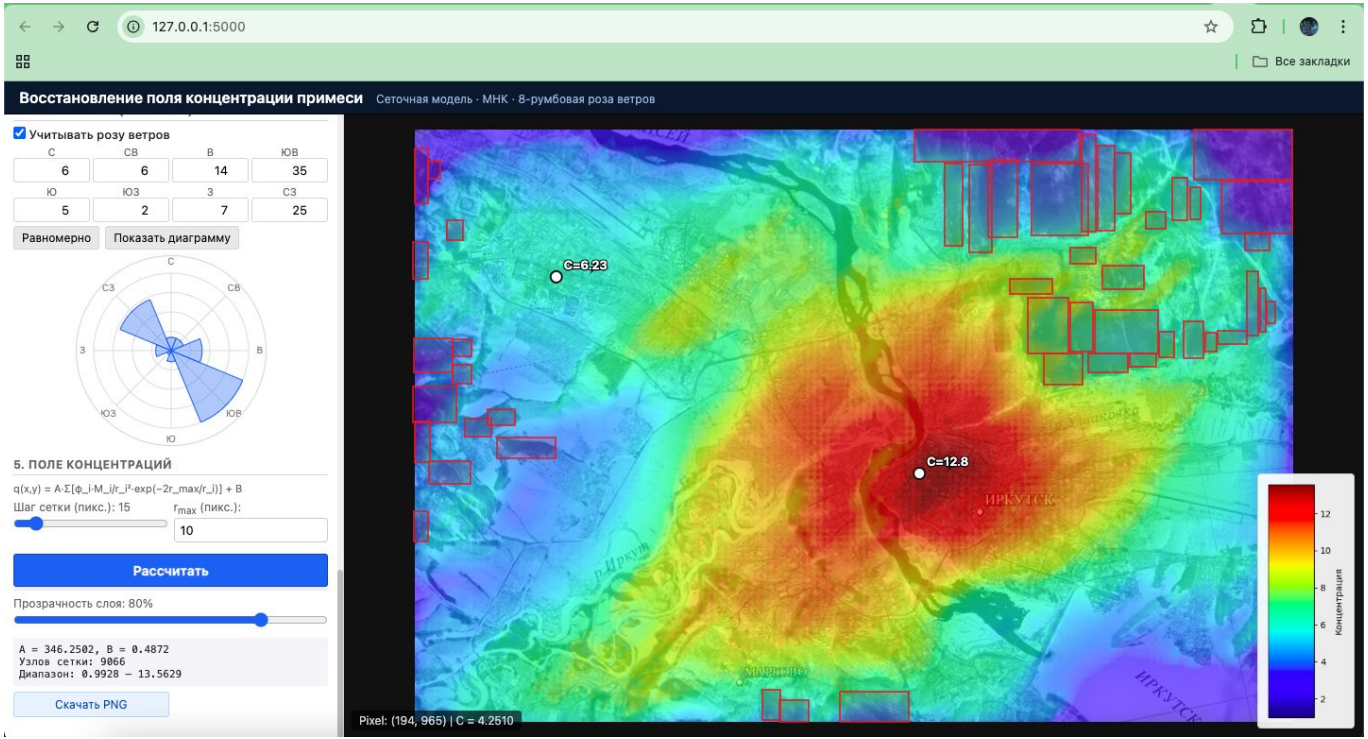
Интерполированное поле концентраций бензапирена, г. Иркутск



Фрагмент спутникового снимка с КА Landsat-8 от 22.12.2014,
(Снимок предоставлен СЦ ФГБУ НИЦ "Планета")

	Номера постов, г. Иркутск		
	2	3	23
дек., 2014	24,50	-	12,20
янв., 2015	9,20	-	3,30
фев, 2015	4,70	-	3,20
Среднее, зима 2014-15	12,80	-	6,23
дек., 2018	25,30	19,70	-
янв., 2019	9,10	5,50	0,83
фев, 2019	10,90	6,70	1,30
Среднее, зима 2018-19	15,10	10,63	1,07

