

Методы анализа данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова



*Рапута В.Ф.,
ИВМиМГ СО РАН*

Целью исследований является:

- выявление количественных закономерностей загрязнения снежного покрова в окрестностях точечных и площадных источников, на городских территориях;
- получение и обоснование замкнутых постановок задач оценивания полей концентраций примесей на основе имеющихся данных наземных и спутниковых наблюдений;
- последующая апробация моделей оценивания на данных измерений загрязнения атмосферного воздуха, снегового покрова на территориях городов юга Западной Сибири, в окрестностях промышленных предприятий

Содержание доклада

1. Анализ данных наземного и спутникового мониторинга снежного покрова в окрестностях промпредприятий
2. Оценка суммарных атмосферных выбросов предприятий
3. Исследование процессов регионального загрязнения
4. Сопряжённые исследования на постах Росгидромета загрязнения атмосферы и снежного покрова городов юга Западной Сибири
5. Модели оценивания полей концентраций на территории города
6. Исследование функциональных связей между наземными и спутниковыми наблюдениями загрязнения снежного покрова

1. Анализ данных наземного и спутникового снежного покрова в окрестностях промпредприятий

Экспериментальные исследования

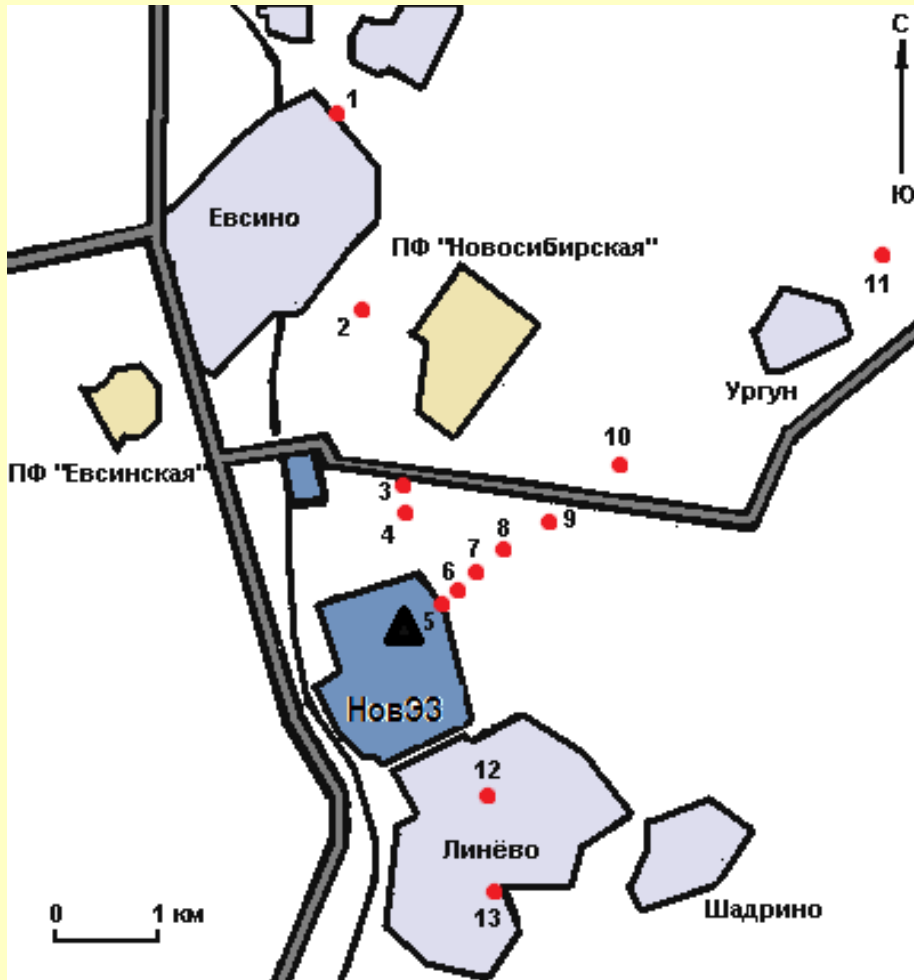
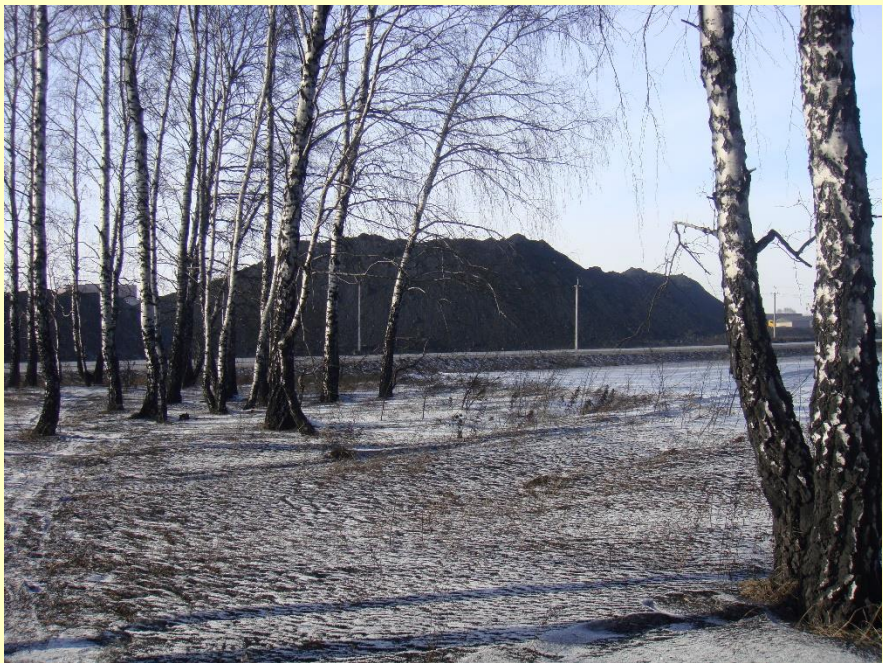


Рис. 1. Схема отбора снеговых проб в районе **НЭЗ**.

▲ - основной источник выброса бенз(а)пирена



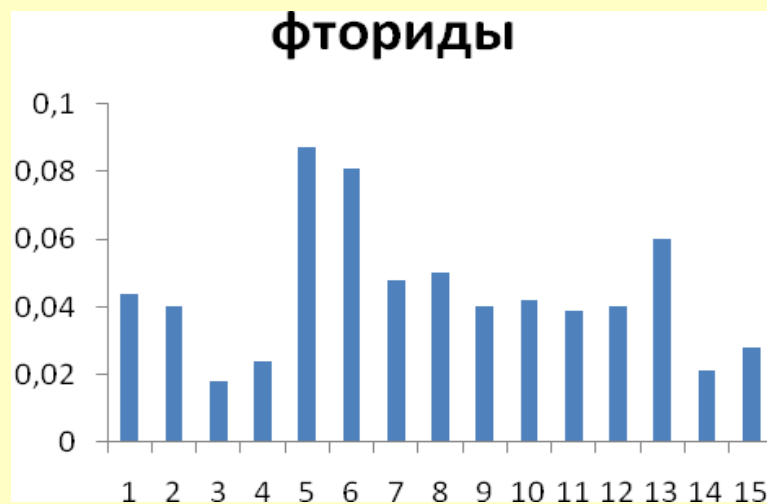


Рис. 2. Концентрация осадка (г/л) и компонентов ионного состава (мг/л) в точках отбора проб снега

Модели реконструкции полей аэрозольных выпадений

$$u \frac{\partial q}{\partial r} - w \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$q|_{r=0} = \psi(z) \equiv Q \delta(z - H) \quad (2)$$

$$q(r, z) = \psi\left(z + \frac{w}{u} r\right) \quad (3)$$

$$N(w) = \frac{n^{n+1}}{w_k \Gamma(n+1)} \left[\frac{w}{w_k} \exp\left(-\frac{w}{w_k}\right) \right]^n \quad (4)$$

w_m - скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси,

n - степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w

$\Gamma(n)$ - гамма-функция Эйлера

$$\begin{aligned}\sigma(r, \vec{\theta}) &= \int_0^{\infty} w q|_{z=0} N(w) dw = \int_0^{\infty} w \frac{u}{r} \delta(w - \frac{Hu}{r}) N(w) dw = \\ &= \frac{H u^2}{r^2} N(\frac{H u}{r}) = \theta_1 r^{-\theta_2} \exp(-\frac{\theta_3}{r})\end{aligned}\quad (5)$$

$$\theta_1 = \frac{u}{\Gamma(n+1)} \left(\frac{n H u}{w_k} \right)^{n+1}, \quad \theta_2 = n + 2, \quad \theta_3 = \frac{n H u}{w_k} \quad (6)$$

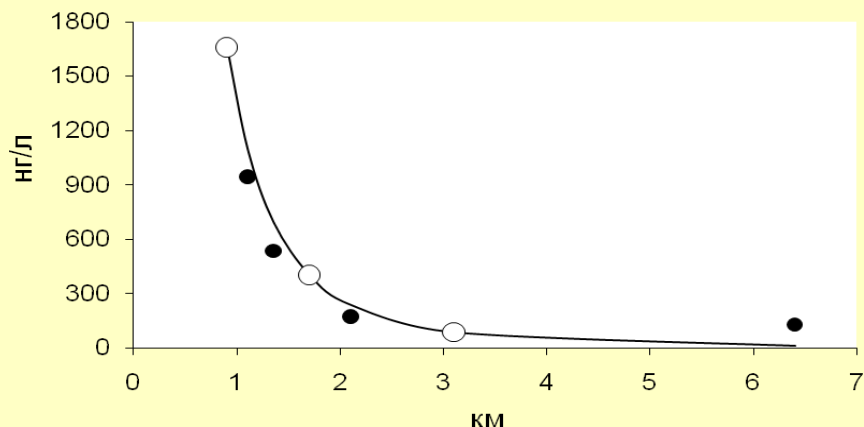
$$\Pi(r, \varphi, \vec{\theta}) = \sigma(r, \vec{\theta}) P(\varphi + 180^\circ) \quad (7)$$

Π - поле концентрации примеси,

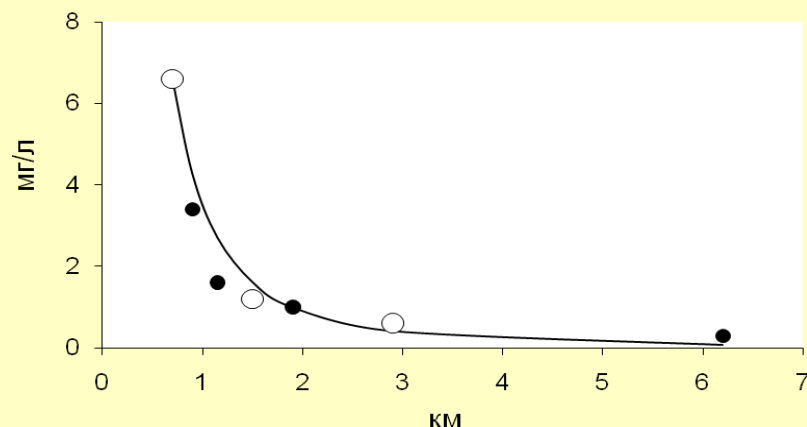
σ - концентрация примеси в радиальном направлении,

P - роза ветров.

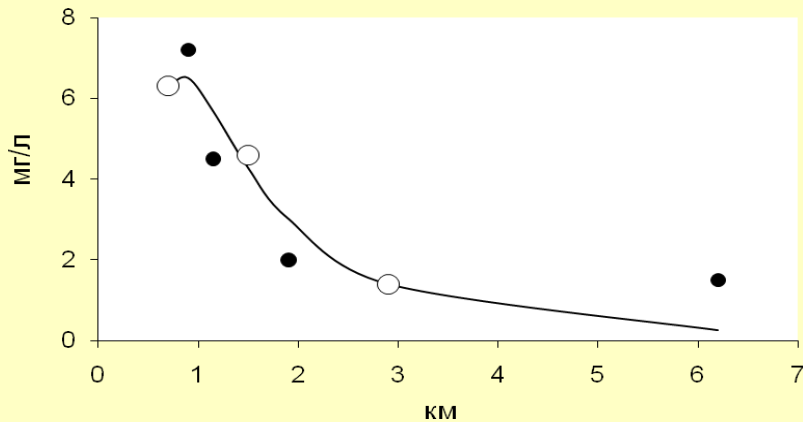
НовЭЗ С-В (бензапирен)



НовЭЗ С-В (сульфаты, фон=1,1 мг/л)



НовЭЗ С-В (нитраты)



НовЭЗ С-В (осадок)

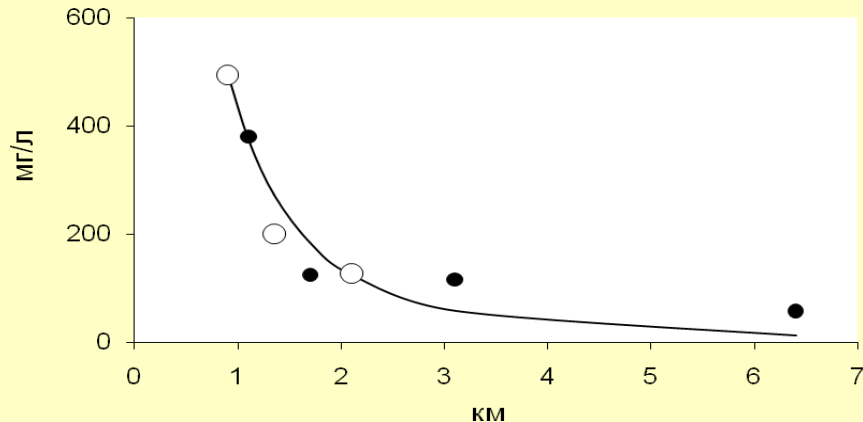


Рис. 3. Численно восстановленные концентрации бенз(а)пирена, сульфатов, нитратов, пыли в снеге в северо-восточном направлении.
○ - опорные точки, ● - контрольные точки наблюдений (2010 г.)

