

**Устойчивость в распределении  
концентрации химических элементов  
в снеговом покрове Алтайского края и  
Кемеровской области**

**И.А. Суторихин,  
В.Е. Павлов, И.В. Хвостов**

**ИНСТИТУТ ВОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СО РАН  
г. Барнаул**

## ОСОБЕННОСТИ ЗИМНЕГО АЭРОЗОЛЯ, НАКАПЛИВАЕМОГО СНЕГОМ

- Снежный покров выступает консервантом элементов, содержащихся в сегментированном аэрозольном веществе
- Интеграция веществ за весь период снегонакопления
- Отсутствие биологических частиц; возможность выделения антропогенной и фоновой фракции

## ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ ПО ОТБОРУ СНЕГОВЫХ ПРОБ ПРОВОДИЛИСЬ В МАРТЕ 2002 – 2006 ГОДОВ



**КЕРНЫ СНЕГА ПЛОЩАДЬЮ 20 ´ 20 CM  
ОТБИРАЛИСЬ НА ВСЮ ГЛУБИНУ ПОКРОВА  
( ПРИПОЧВЕННЫЙ СЛОЙ ТОЛЩИНОЙ 1 – 1,5 CM ОТСЕКАЛСЯ )**



# ПОРЯДОК ОТБОРА ПРОБ

Измерялись вес пробы и высота покрова

Определялись географические координаты пункта  
с целью отбора проб в последующие годы  
в тех же самых точках

Номер пункта	Место отбора и дата	Координаты	Толщина покрова, м	Объем пробы, л	Вес нерастворимого остатка, г	Отношение $\epsilon$ г/л	Отношение г/м <sup>2</sup>	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Пойма реки Лосиха, 5 км в сторону с. Жилино	53 ° 23 <sup>i</sup> А. с. ш. В. 84 ° 10 <sup>i</sup> С. в. д. Д.	0,25 0,30 0,25 0,25	4.5 5.0 4.7 4.6	0,71 0,75 0,68 0,73	0,16 0,15 0,14 0,16	17.8 18,8 17,0 18,3	9.03. +2С Ясно
2.	Пойма реки Чемровка, 1 км на юг от пос. Нов. Чемровка	52 ° 31 <sup>i</sup> А. с. ш. В. 85 ° 02 <sup>i</sup> С. в. д. Д.	0,35 0,45 0,40 0,45	9,6 10,2 10,1 10,3	1,4 1,6 1,8 1,9	0,15 0,16 0,18 0,18	35.0 40,0 45,0 47,5	9.03 +3С Ясно
3.	Пойма реки Катунь за пос. Верх Катунское	52 ° 25 <sup>i</sup> А. с. ш. В. 85 ° 30 <sup>i</sup> С. в. д. Д.	0,25 0,15 0,15 0,20	3.8 2.4 2.5 2.9	0,18 0.14 0.12 0.15	0.05 0,05 0,05 0.05	4,5 3,5 3,0 3,8	9.03 +3С Ясно

## АНАЛИЗ ПРОБ

В итоге проведённого рентгено-флуоресцентного анализа составлены таблицы концентраций 28 элементов в каждой пробе.