Интерполированное поле концентрации бензапирена, г. Иркутск



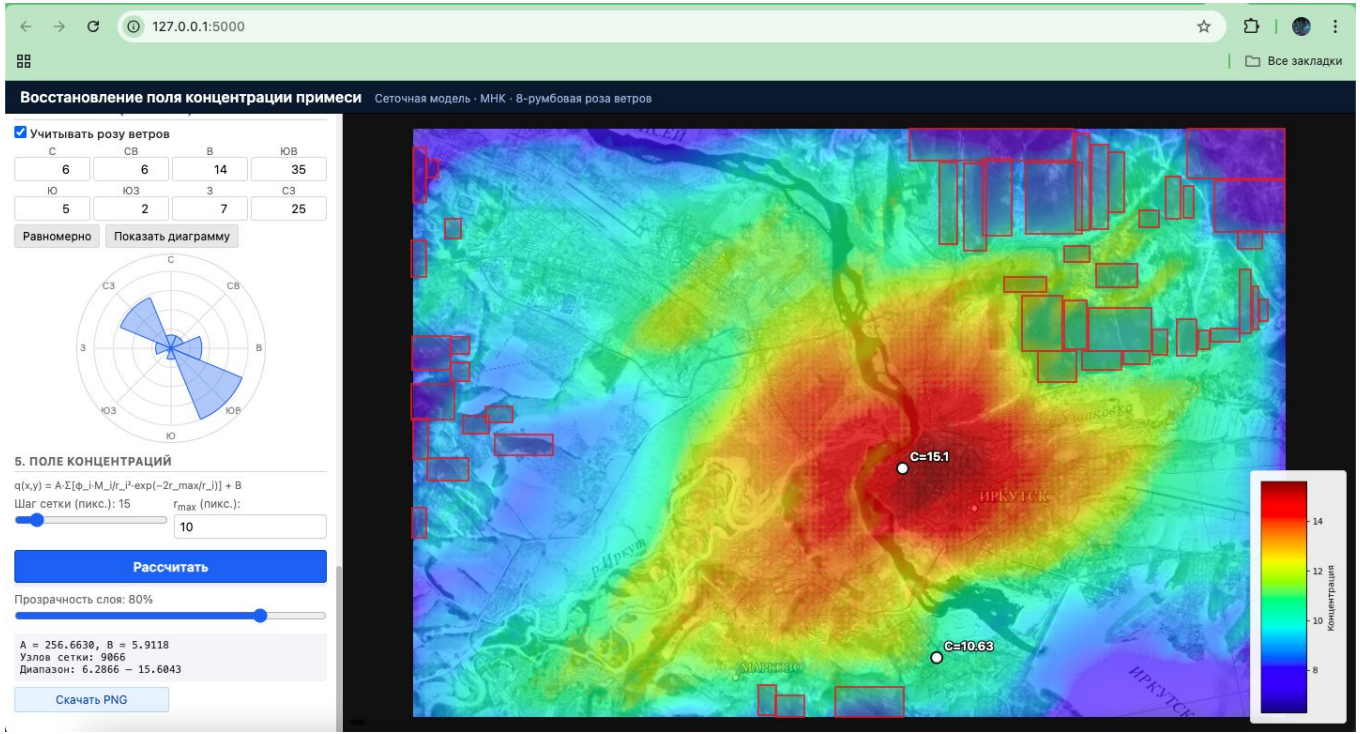
Поле концентраций БП, восстановленное по среднемесячным концентрациям для зимнего сезона 2014-15 гг.

Параметры модели реконструкции, рассчитанные по ф-ле (3):

$$A = 346{,}3$$

$$B = 0{,}49$$

Интерполированное поле концентрации бензапирена, г. Иркутск



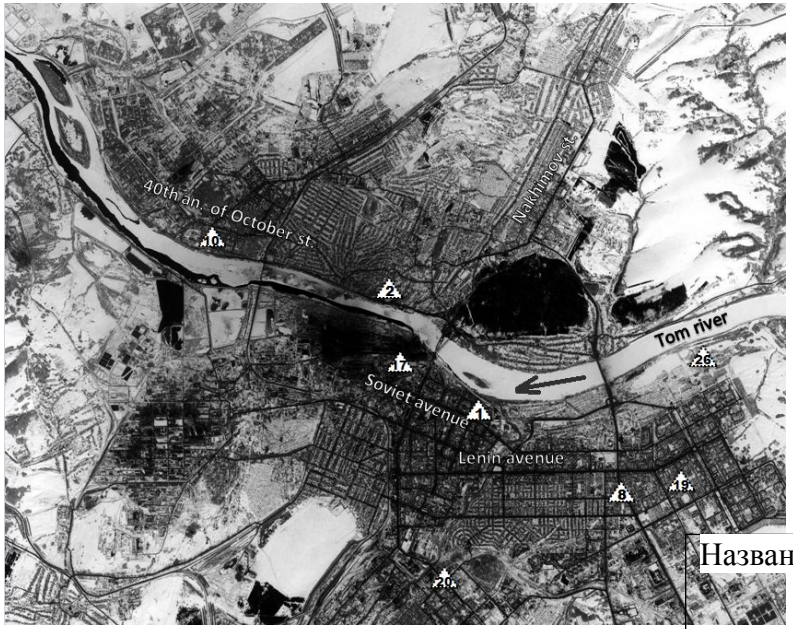
Поле концентраций БП, восстановленное по среднемесячным концентрациям для зимнего сезона 2018-19 гг.