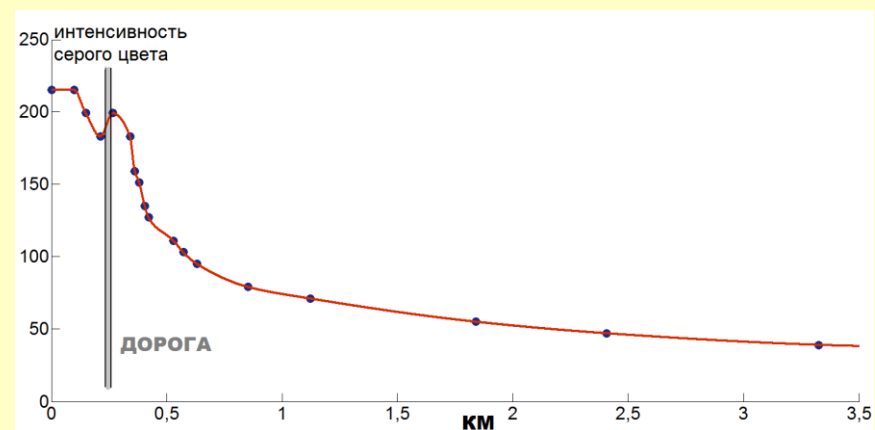
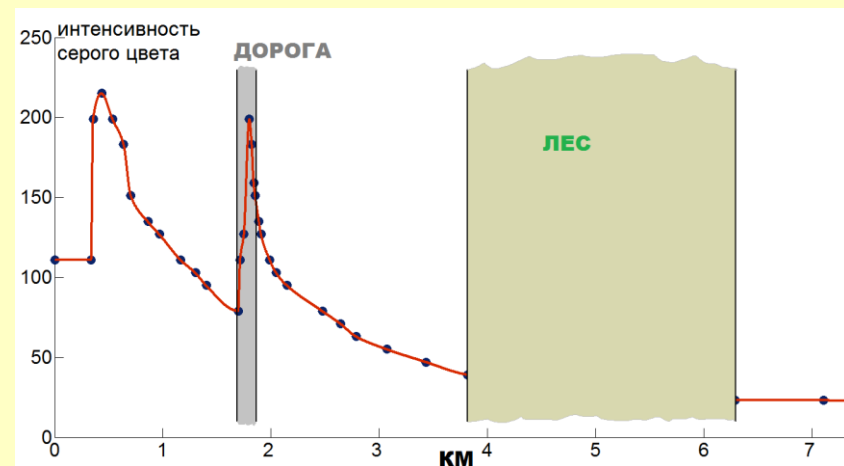
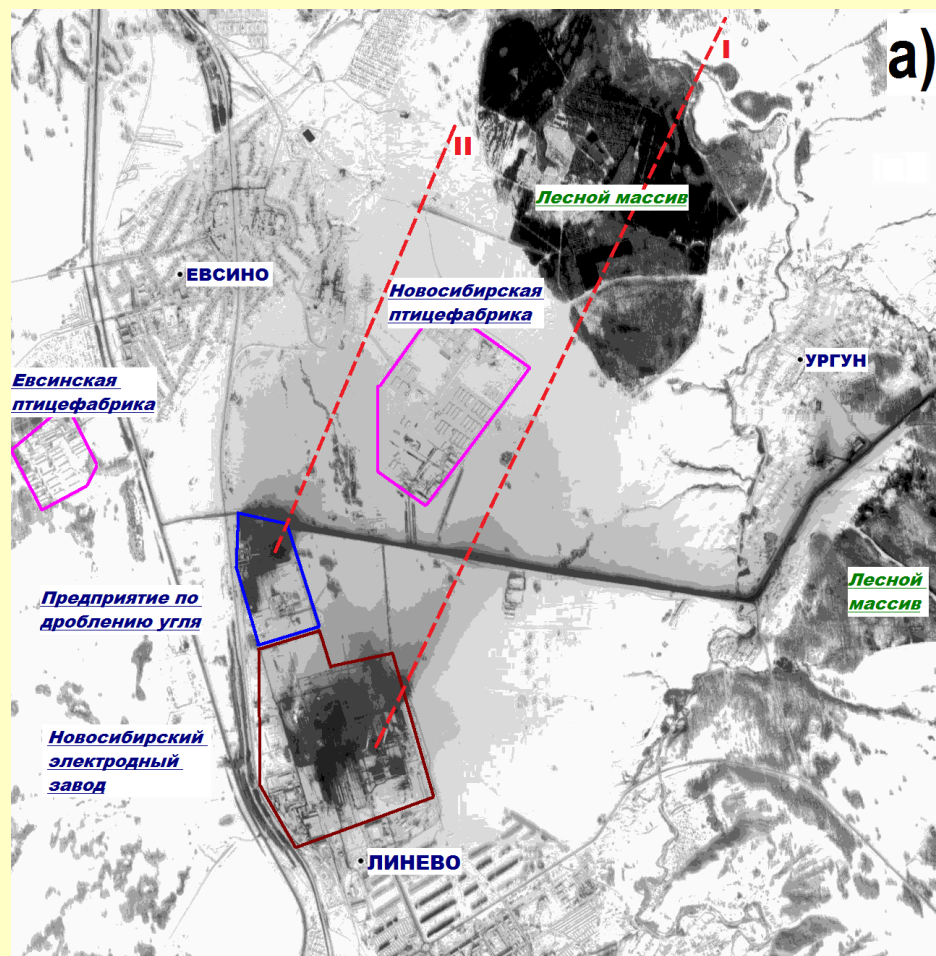


Рис. 4. Поля выпадений пыли (а), оцифрованные в тонах серого цвета по спутниковому снимку от 2 марта 2011 г. (**сайт digitalglobe.com**)
 - сечения полей по направлениям I и II

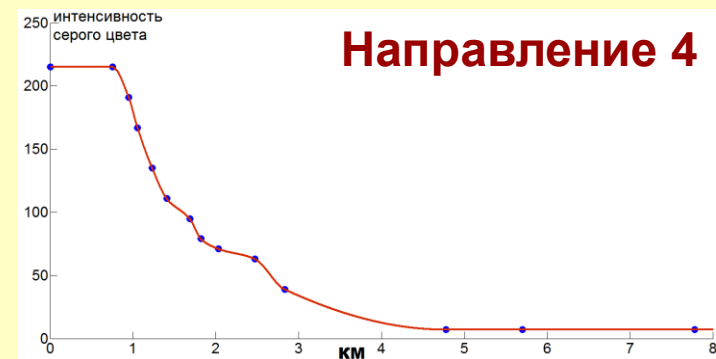
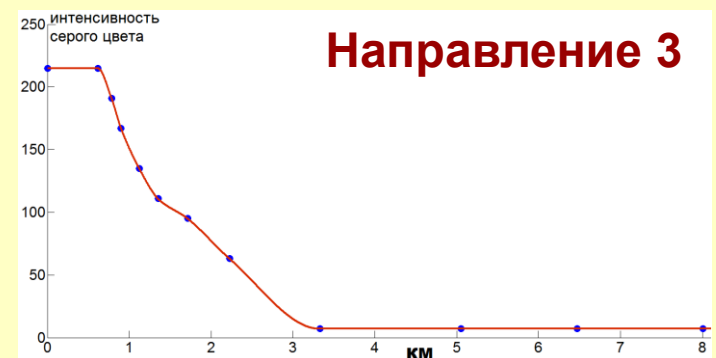
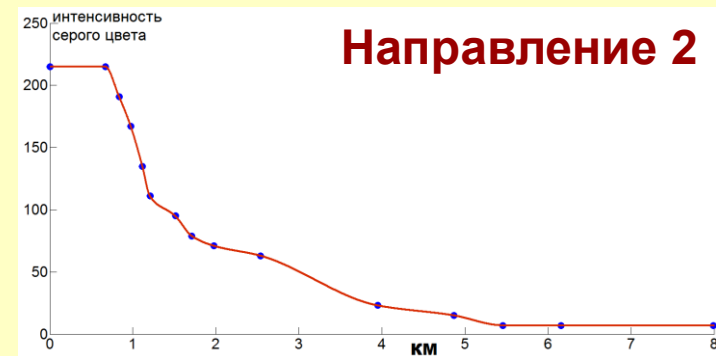
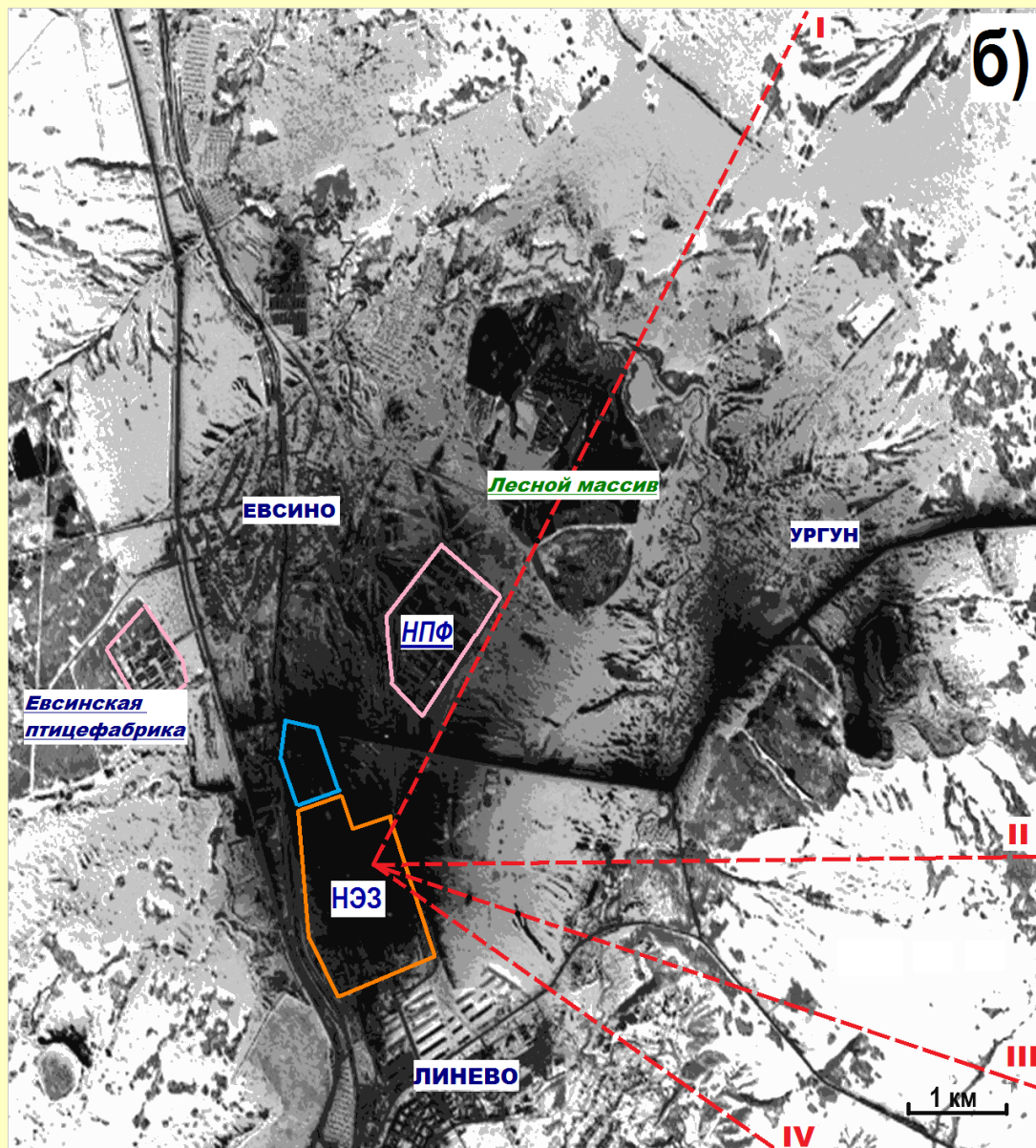


Рис. 5. Поле выпадений пыли (б), оцифрованное в тонах серого цвета по спутниковому снимку от 31 марта 2009 г.