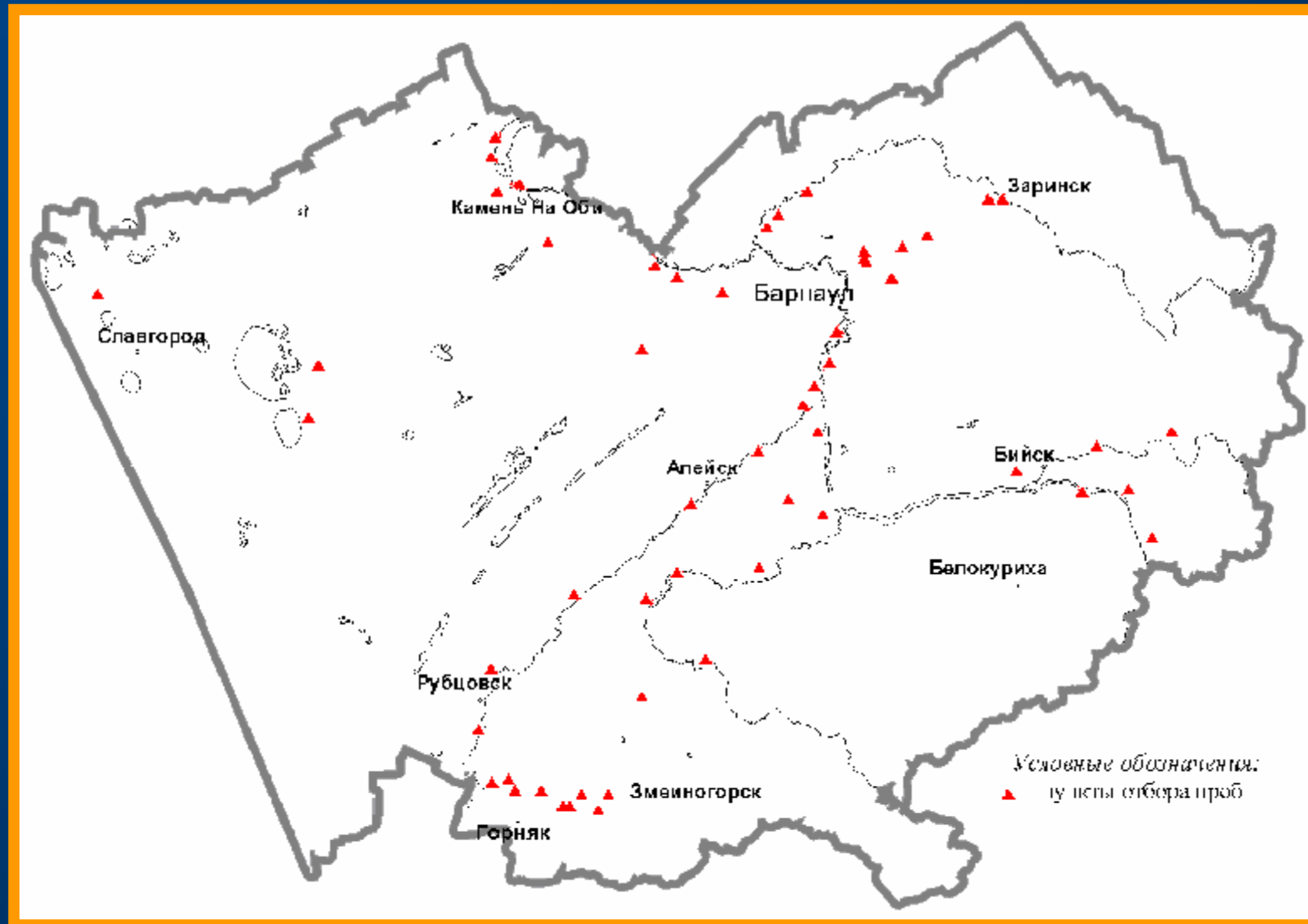
Полученные цифры в основном характеризуют крупную фракцию нерастворимых частиц (более 0.5 мкм).

номер пункта	С, мг/кг			
	28	29	30	31
Cl	85	27	85	377
K	410	470	510	1221
Ca	210	830	750	524
Ti	415	250	1450	20
Cr	45	144	1670	95
Mn	150	110	430	705
Fe	3545	1815	6720	7320
Co	10	15	10	0
Ni	25	110	175	56
Cu	210	83	812	145
Zn	50	210	817	2475
Ga	0	15	0	0
Ge	0	5	0	0
As	5	32	0	32