Параметры модели реконструкции, рассчитанные по ф-ле (3):

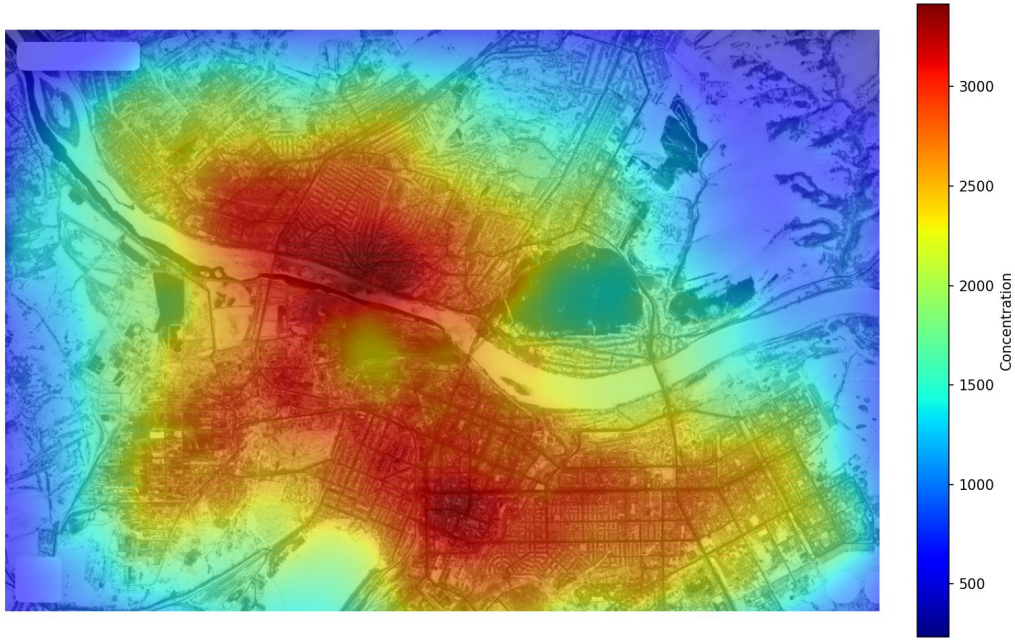
$$A = 256,7$$

$$B = 5,9$$

Интерполированное поле концентраций суммы ПАУ, г. Кемерово



Снимок г. Кемерово от 26.03.2006 г.