Анализ функциональных связей

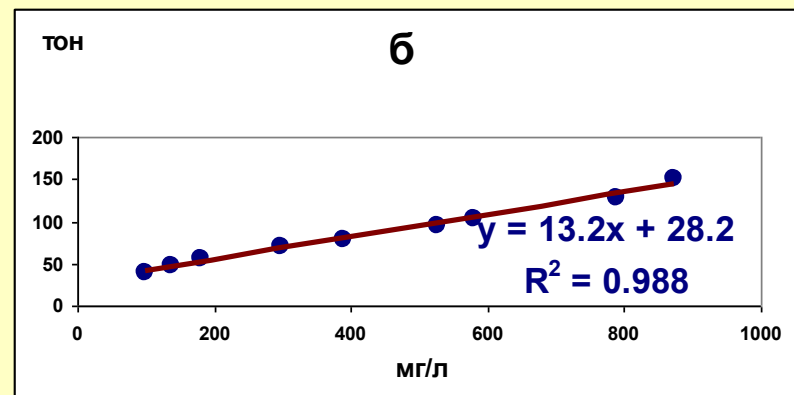
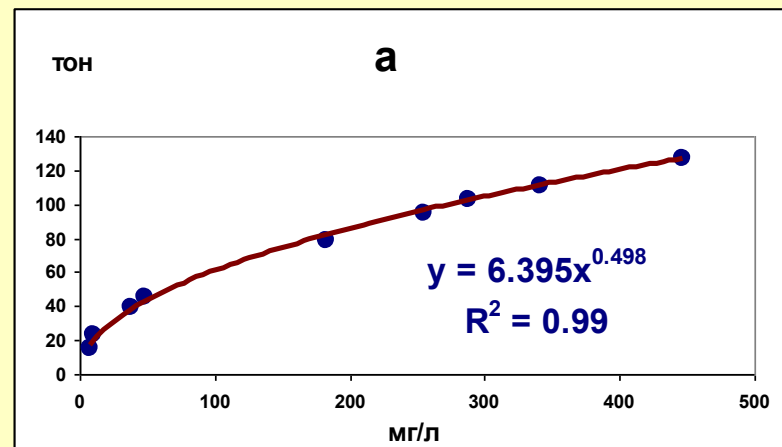
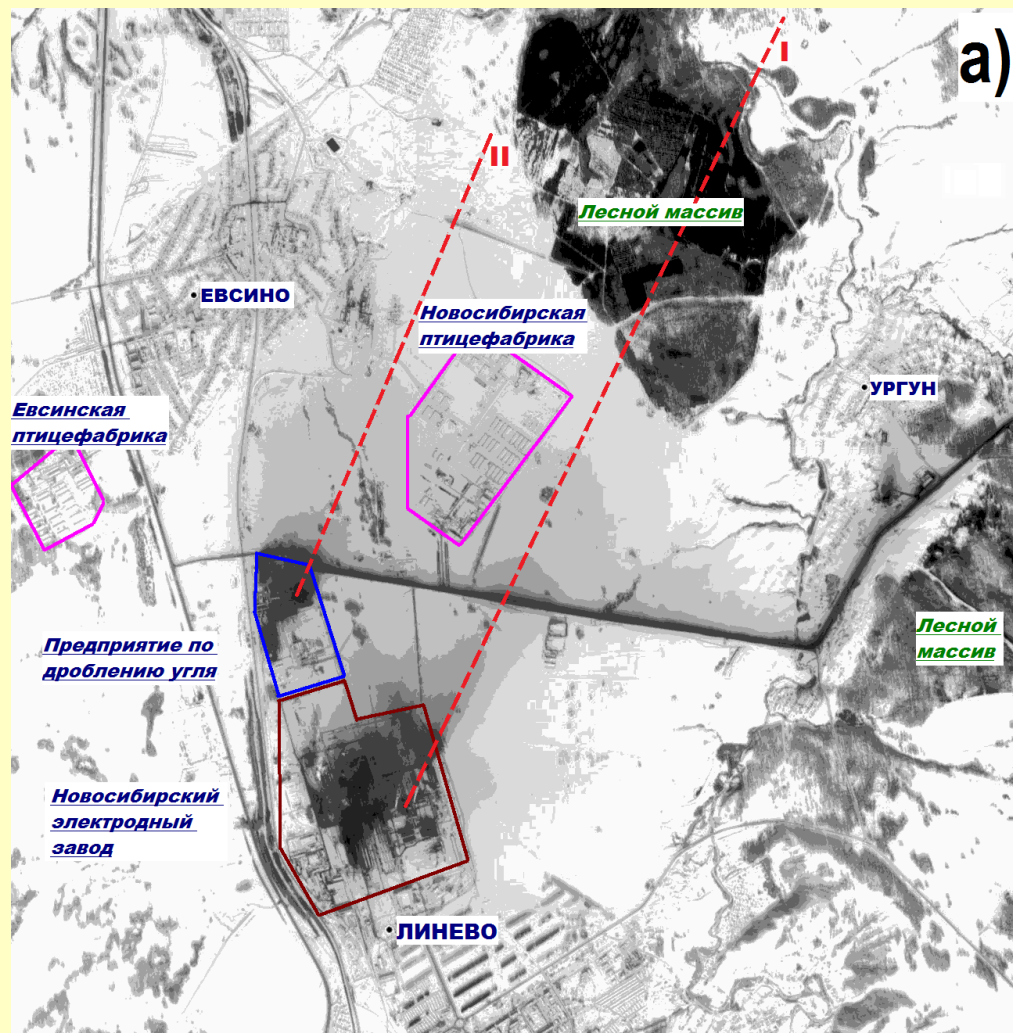


Рис. 7. Функциональная связь в направлениях I и II между изменениями тонов серого цвета и полями выпадения пыли от высотных труб НЭЗ (а) и от площадного источника – предприятия по дроблению угля (б)

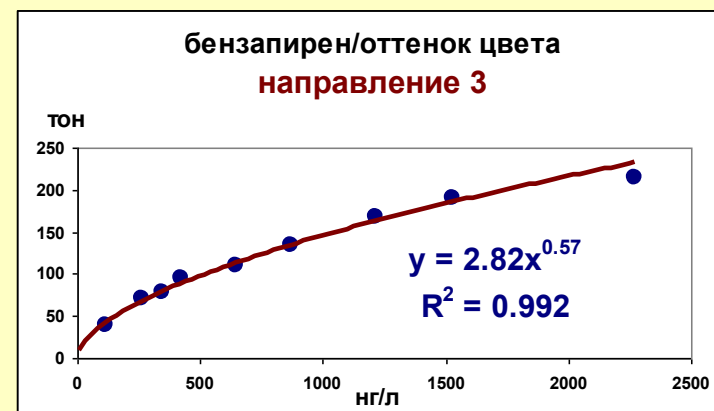
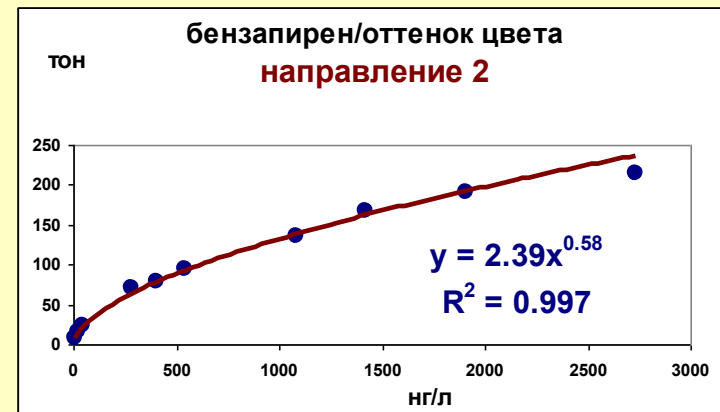
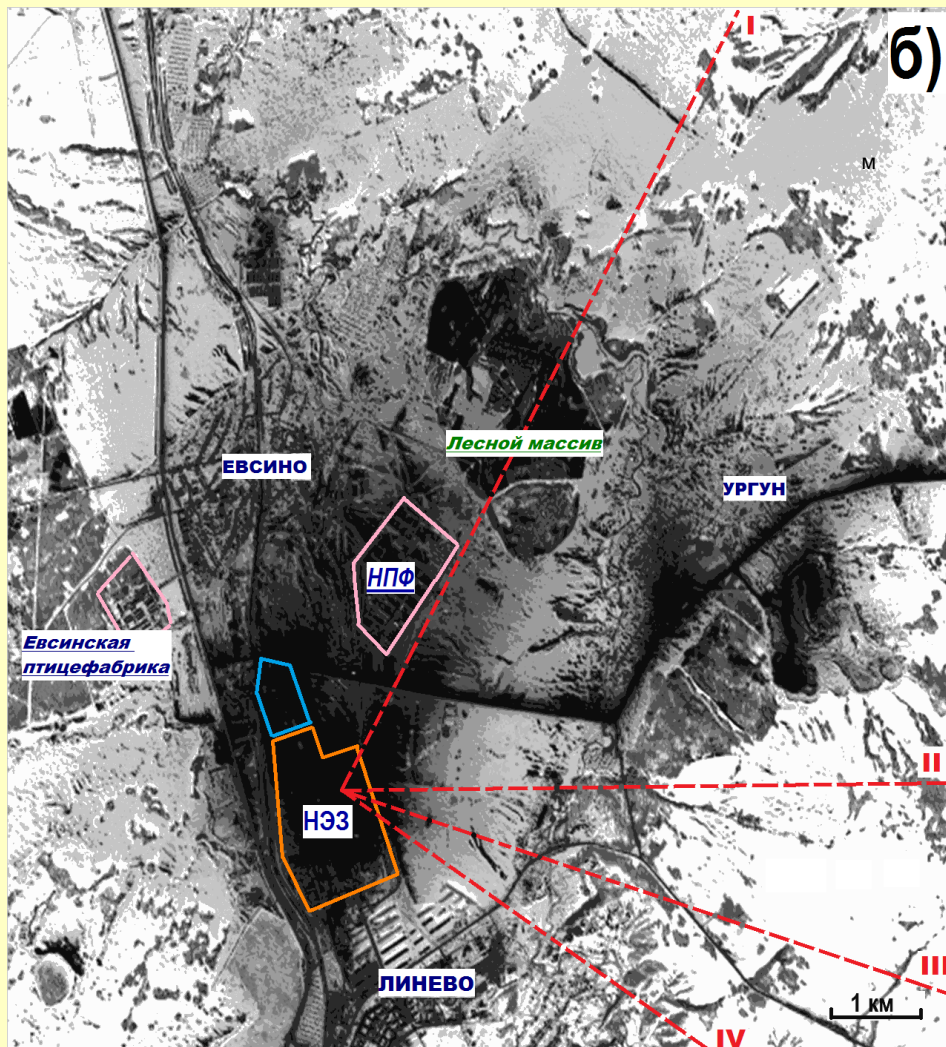


Рис. 8. Функциональная связь между интенсивностью изменения тонов серого цвета и полями выпадения БП от НЭЗ в направлениях **II – IV**

2. Оценка суммарных атмосферных выбросов предприятий

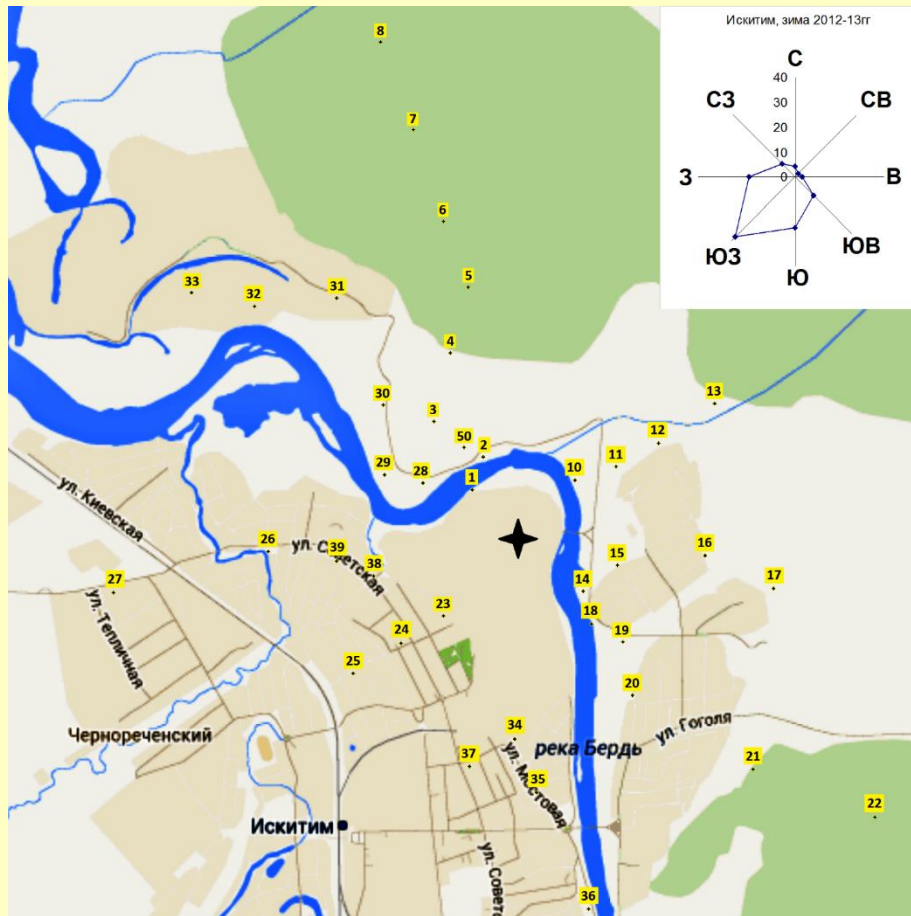


Рис. 9. Схема отбора проб снега.