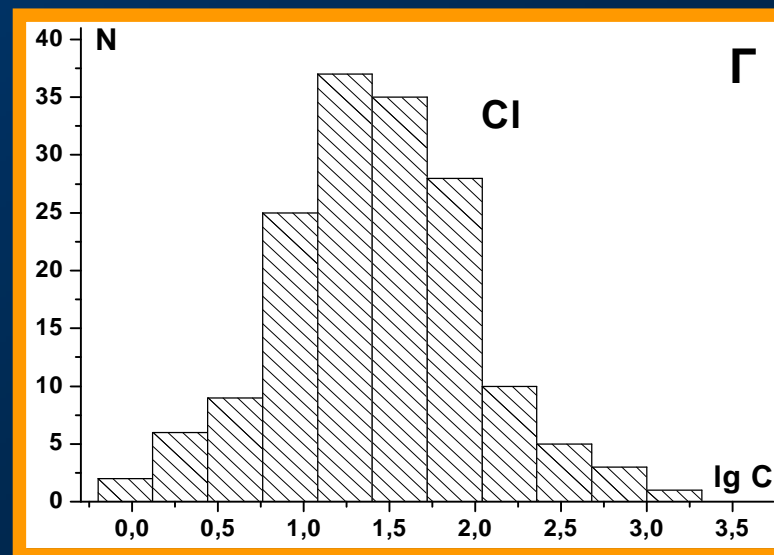
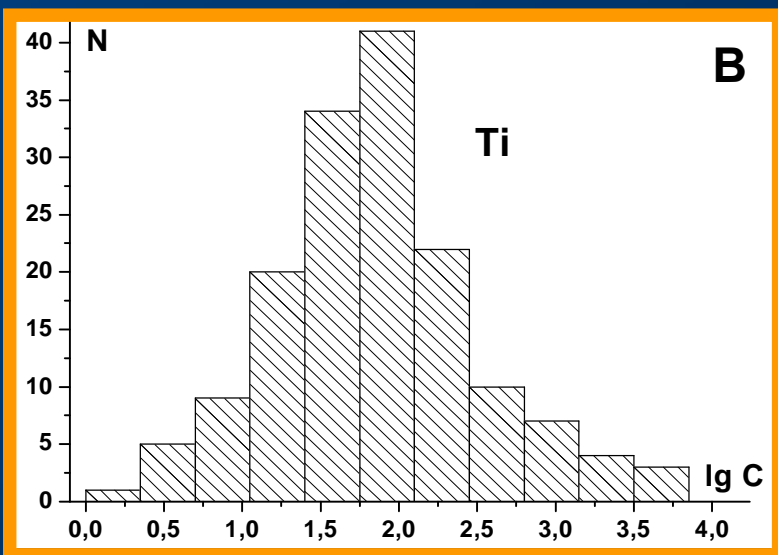
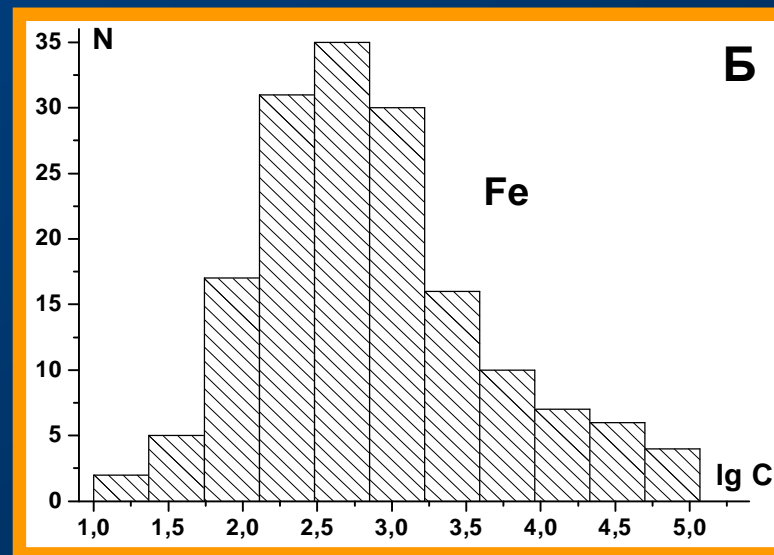
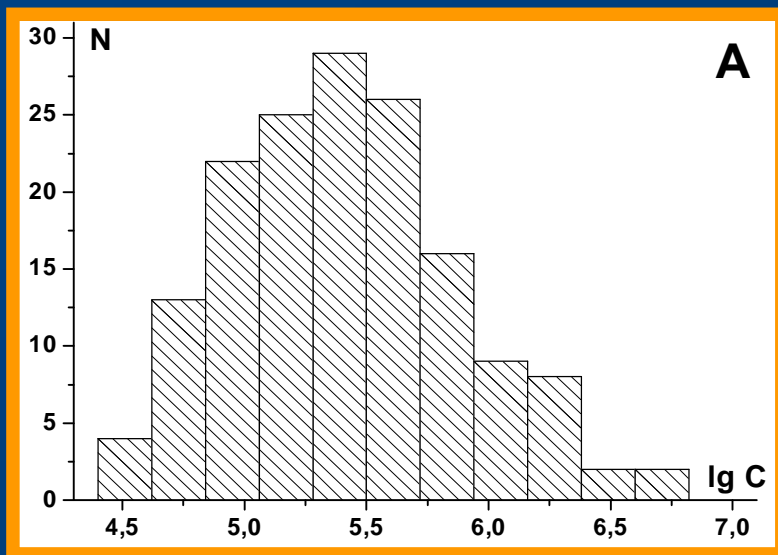
номер пункта	С, мг/кг			
	28	29	30	31
Se	2	3	0	0
Br	34	55	193	271
Rb	0	0	5	12
Sr	10	25	215	142
Y	0	0	8	10
Zr	0	22	93	44
Nb	0	2	2	8
Mo	45	5	15	12
W	5	77	52	110
Hg	8	0	0	12
Pb	45	22	31	183
Bi	0	0	0	0
Th	0	5	0	0
U	0	0	0	4