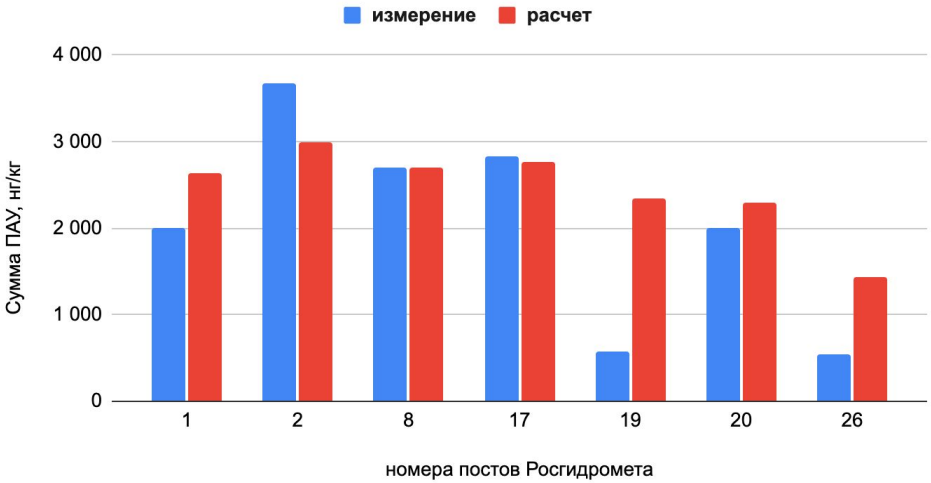


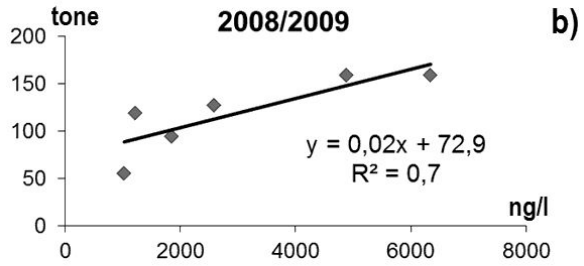
Названия ПАУ	Номера постов							
	1	2	8	10	17	19	20	26
Сумма ПАУ, нг/кг	2000	3670	2700	5030	2830	582	2000	544

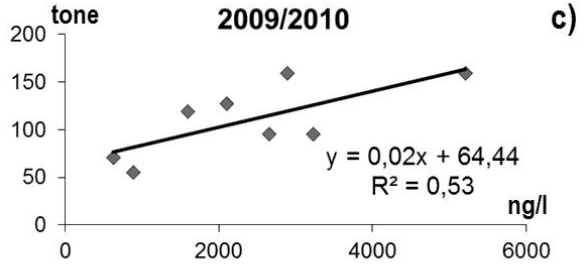
(данные за зимний сезон 2010-11 гг.)

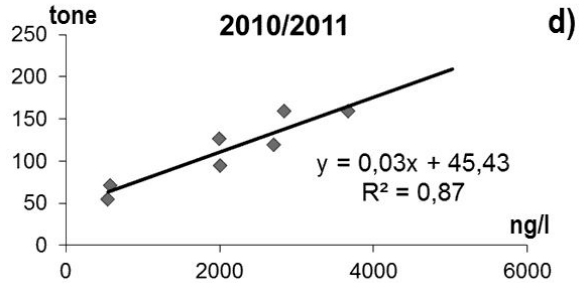
Данные по г. Кемерово

Данные измерений суммы ПАУ в снеговых пробах (нг/кг) и рассчитанные значения по ф-ле (2)









Линейно-корреляционные зависимости между яркостью пикселей на снимке и суммой ПАУ в снеговых пробах для зимних сезонов: 2008-2009 гг. (б), 2009-2010 гг. (в), 2010-2011 гг. (г)

Технические характеристики

веб-приложения для интерполяции поля атмосферного загрязнения

- Веб-приложение имеет **клиент-серверную** архитектуру. Серверная часть реализована на языке программирования **Python 3** (Flask), клиентская часть - на **JavaScript**.
- Для работы с геопривязанными изображениями используется библиотека **rasterio** (базируется на системной библиотеке **GDAL**).
- Для визуализации поля концентраций используются функции библиотеки **MatPlotLib**.

Модель реконструкции поля загрязнения

Модель распространения легкой примеси от точечного источника:

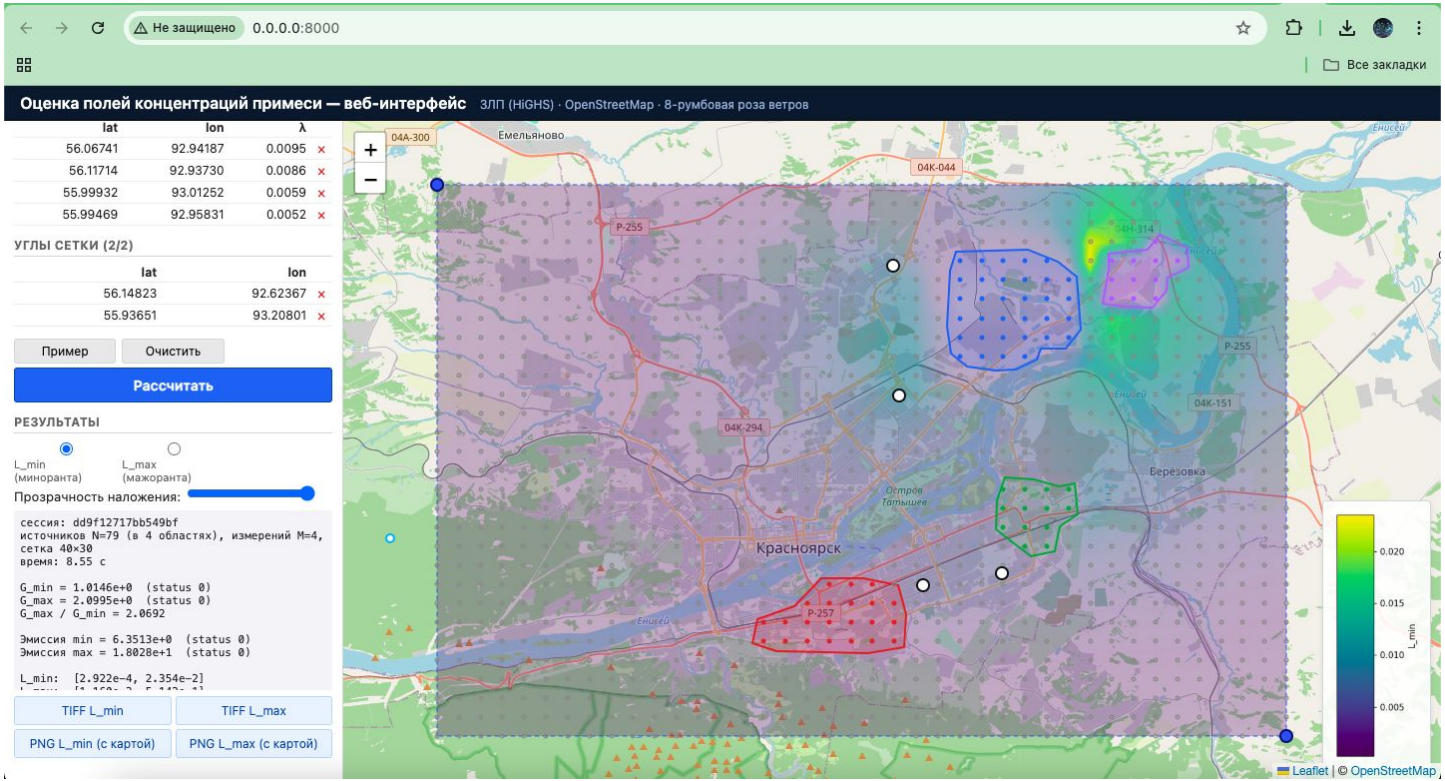
$$q(x,y) = \frac{\theta P\left(\gamma + 180^{\circ}\right)}{r^2 e^{\frac{2r_{max}}{r}}} \qquad (4)$$

Задача линейного программирования (ЗЛП) по оценке параметров модели реконструкции поля концентраций (4) с системой ограничений, определяемой данными в точках измерений.