основной источник выброса пыли.

Роза ветров (%) в зимнем сезоне 2012/13 гг.,
измеренная на метеостанции г. Искитим

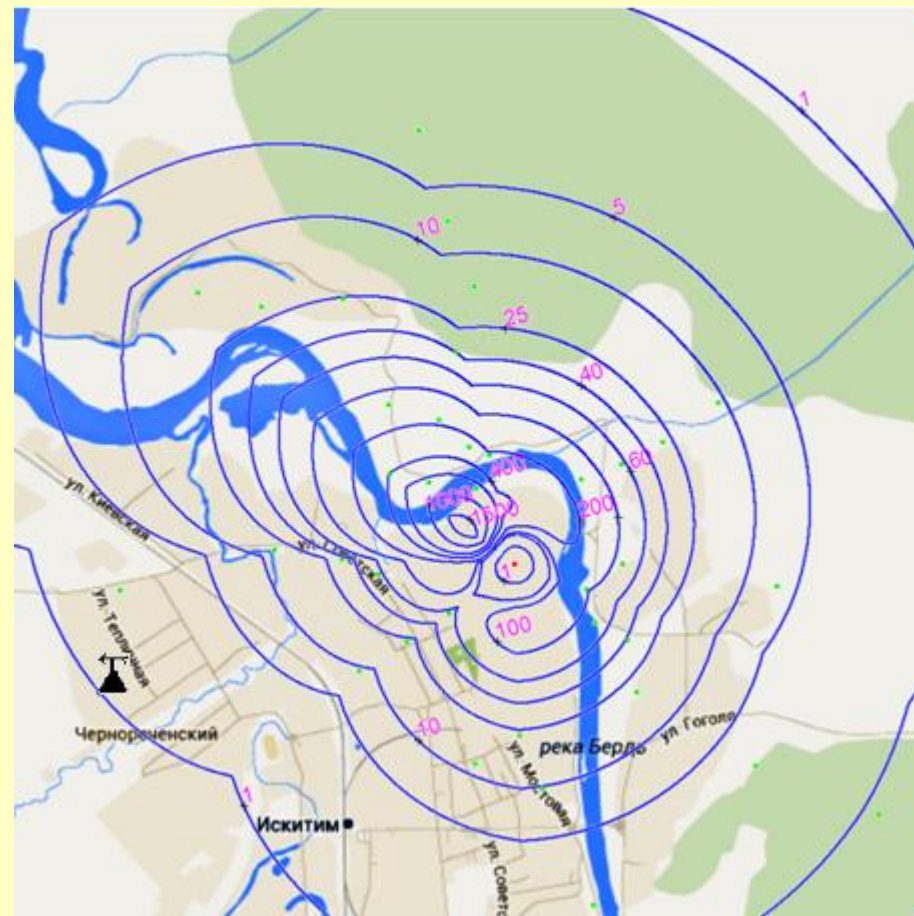


Рис. 10. Восстановленные поля плотности выпадений пыли (г/м^2) по данным маршрутной снегосъёмки (б)

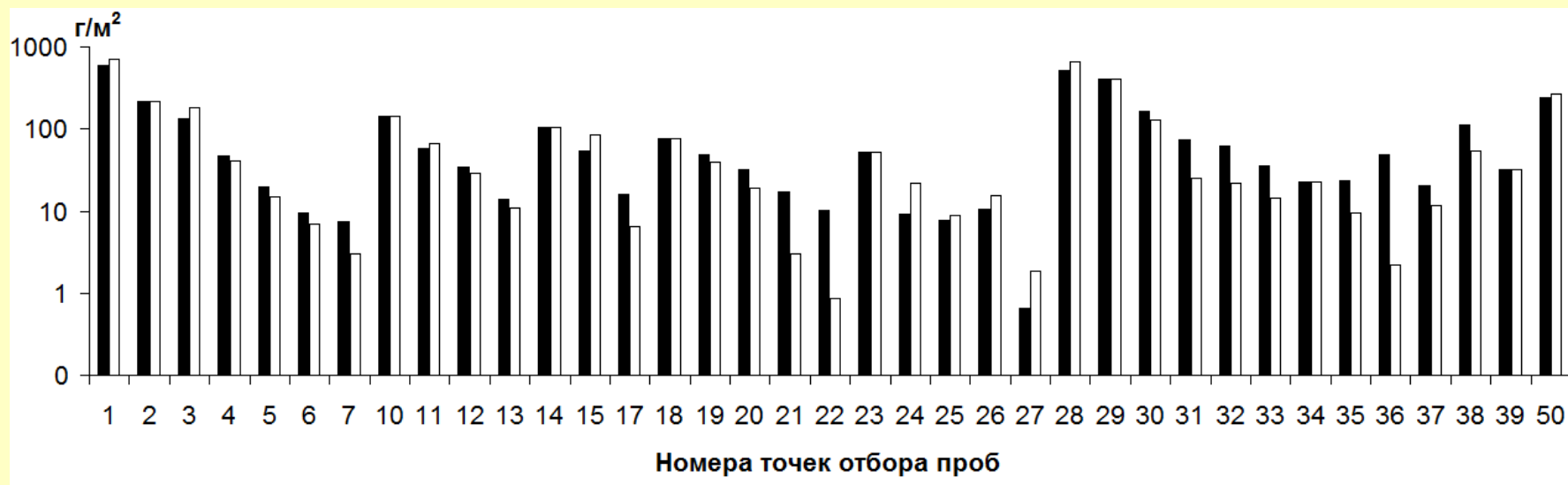


Рис. 11. Измеренные (■) и восстановленные (□) на основе модели реконструкции выпадения неорганической пыли (г/м²) в точках отбора проб снега

Суммарное содержание неорганической пыли в снеге на территории **в радиусе 1 км** от основных источников выброса ОАО «Искитимцемент» составило **626 тонн**. И соответственно **в радиусе 2 км – 875 тонн**, **в радиусе 3 км – 942 тонны**, **в радиусе 4 км – 969 тонн**. Полученные оценки суммарных выпадений существенно расходятся с данными инвентаризации валовых выбросов пыли цементным заводом, проведённой в 2012 г. Согласно этим данным валовый выброс пыли должен был составить в зимнем сезоне 2012/13 гг. **порядка 100 тонн**

3. Оценивание регионального загрязнения

Точечный источник

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u(z) q) = \frac{\mu}{r^2} \frac{\partial^2 q}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial}{\partial z} v(z) \frac{\partial q}{\partial z} \quad (8)$$

$$v(z) \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad z = 0 \quad z = h \quad (9)$$

$$u(z) q \Big|_{r=0} = M \delta(\varphi) \delta(z - H)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \int_0^h u(z) q(r, z) dz \right) = 0 \quad q(r, z_{cp}) = \frac{C}{r \cdot U} \quad (10)$$

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{\lambda \cdot M g(\varphi)}{2\pi r} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' \cdot h'} d\Omega = \frac{\theta' \cdot g(\varphi)}{r}$$

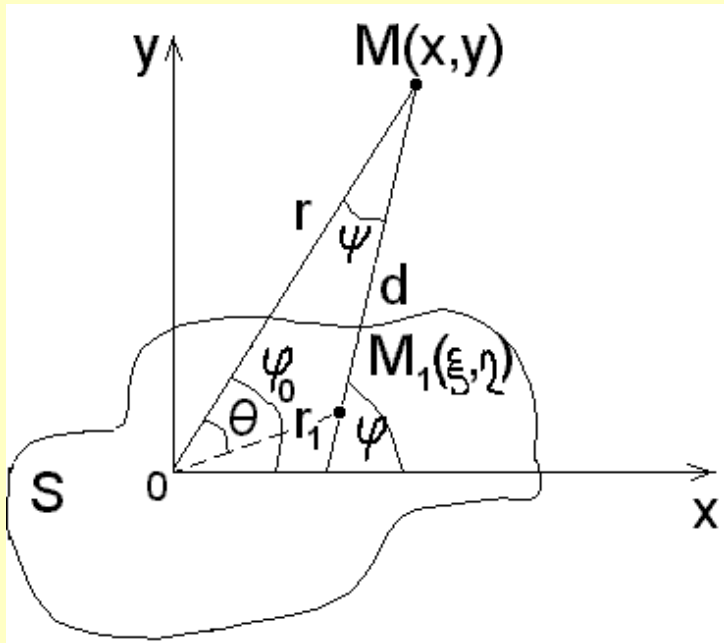
$$\theta' = \frac{\lambda \cdot M}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{B(u', h')}{u' \cdot h'} d\Omega \quad (11)$$

Площадной источник

$$Q(x, y) = \frac{1}{2\pi uH} \iint_S \frac{m(\xi, \eta) \zeta(\varphi)}{d} d\xi d\eta, \quad (12)$$

$$\zeta(\varphi) = P(\varphi + 180^\circ), \quad \varphi(\xi, \eta, x, y) = \arctg\left(\frac{y - \eta}{x - \xi}\right), \quad d = |M_1 M| = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$$

$$d = \sqrt{r^2 + r_1^2 - 2rr_1\alpha} \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{r\sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha\mu}} \quad (13)$$



$$r = |\overrightarrow{OM}|, \quad r_1 = |OM_1|, \quad \alpha = \frac{r_1}{r}, \quad \mu = \cos \theta$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n P_n(\mu) \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 Q(x, y) &= \frac{c}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \iint_S \alpha^n P_n(\mu) m(\xi, \eta) \zeta(\xi, \eta, x, y) d\xi d\eta = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = \\
 &= \frac{c}{r} \iint_S m \zeta d\xi d\eta + \frac{c}{r^2} \iint_S m \zeta r_1 P_1(\mu) d\xi d\eta + \frac{c}{r^3} \iint_S m \zeta r_1^2 P_2(\mu) d\xi d\eta + \dots
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$c = \frac{1}{2\pi uH}$$

$$\begin{aligned}
 Q_1(x, y) &\approx \frac{c}{r} \iint_S m(\xi, \eta) \left\{ \zeta(\varphi_0) + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \zeta'(\varphi_0) - \zeta'(\varphi_0) \left(\frac{x}{r^2} \xi + \frac{y}{r^2} \eta \right) \right\} d\xi d\eta = \\
 &= \theta_1 \frac{\zeta(\varphi_0) + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \zeta'(\varphi_0)}{r} + \theta_2 \frac{\zeta'(\varphi_0) x}{r^3} + \theta_3 \frac{\zeta'(\varphi_0) y}{r^3}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Замечание 1. $\frac{y}{x} = \text{const} \qquad \zeta'(\varphi) = 0$

Замечание 2. Есть предпосылки получить аналогичные приближения и для самих территорий площадных источников

Региональное загрязнение ПАУ окрестностей Новосибирска

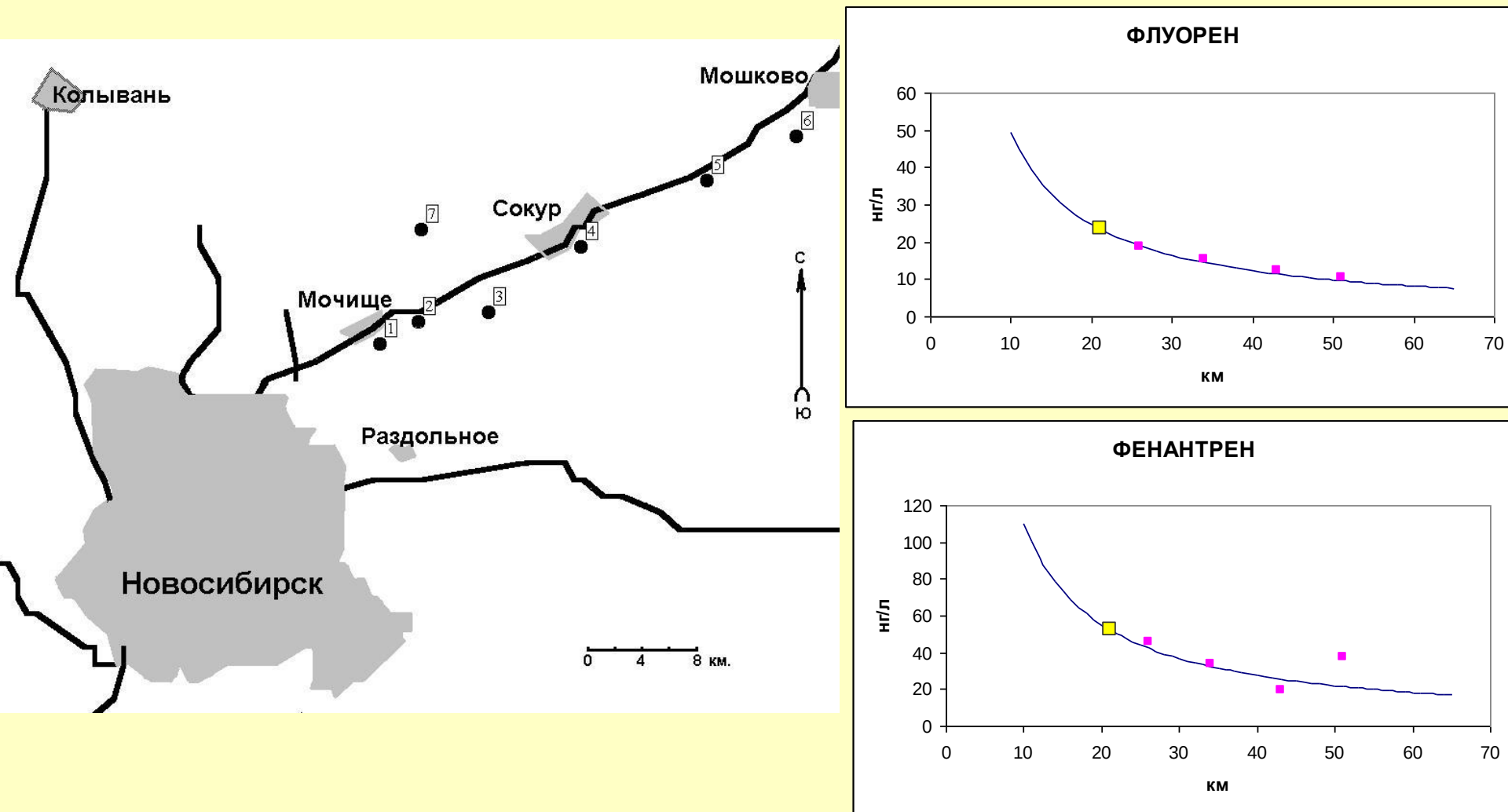


Рис. 12. Схема отбора снеговых проб. Восстановленная концентрация флуорена, фенантрена в направлении на северо-восток