# КАРТА ОТБОРА ПРОБ В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

ЗА 2002 - 2005 гг. ОТОБРАНО И ПРОАНАЛИЗИРОВАНО 216 ПРОБ

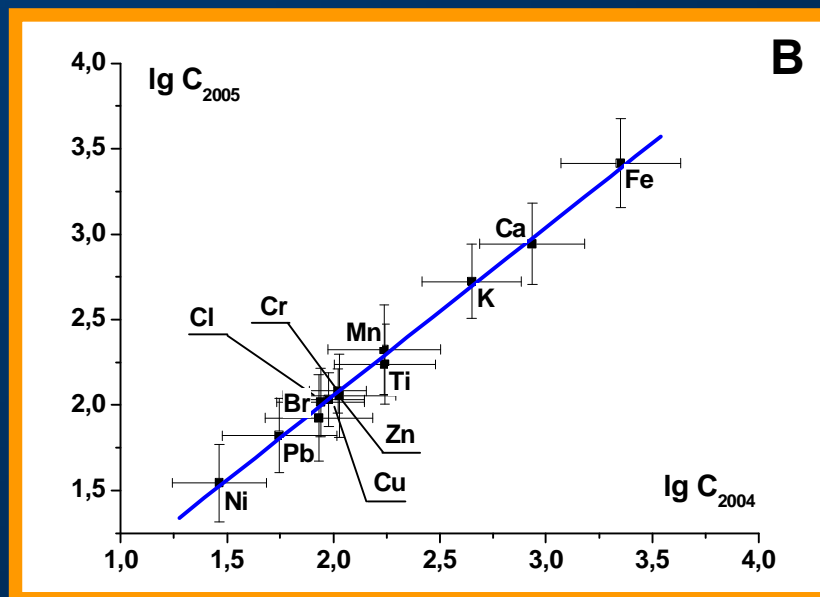
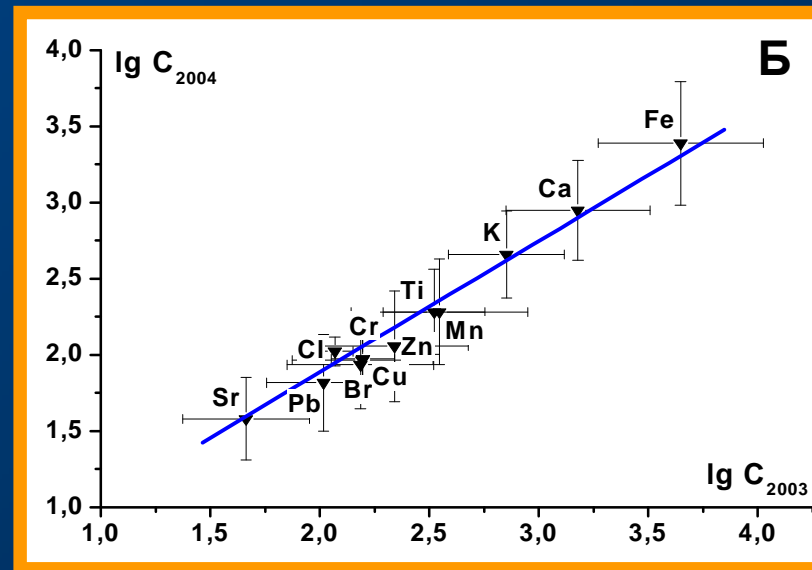
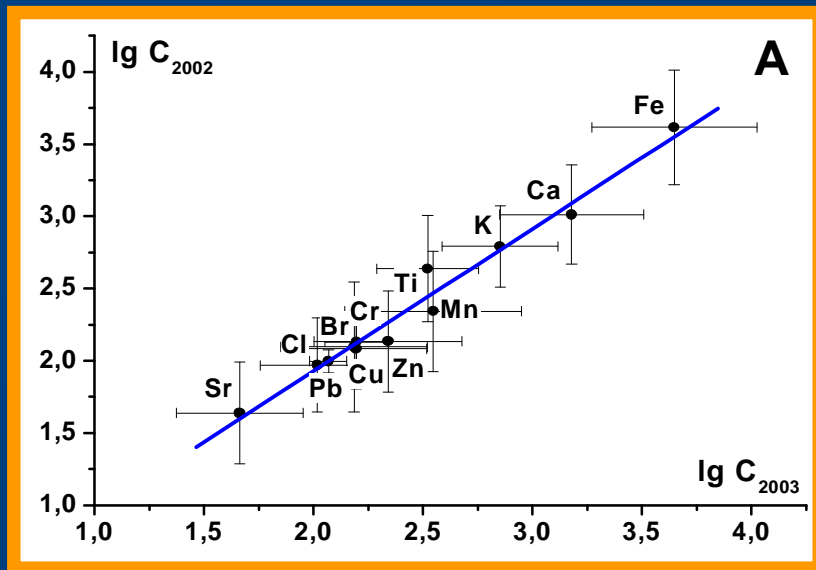


# КОНЦЕНТРАЦИИ СУММАРНЫХ ЗАГРЯЗИТЕЛЕЙ (А) И ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (Б, В, Г) В ПРОБАХ СНЕГА РАСПРЕДЕЛЕНЫ ПО ЛОГНОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ

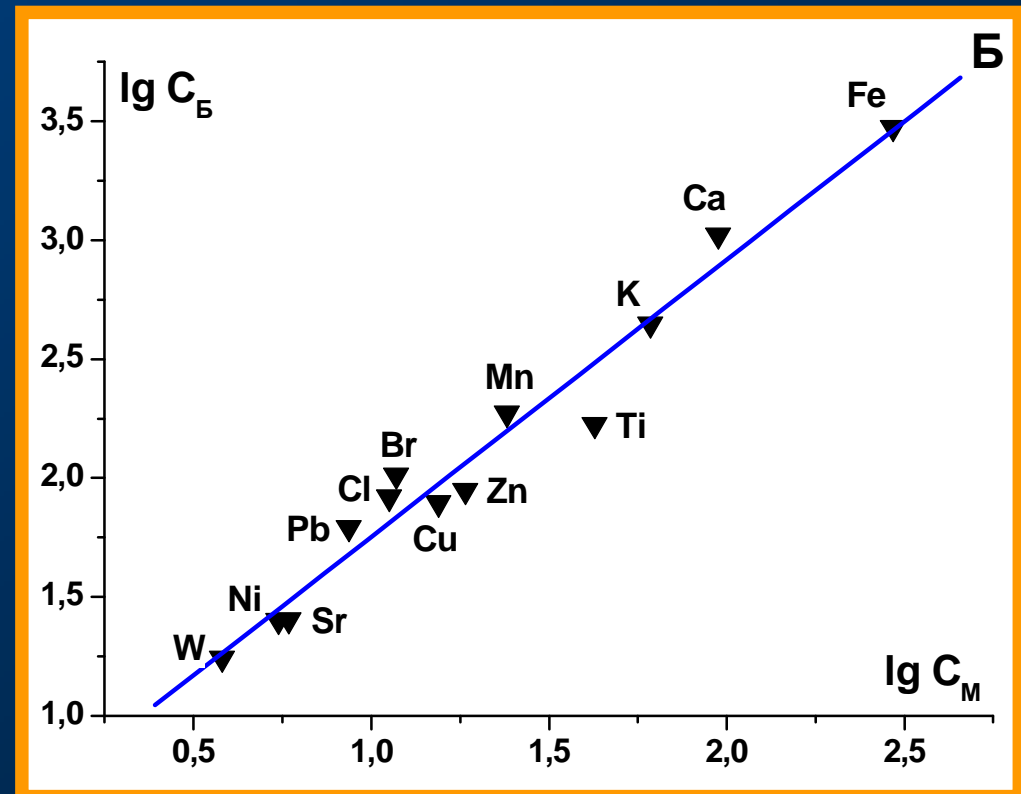
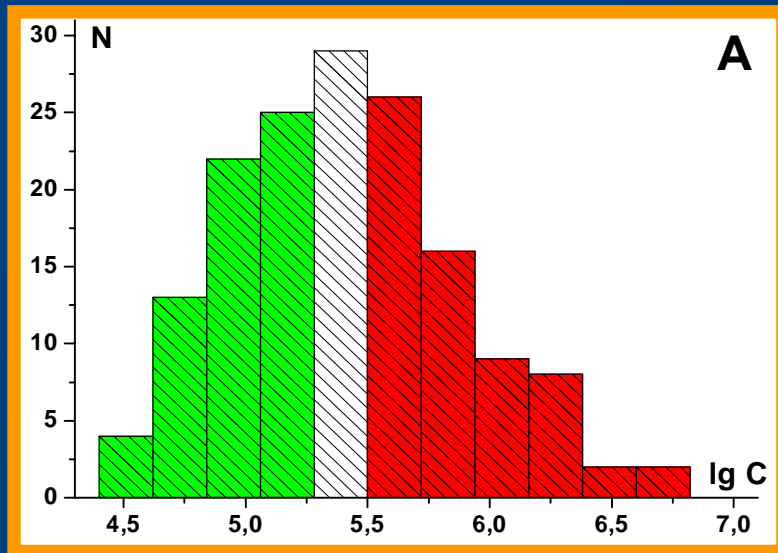




# СРЕДНИЙ ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЗИМНЕГО АЭРОЗОЛЯ НА АЛТАЕ УСТОЙЧИВО ПОВТОРЯЕТСЯ ИЗ ГОДА В ГОД (мг/кг)



# СОПОСТАВЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА (мг/кг) МАЛОЗАГРЯЗНЕННЫХ И СИЛЬНОЗАГРЯЗНЕННЫХ СНЕГОВЫХ ПРОБ В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