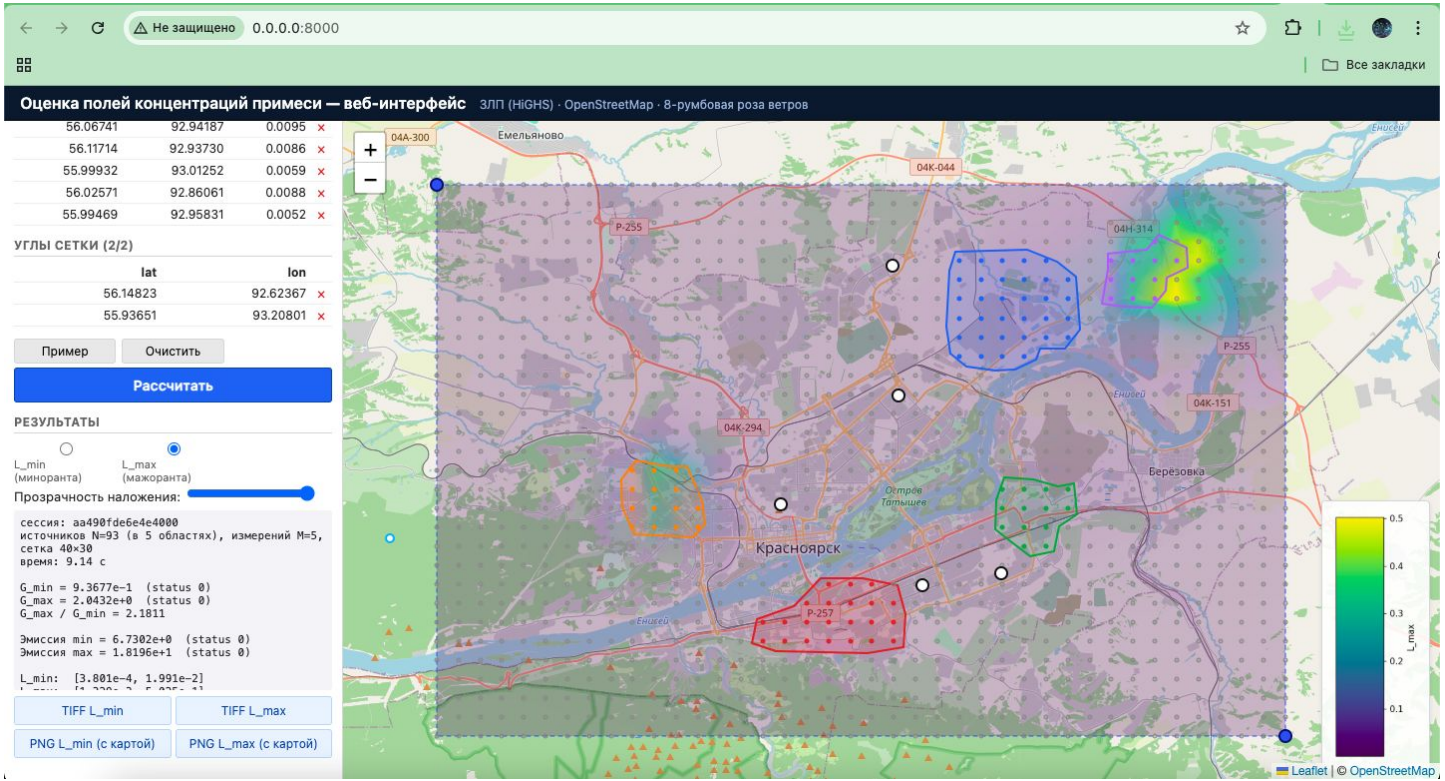
$$L\left(\vec{\theta}\right) = \sum_{i=1}^{N} \theta_i f_i(x,y) \underset{\vec{\theta}\in\Omega}{\longrightarrow} \begin{matrix} min \\ max \end{matrix} \qquad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \theta_i f_i\left(x_k, y_k\right) = \lambda_k, k = \overline{1,M} \qquad \Omega = \left\{\theta_i \geq 0, i = \overline{1,N}\right\}$$