Анализ функциональных связей регионального загрязнения

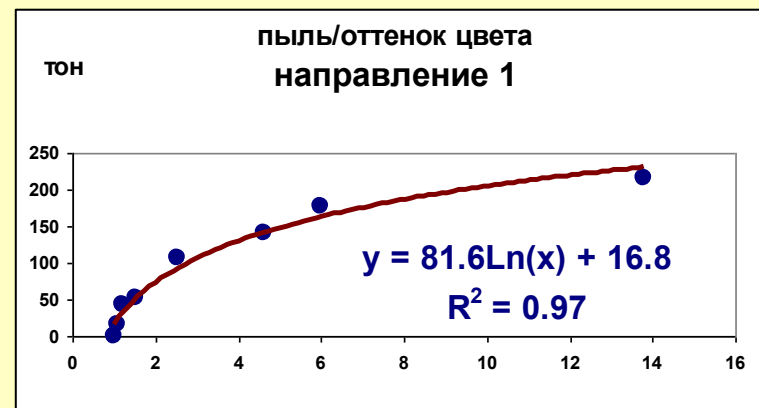
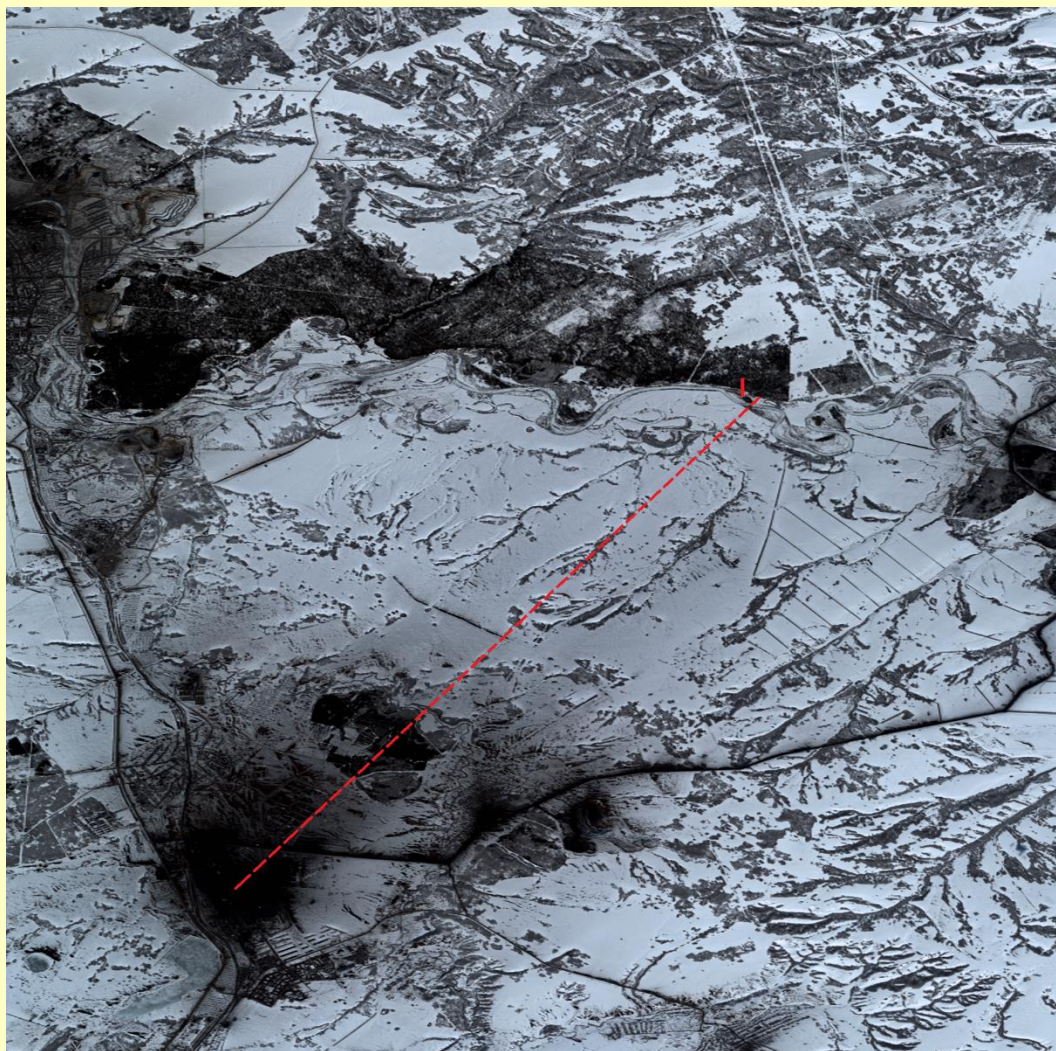


Рис. 13. Функциональная связь между интенсивностью изменения тонов серого цвета (снимок 31.03.2009г.) и полем региональных выпадений пыли от высотных труб обжигового цеха **НЭЗ** в направлении **I**

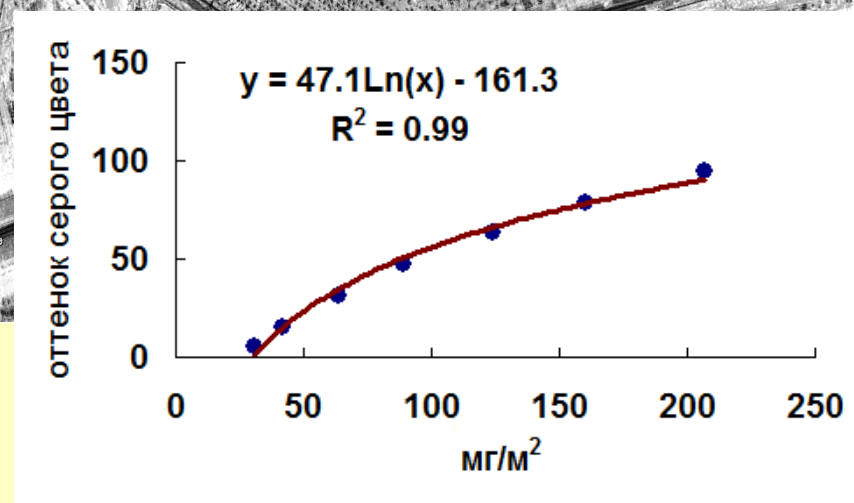
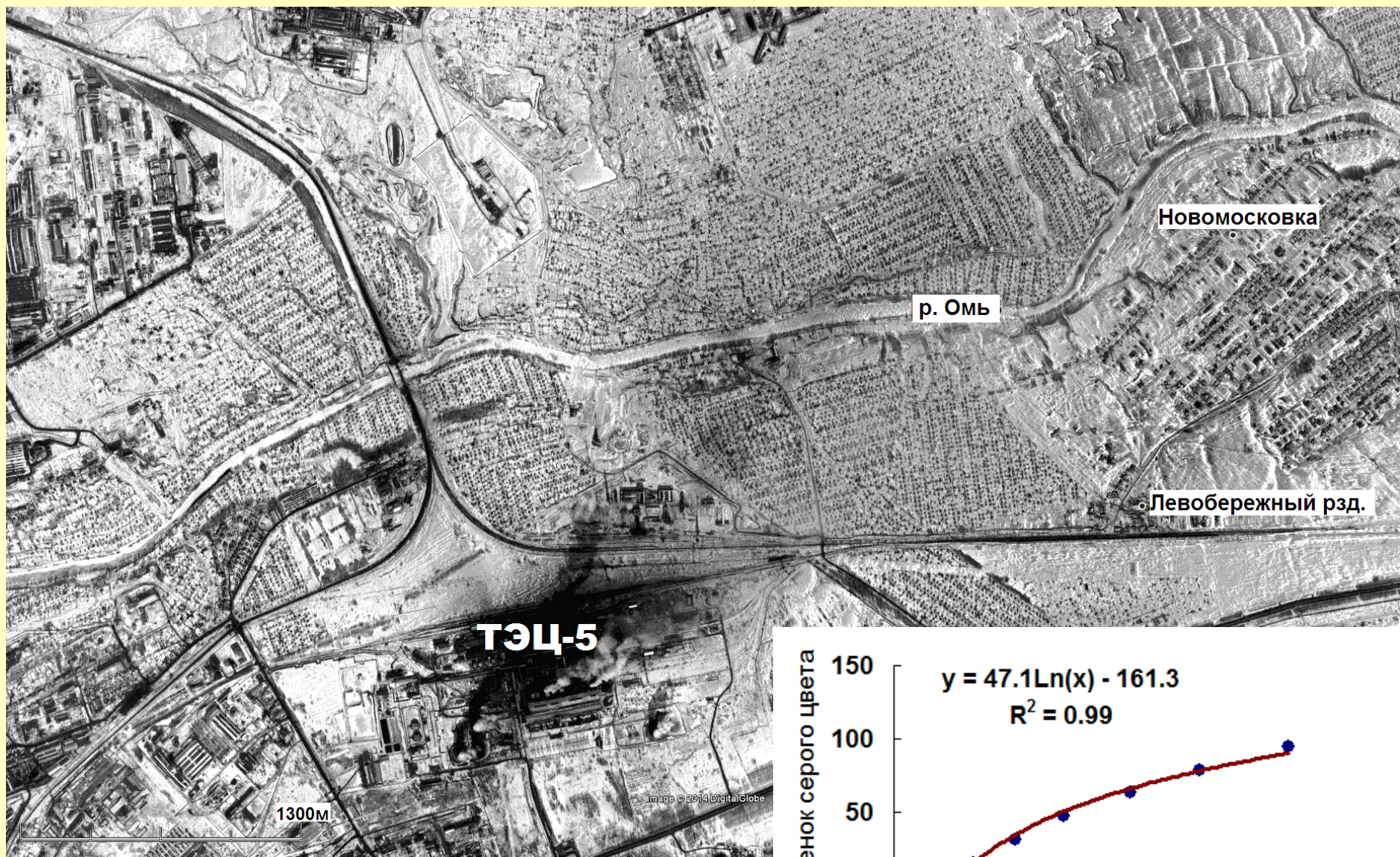
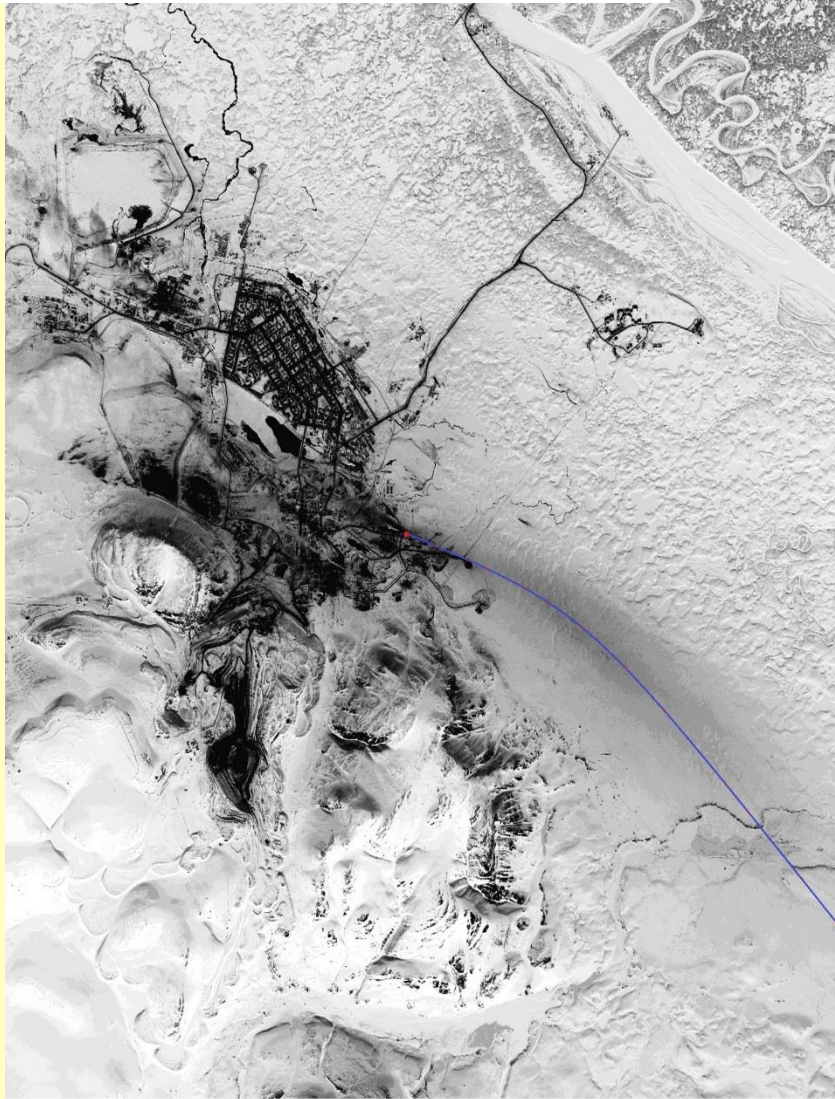
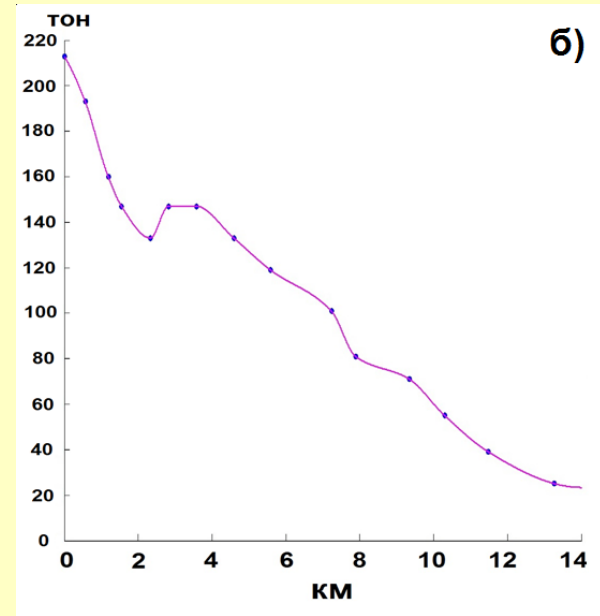