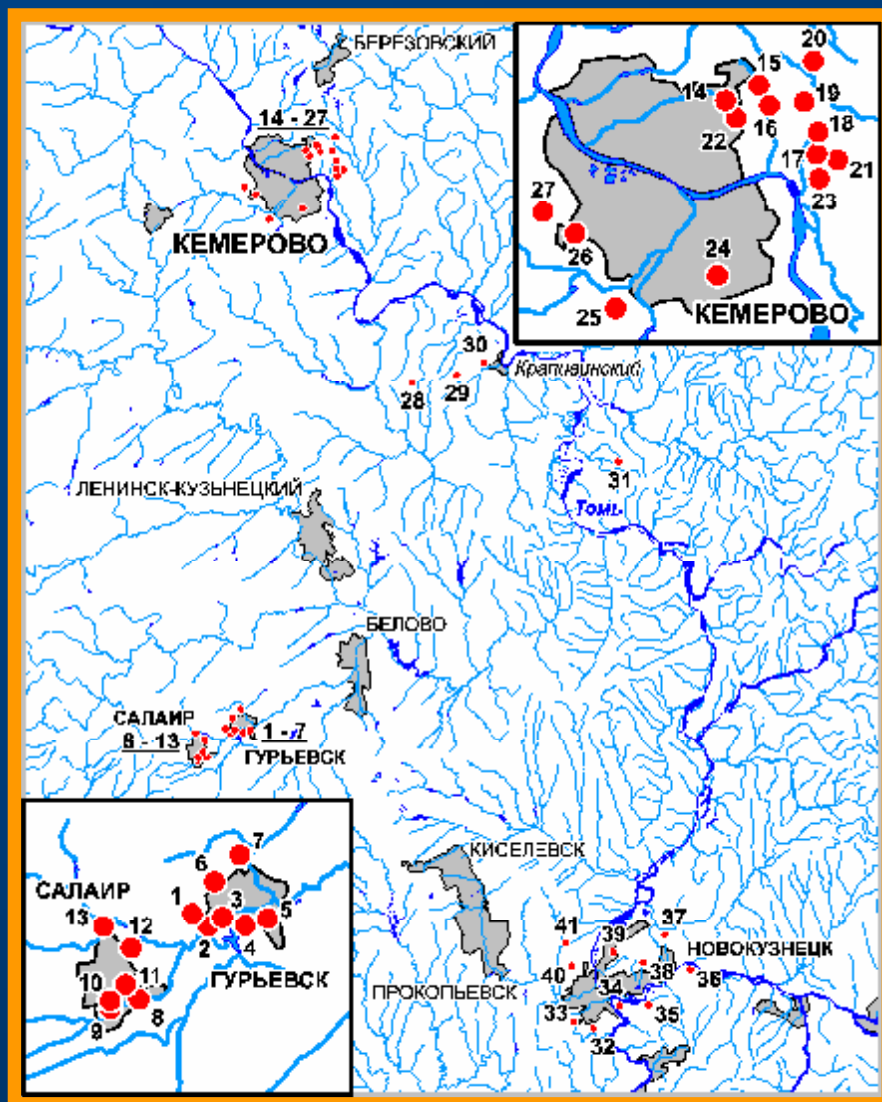


## СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗИТЕЛЕЙ СНЕГА В АЛТАЙСКОМ КРАЕ (12 элементов)

Элемент	С, мкг/л			С*, мг/кг			
	С	Ig С	Δ Ig С	С*	Ig С*	Δ Ig С*	Кларки
1	2	3	4	5	6	7	8
Cl	28	1,45	0,32	107	2,03	0,09	170
K	153	2,18	0,61	585	2,77	0,28	27000
Ca	290	2,46	0,75	1114	3,05	0,34	25000
Ti	84	1,93	0,57	303	2,48	0,31	3300
Cr	34	1,53	0,49	120	2,08	0,28	34
Mn	65	1,82	0,68	246	2,39	0,40	700
Fe	927	2,97	0,75	3556	3,55	0,40	36000
Cu	33	1,52	0,39	126	2,10	0,15	22
Zn	39	1,59	0,56	151	2,18	0,36	51
Br	31	1,49	0,67	118	2,07	0,36	2.5
Sr	11	1,04	0,47	42	1,63	0,30	230
Pb	24	1,37	0,62	86	1,94	0,31	16