Построение минимаксных полей концентраций, г. Красноярск



Построение минимаксных полей концентраций, г. Красноярск

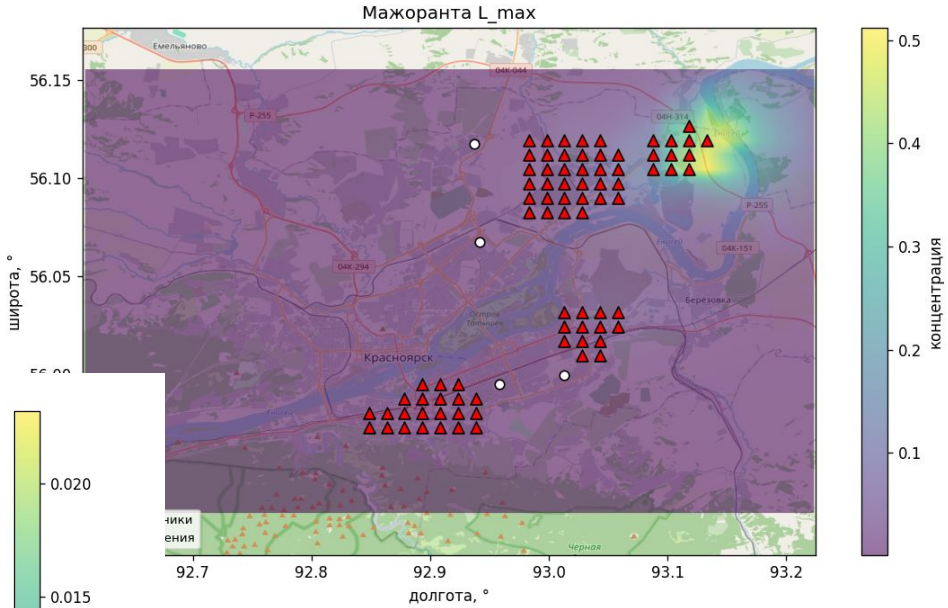


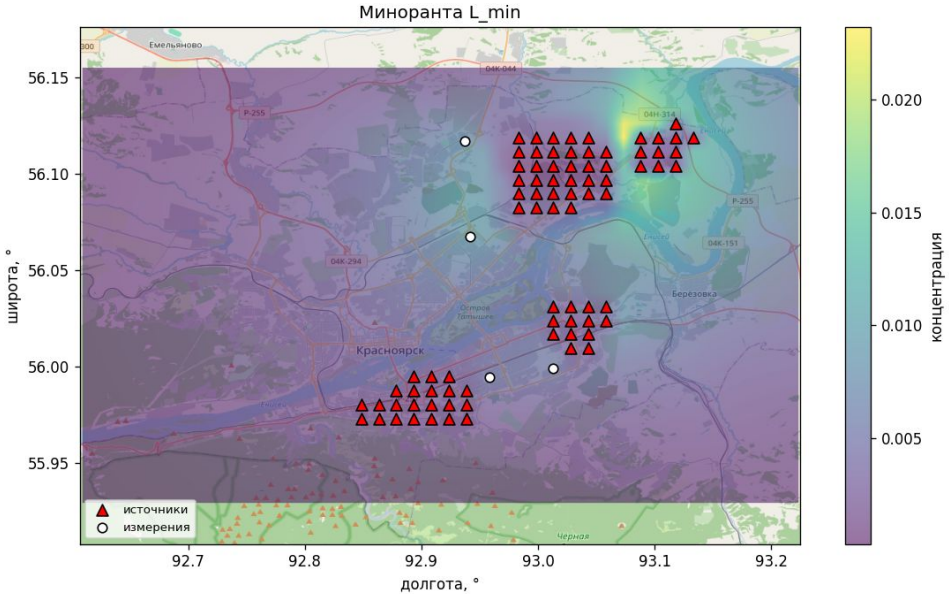
Построение минимаксных полей концентраций, г. Красноярск

Названия постов г. Красноярск	координаты, latlon	Средняя концентрация БаП (мг/м3) за месяцы (янв, фев, мар), 2026 г.
Северный	56.0674074, 92.9418728	0,0095
Солнечный	56.1171389, 92.9373045	0,0086
Черемушки	55.9993234, 93.012518	0,0059
Покровка	56.0257053, 92.860606	0,0088
Кировский	55.9946894, 92.9583107	0,0052

Название объекта	Адрес
Красноярская ТЭЦ-2 Труба №1, №2	Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Лесопильщиков, 156
ООО «Красноярский цемент»	Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Краснопресненская, д.1
Красноярская ТЭЦ-1 Труба №5	Красноярский Край, г. Красноярск, Фестивальная ул., 2
АО «РУСАЛ Красноярск» ГОУ №5-1, №5-2	Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Пограничников, 40
Красноярская ТЭЦ-3	Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Пограничников, 5

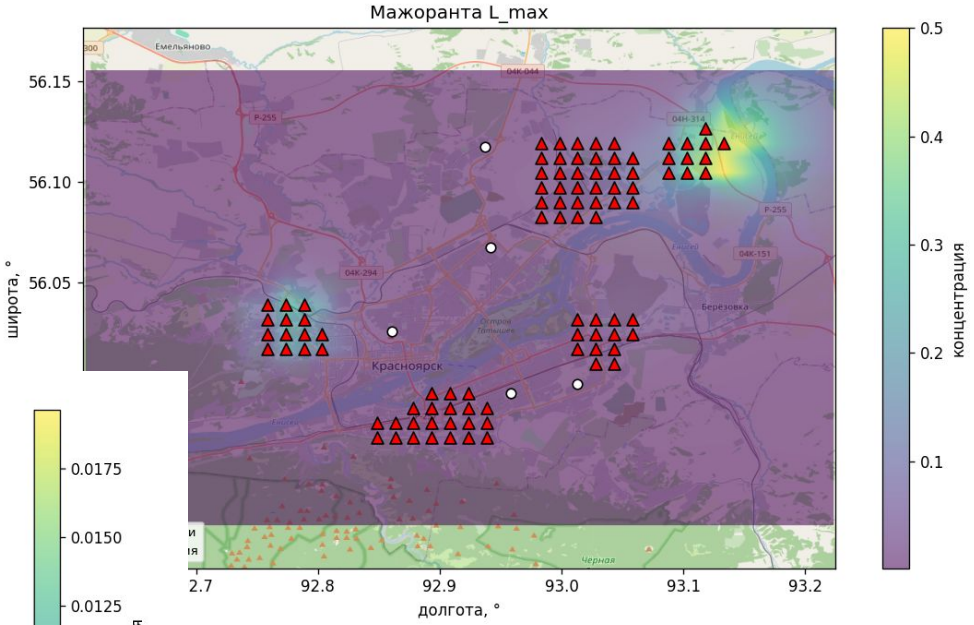
Построение минимаксных полей концентраций, г. Красноярск