Рис. 14. Спутниковый снимок от 25 марта 2010 г. окрестностей ТЭЦ-5 г. Омска. **Функциональная связь:**
 $Y=47 \cdot \lg(x)-161$

Норильск (4.05.2004)



а)



Тон серого цвета

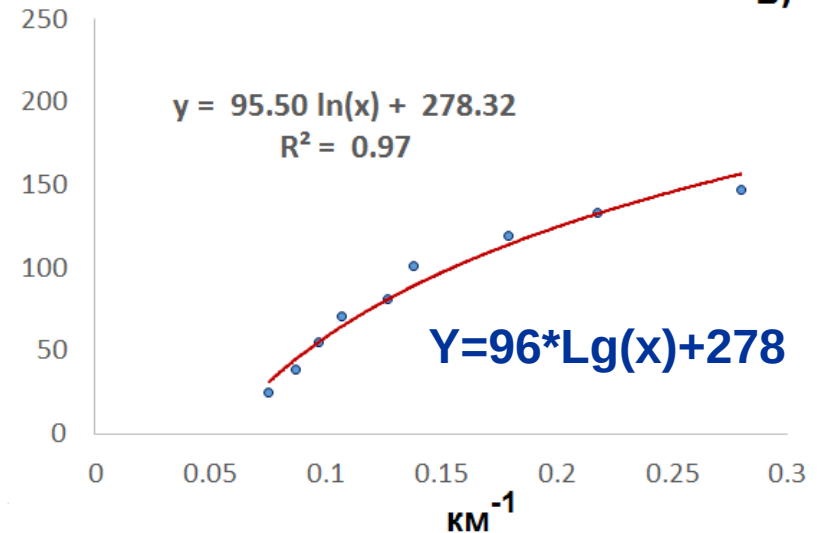


Рис. 15. Спутниковый снимок Норильска (а). Изменения тонов серого цвета снежного покрова в юго-восточном направлении выноса пыли от асфальто-бетонного завода (б). Функциональная связь (в)

4. Сопряжённые исследования загрязнения атмосферы и снежного покрова городов юга Западной Сибири

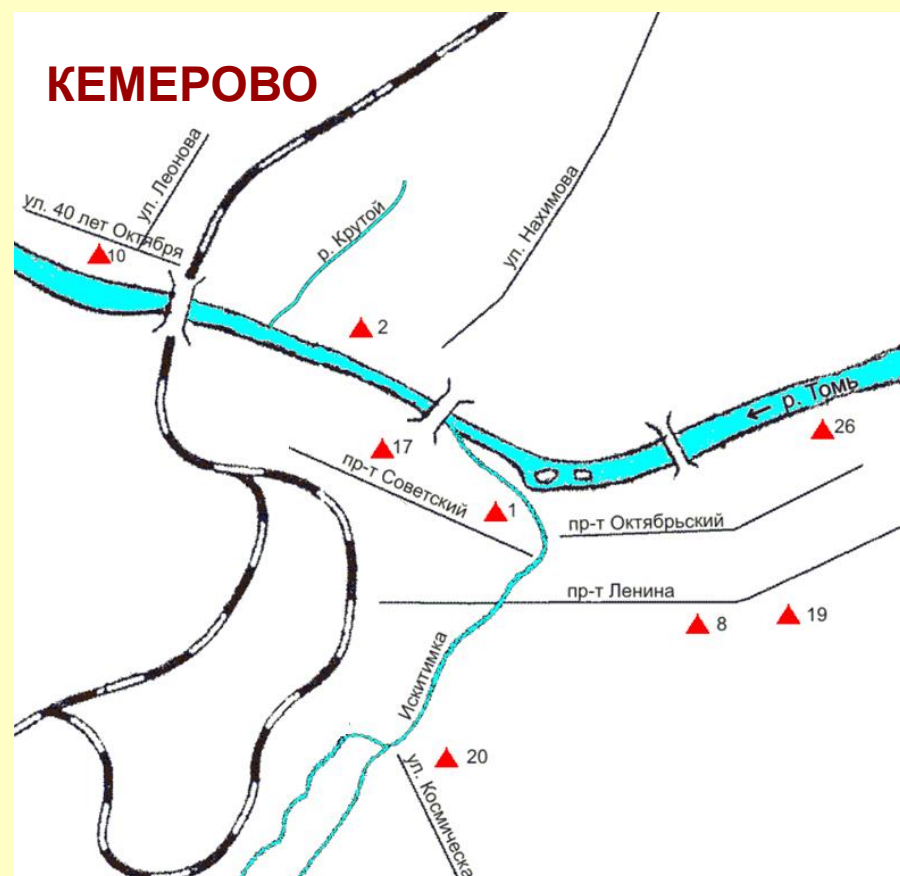


Рис. 16. Схемы размещения ПНЗ на территории гг. Новосибирска и Кемерово



Пост 24



Пост 18



Пост 54



Пост 21

Таблица 1.

Компоненты для сравнения уровней загрязнения

Компоненты,

в воздухе

Сажа, бенз(а)пирен

SO₂

NO₂, формальдегид

NO

Взвешенные

вещества

Компоненты,

в снеге

Бенз(а)пирен, ПАУ

Сульфат-ион

Нитрат-ион

Нитрит-ион

Осадок

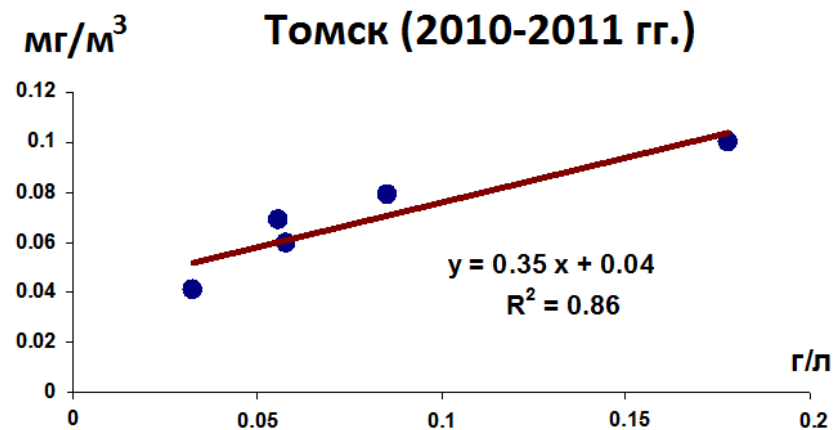
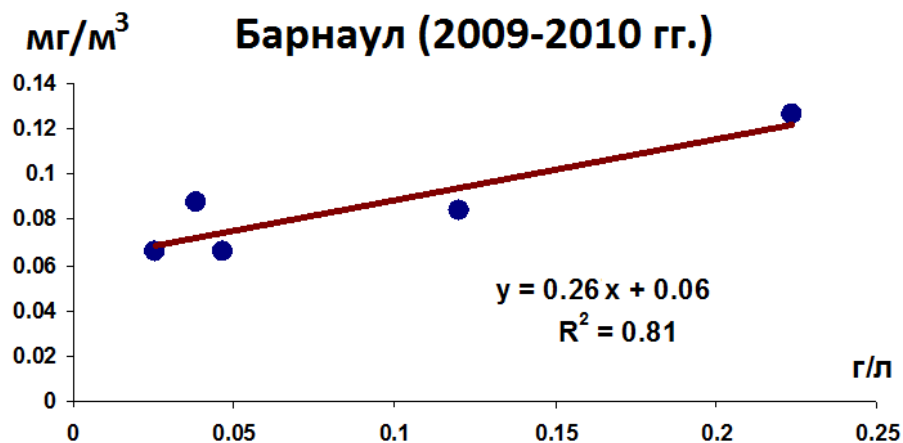
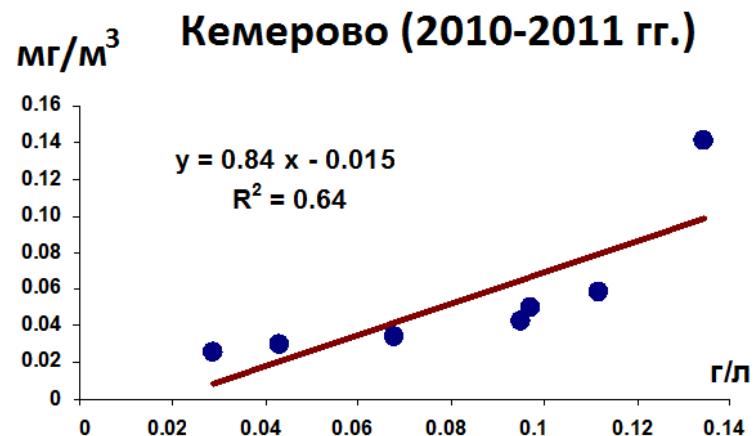
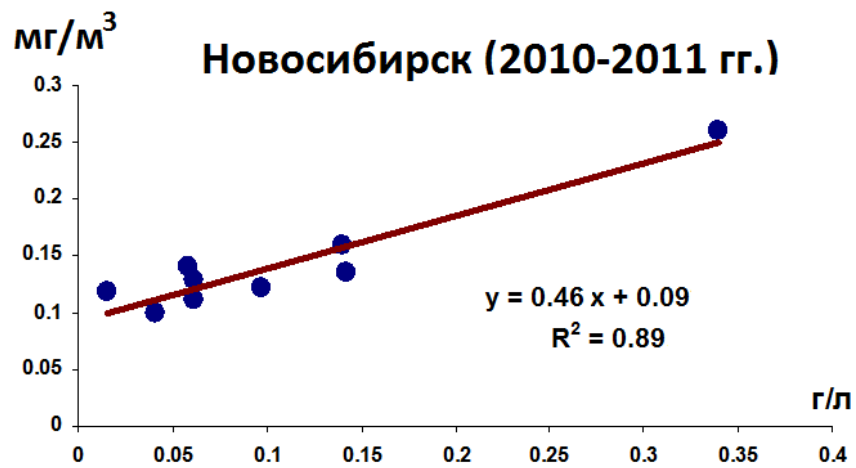


Рис. 17. Линейно-корреляционные зависимости между **твёрдым осадком** (г/л) в пробах снега и **взвешенными веществами** в атмосфере (мг/м^3)

4. Модели оценивания полей концентраций на территориях города

$$q(x, y) = \frac{\theta P(\gamma + 180^\circ)}{r^2 e^{\frac{2r_{max}}{r}}} \quad (17)$$

$$\gamma = \arctg \frac{y}{x} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$Q(x, y) = \theta \cdot \iint_S \frac{m(\mu, \sigma) P(\varphi + 180^\circ)}{d^2 e^{\frac{2r_{max}}{d}}} d\mu d\sigma \quad (18)$$

$$|M_1 M| = \sqrt{(x - \mu)^2 + (y - \sigma)^2} \quad M(x, y) \in S \quad M_1(\mu, \sigma) \in S$$

$$\varphi(\mu, \sigma, x, y) = \arctg \left\{ \frac{y - \sigma}{x - \mu} \right\}$$