# КАРТА ОТБОРА ПРОБ В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

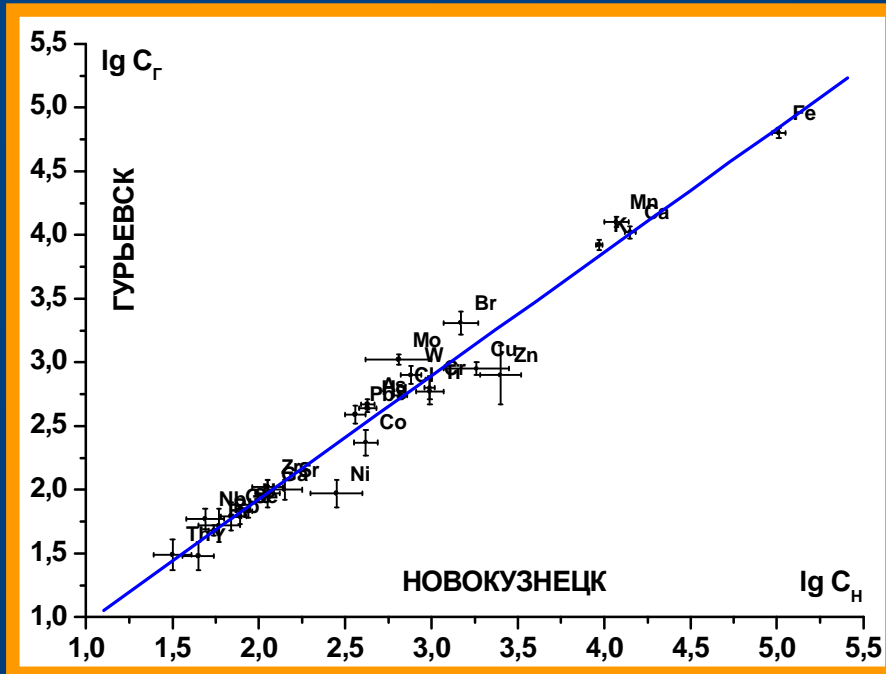
В 2006 г. ОТОБРАНА И ПРОАНАЛИЗИРОВАНА 41 ПРОБА



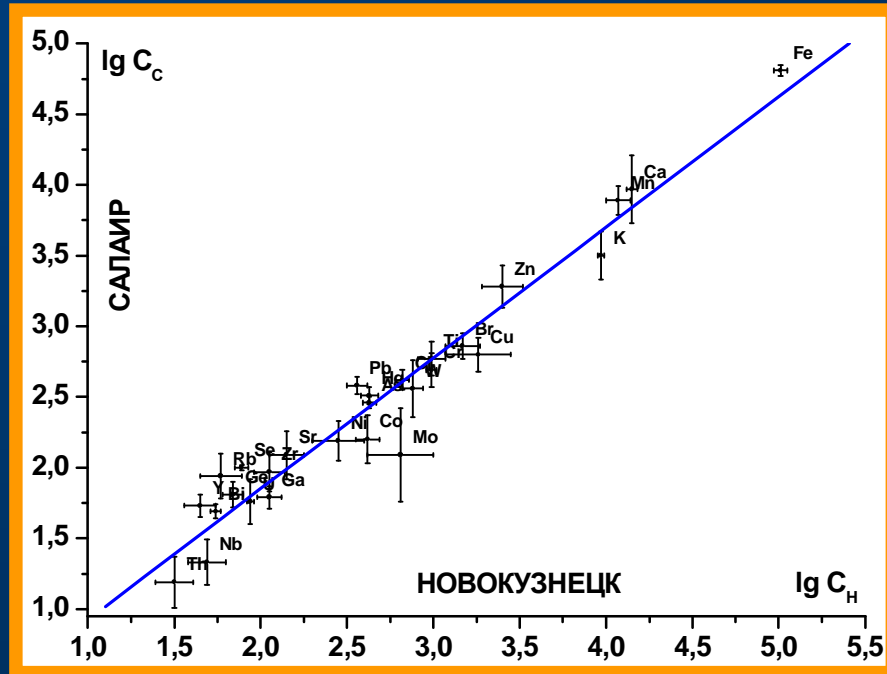
Точки отбора проб располагались вблизи границ крупных городов и промышленных центров: Кемерово, Новокузнецк, Салаир и Гурьевск.

Несколько проб отбирались в районе Крупивинского водохранилища - в условиях, близких к фоновым.

# СОПОСТАВЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЗИМНЕГО АЭРОЗОЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ



Коэффициент корреляции:  $R = 0,983$   
 Уравнение регрессии:  $Y = A \cdot X + B$   
 $A = 0,97 \pm 0,04$   
 $B = - 0,01 \pm 0,10$