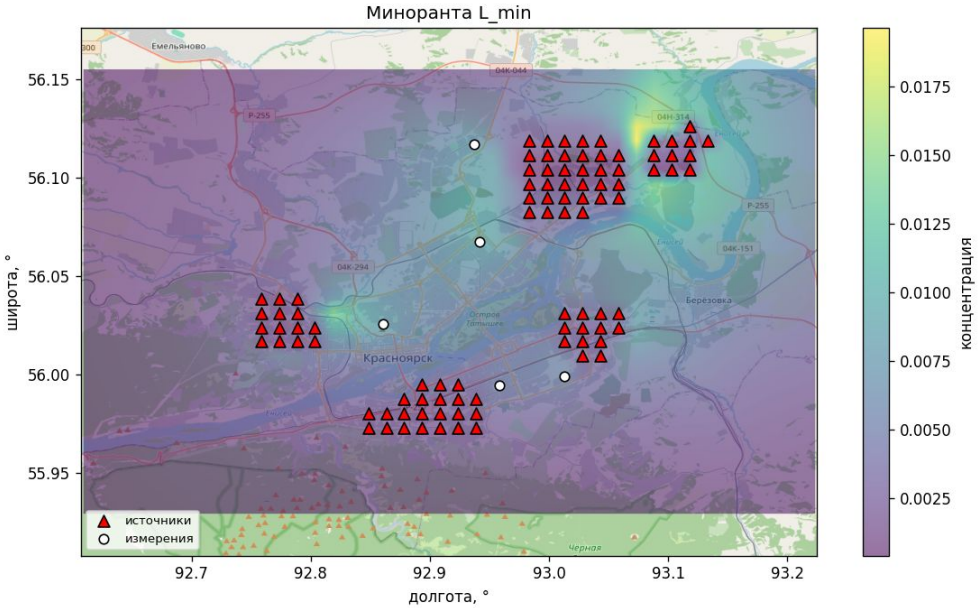




Восстановленные минорантное и мажорантное поля концентраций бензапирена (мг/м3) над территорией г. Красноярск

Построение минимаксных полей концентраций, г. Красноярск





Восстановленные минорантное и мажорантное поля концентраций бензапирена (мг/м3) над территорией г. Красноярск

Технические характеристики

веб-приложения для построения минорантных и мажорантных полей атмосферного загрязнения

- Веб-приложение имеет **клиент-серверную** архитектуру. Серверная часть реализована на языке программирования **Python 3** (Flask), клиентская часть - на **JavaScript**.
- Для решения ЗЛП используется функция **scipy.optimize.linprog** с параметром method='highs' (включает алгоритмы двойственного симплекс-метода и метод внутренней точки).
- Веб-приложение (2) использует интерактивные карты **OpenStreetMap** через библиотеку Leaflet.

Итоги

- Предложены методы для оценки атмосферного загрязнения территорий города:
  1) численная интерполяция поля концентраций примеси с использованием спутниковой информации и данных наземных наблюдений на редкой сети станций;
  2) построение минорантных и мажорантных полей концентраций с использованием данных наземных измерений.
- На базе предложенных методик были проведены исследования загрязнения атмосферного воздуха бензапиреном для нескольких городов Сибири (Иркутск, Кемерово, Красноярск).
- Для обеих методик численного анализа загрязнения атмосферы разработаны программные средства, представляющие собой клиент-серверные приложения.

Литература

1. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavtseva T.V. Organic Carbon in the City Territories of the South of West Siberia // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – № 4. – С. 483–489.
2. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 94–106.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды – М.: Наука, 1982. – 319 с.
4. Рапута В.Ф., Леженин А.А. Анализ данных мониторинга длительного загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы г. Иркутска // Оптика атмосферы и океана. – 2024. – Т. 37, № 06. – С. 512–518.