$m(\mu, \sigma)$ - функция, описывающая эмиссию примеси в области S

$$Q(x, y) = Q_1(x, y) + Q_2(x, y) \quad (19)$$

$$Q_1(x, y) = \theta \cdot \iint_{s-O(\varepsilon)} \frac{m(\mu, \sigma)P(\varphi + 180^\circ)}{d^2 e^{\frac{2r_{max}}{d}}} d\mu d\sigma \quad (20)$$

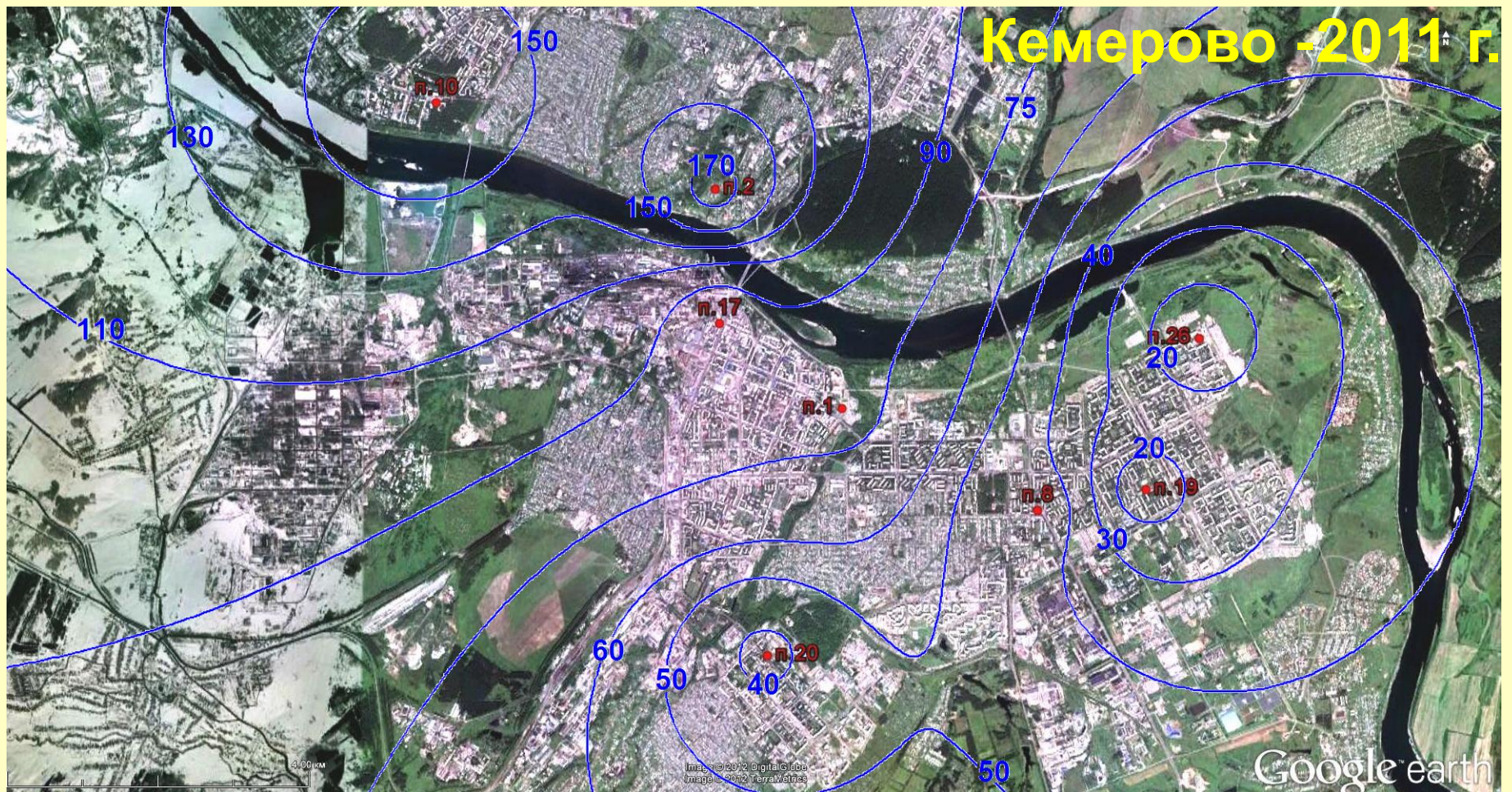
$$Q_2(x, y) = \theta \cdot \iint_{O(\varepsilon)} \frac{m(\mu, \sigma)P(\varphi + 180^\circ)}{d^2 e^{\frac{2r_{max}}{d}}} d\mu d\sigma$$

$O(\varepsilon)$ - круг радиуса ε с центром в точке (x, y)

$$d^2 e^{\frac{2r_{max}}{d}} \geq d^2 + 2d \cdot r_{max} + 2r_{max}^2 \quad (21)$$

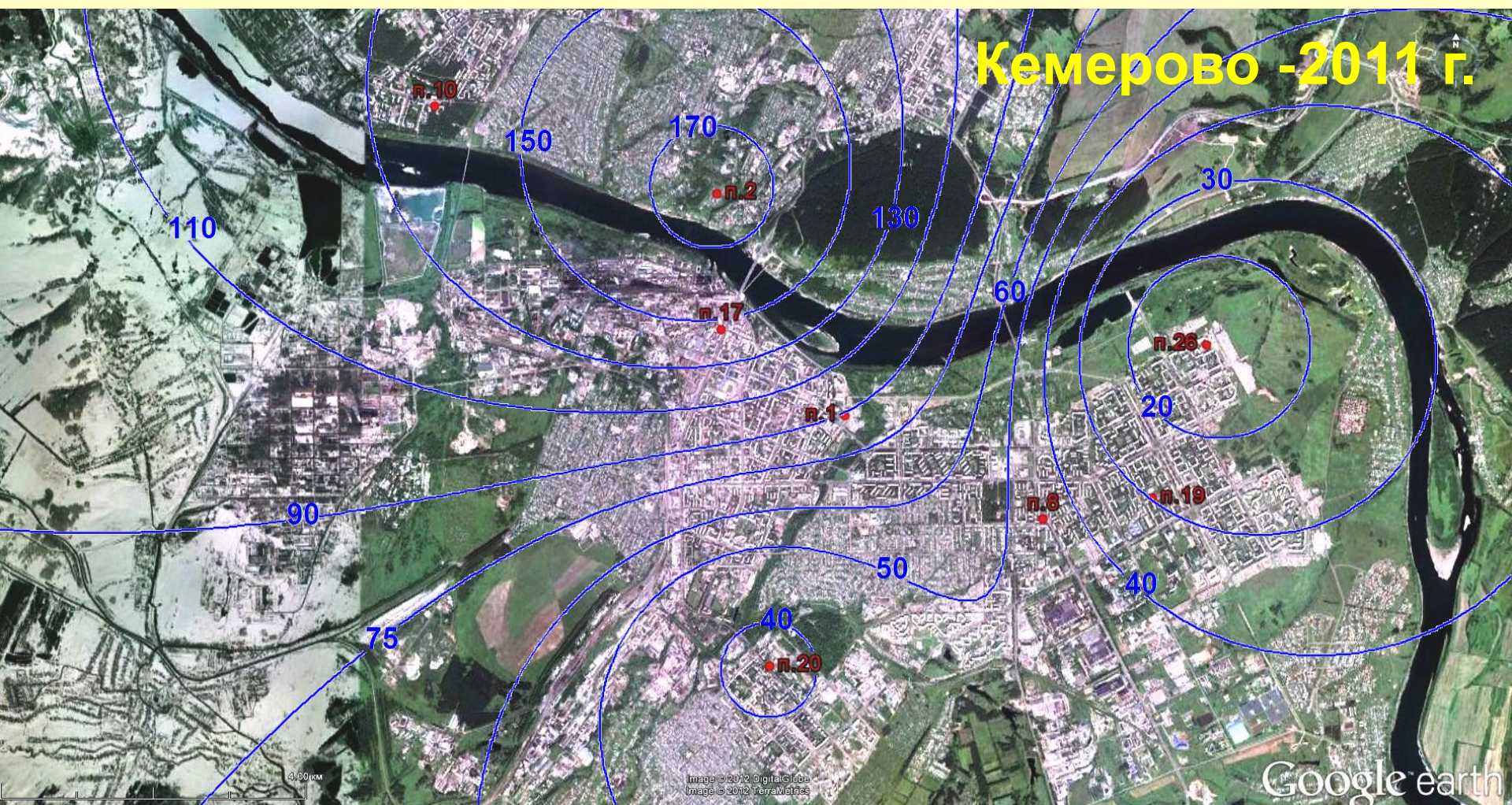
$$Q_2(x, y) \leq \theta \cdot \iint_{O(\varepsilon)} \frac{m(\mu, \sigma)P(\varphi + 180^\circ)}{d^2 + 2d r_{max} + 2r_{max}^2} d\mu d\sigma \equiv Q_3(x, y) \quad (22)$$

$$Q(x, y) \leq F(x, y) \equiv Q_1(x, y) + Q_3(x, y) \quad (23)$$



	Пост 1	Пост 2	Пост 8	Пост 10	Пост 17	Пост 19	Пост 20	Пост 26
<u>Измерения</u>	76	174	43	167	80	16	38	14

Рис. 18. Интерполяция по всем постам (бенз(а)пирен)



	Пост 1	Пост 2	Пост 8	Пост 10	Пост 17	Пост 19	Пост 20	Пост 26
<u>Измерения</u>	76	174	43	167	80	16	38	14
<u>Расчёт</u>	89	174	47	137	147	29	38	14

Рис. 19. Интерполяция по 2, 20, 26 постам (бенз(а)пирен)

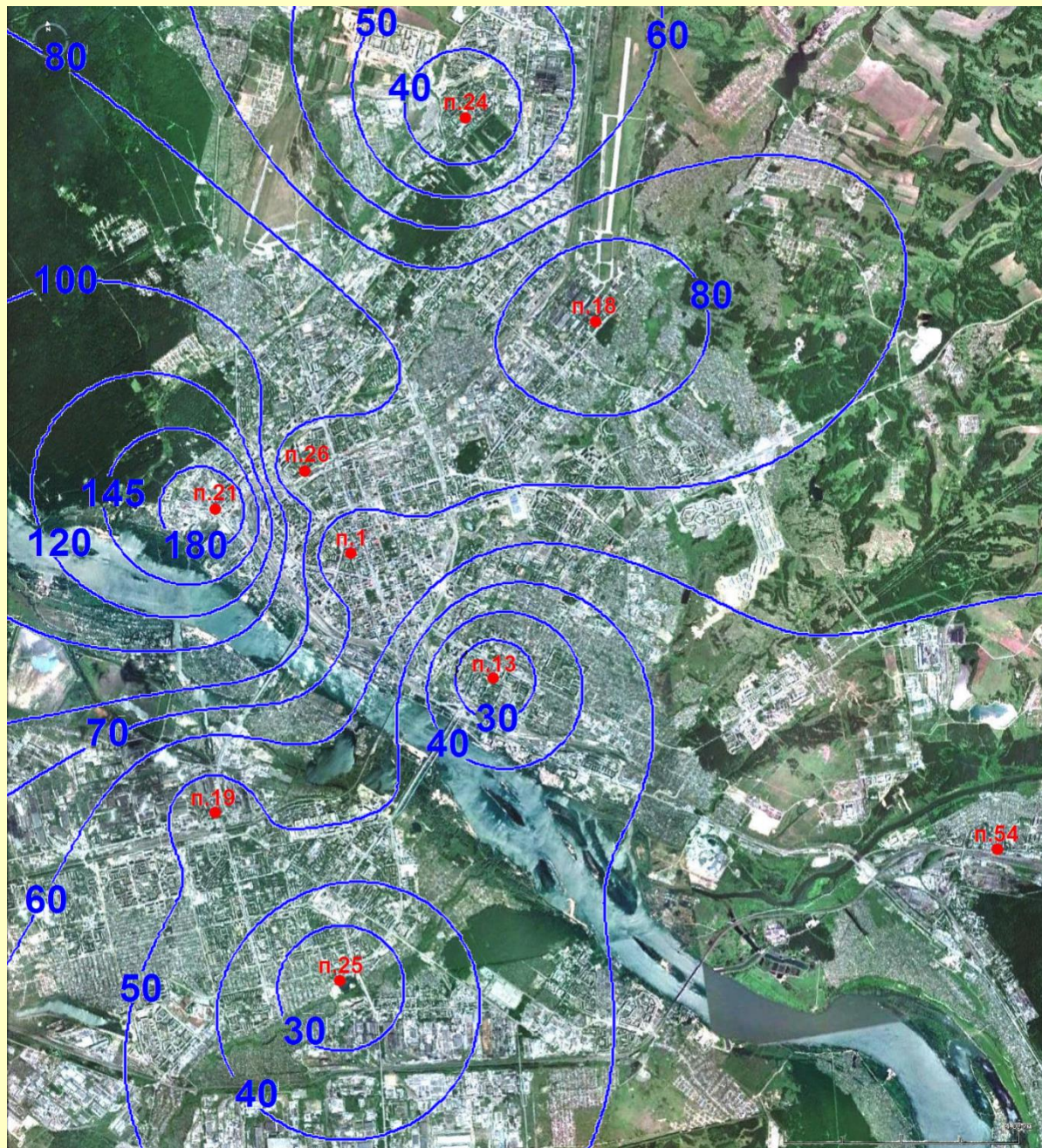


Рис. 20.

Интерполированное
поле **бенз(а)пирена**
(нг/л) в снежном покрове
г. Новосибирска
по 9 постам для зимнего
сезона 2010/11 г.

5. Исследование связей между наземными и спутниковыми наблюдениями загрязнения снежного покрова города

г. Кемерово (космоснимок от 26 марта 2006 г.)



г. Кемерово (26.03.2006 г.)



Рис. 21.
Фрагменты
космоснимка в
окрестностях постов
10, 26, 8, 19.

г. Кемерово (26.03.2006 г.)



Рис. 22.
Пример оцифровки
части спутникового
снимка в окрестности
моста через р. Томь.

г. Кемерово

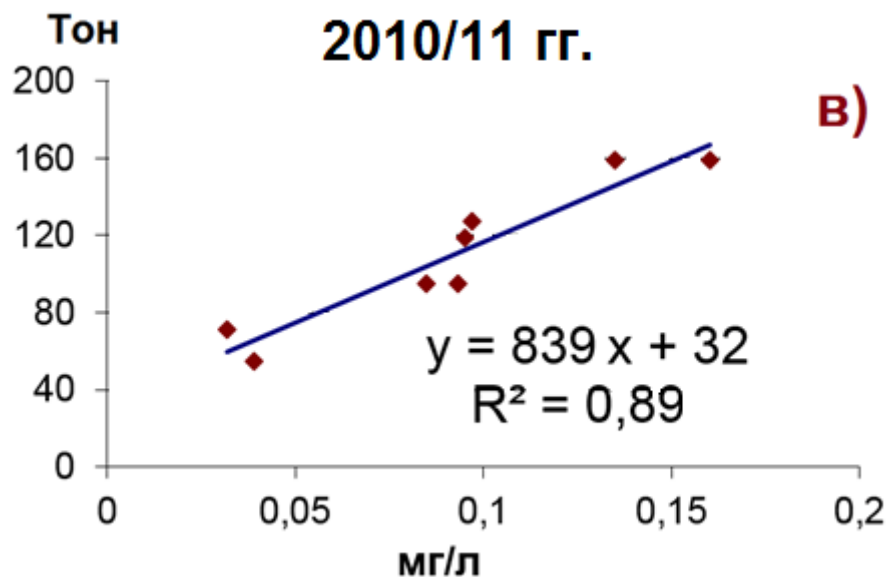
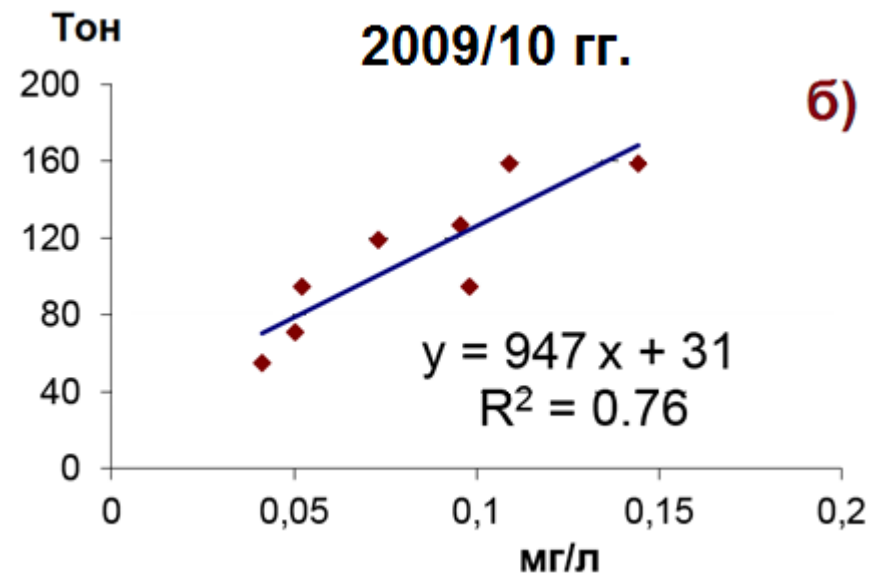
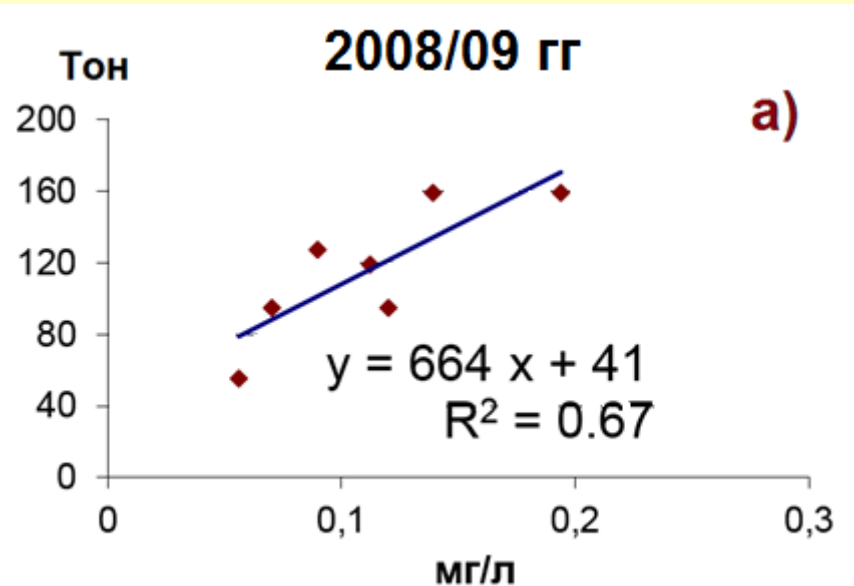


Рис. 23. Линейно-корреляционная связь между **осадком пыли** (мг/л) в пробах снега и **оттенками серого цвета** на космоснимке (26.03.2006 г.) в окрестности ПНЗА г. Кемерово.

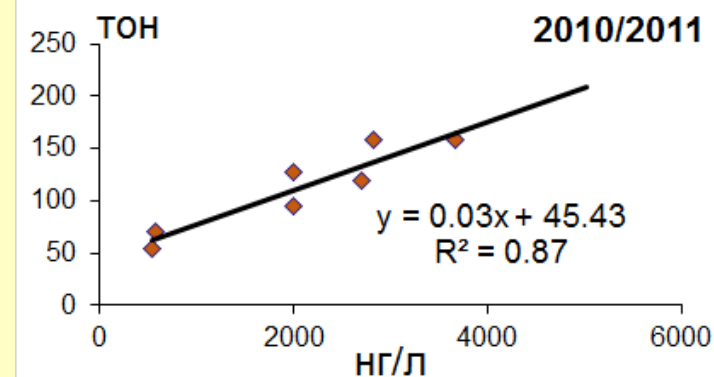
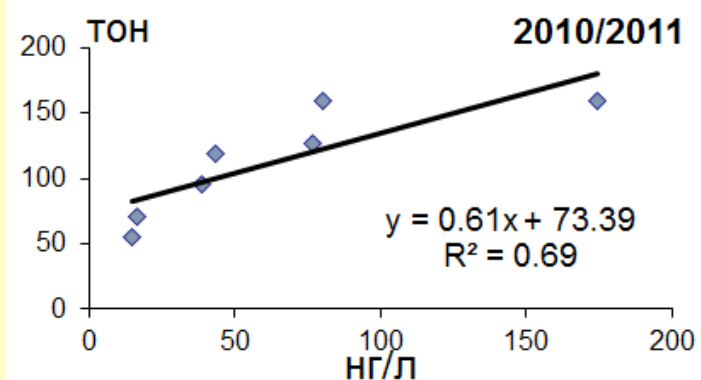
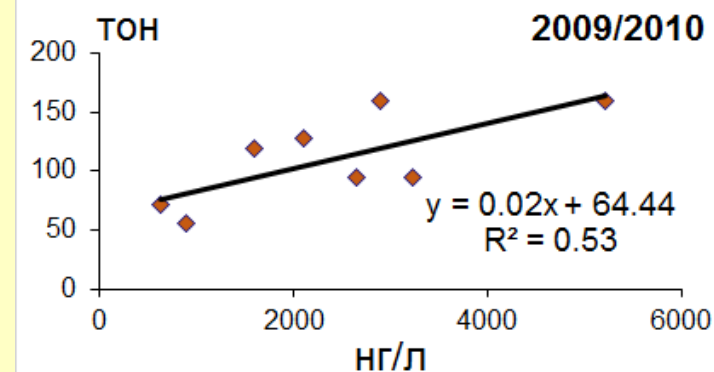
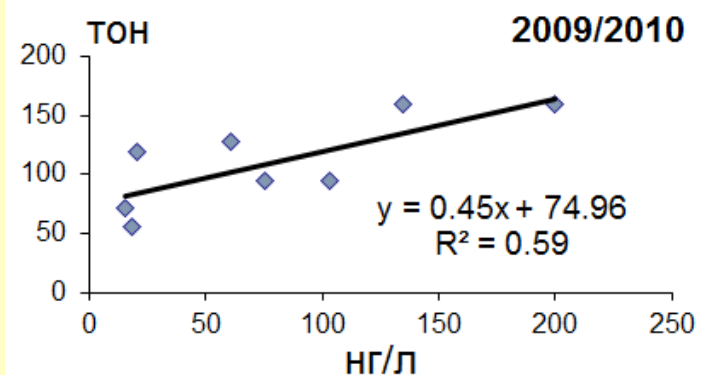
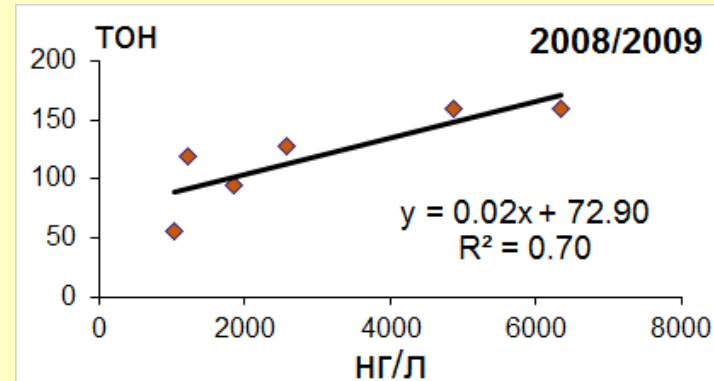
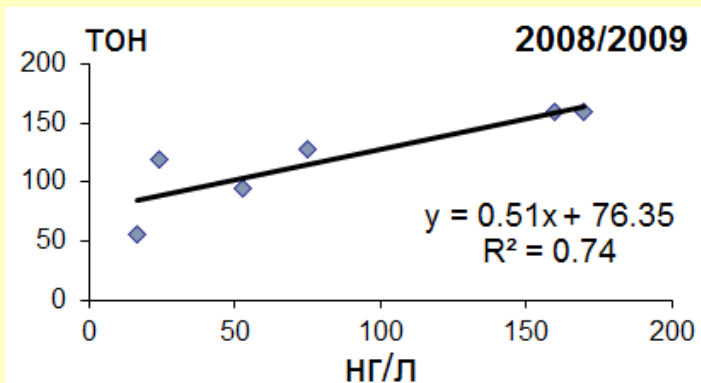


Рис. 24. Корреляционная связь между тонами серого цвета – **бенз(а)пиреном** и **суммой ПАУ** в зимних сезонах **2008-2011** гг. на постах г. Кемерово

Заключение

- с использованием моделей реконструкции разработаны методы **совместного анализа** характерных изображений ореолов загрязнения снежного покрова в окрестностях аэрозольных источников и данных контактных наблюдений;
- на данных натурных исследований загрязнения снежного покрова атмосферными выбросами Новосибирского электродного завода выявлены устойчивые количественные закономерности между полями **выпадения взвешенных веществ** и интенсивностью изменения **тонов серого цвета** по радиальным относительно основных источников направлениям;
- установлено, что для точечных источников функциональная связь между этими полями в наилучшей степени описывается **степенной** зависимостью, для площадных источников более соответствует **линейная** зависимость. В региональном масштабе характерна **логарифмическая** связь;
- результаты проведённых исследований позволяют существенно **оптимизировать** выполнение наземного мониторинга загрязнения окрестностей промышленных предприятий в зимний период времени.

- на примере крупных городов юга Западной Сибири показано **существование линейных корреляционных связей** между содержаниями взвешенных веществ в атмосферном воздухе, осадками и ПАУ в пробах снега, тональностями серого цвета на зимних спутниковых снимках территорий городов;
- выявленные связи между загрязнением атмосферного воздуха на постах и спутниковыми наблюдениями загрязнения снега создают дополнительные возможности для **оценки и контроля загрязнения** атмосферы городов;
- для проведения оценок длительного загрязнения атмосферы города по спутниковым снимкам как минимум необходимо наличие **2-3 наземных постов** наблюдений;
- следует отметить, что в рассматриваемых временных интервалах имеет место определённое **постоянство** городских источников выбросов взвешенных веществ.

Спасибо
за внимание