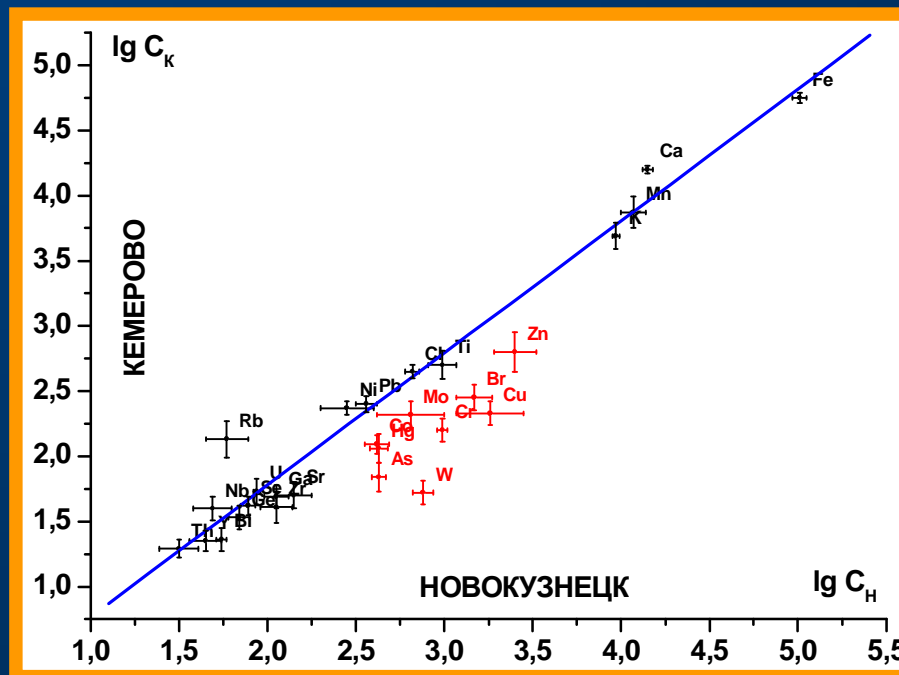


Коэффициент корреляции:  $R = 0,976$   
 Уравнение регрессии:  $Y = A \cdot X + B$   
 $A = 0,92 \pm 0,04$   
 $B = 0,00 \pm 0,11$

Размерность концентраций: мг/кг

# СОПОСТАВЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ЗИМНЕГО АЭРОЗОЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В окрестностях г. Кемерово наблюдается группа элементов (Cr, Co, Cu, Zn, As, Br, Mo, W и Hg), содержание которых в снеговых пробах заметно ниже, чем в Новокузнецке, Гурьевске и Салаире



Коэффициент корреляции:  $R = 0,984$

Уравнение регрессии:  $Y = A \cdot X + B$

$A = 1,01 \pm 0,04$

$B = - 0,24 \pm 0,12$

Размерность концентраций: мг/кг

## СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ СНЕГА ВБЛИЗИ ГОРОДОВ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ (28 элементов)

Элемент	C	Ig C	$\Delta$ Ig C	Кларки
Cl	510	2,71	0,03	170
K	6011	3,78	0,05	27000
Ca	12990	4,11	0,04	25000
Ti	634	2,80	0,06	3300
Cr	405	2,61	0,07	34
Mn	9360	3,97	0,05	700
Fe	69349	4,84	0,03	36000
Co	201	2,30	0,06	7,3
Ni	192	2,28	0,06	26
Cu	598	2,78	0,09	22
Zn	1147	3,06	0,09	51
Ga	72	1,86	0,05	18
Ge	51	1,71	0,05	1,4
As	204	2,31	0,08	2,1

Элемент	C	Ig C	$\Delta$ Ig C	Кларки
Se	61	1,79	0,04	0,16
Br	751	2,88	0,08	2,5
Rb	84	1,93	0,08	180
Sr	88	1,94	0,06	230
Y	33	1,52	0,05	38
Zr	73	1,86	0,06	170
Nb	41	1,61	0,06	20
Mo	354	2,55	0,10	1,3
W	248	2,40	0,10	1,9
Hg	250	2,40	0,06	0,088
Pb	321	2,51	0,03	16
Bi	38	1,58	0,05	0,033
Th	23	1,37	0,06	16
U	65	1,81	0,05	2,7

Размерность данных в таблицах: мг/кг

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗОЛЫ УГЛЯ,  
ВЫПАДАЮЩЕЙ НА СНЕГ В РАЙОНЕ ТЭЦ-2 (г. БАРНАУЛ)  
И ТЭЦ ЗАО КУЧУКСУЛЬФАТ ЗА ЗИМНИЙ ПЕРИОД**



Использование снежного покрова в качестве индикатора загрязнения природной среды в городах позволяет заметно увеличить эффективность контроля загрязнения атмосферы, вод и почв.

При математическом моделировании переноса примеси в мезомасштабном пограничном слое атмосферы возникает проблема восстановления поля концентраций примеси в связи с отсутствием регулярных наблюдений над водными поверхностями, в труднодоступных районах, за пределами крупных городов, из-за редкой сети имеющихся пунктов отбора проб.

В настоящей работе приведены численные расчеты распространения примеси и осаждения ее на подстилающую поверхность от стационарного источника загрязнения –тепловой электростанции ТЭЦ ЗАО КУЧУКСУЛЬФАТ, расположенной на территории Благовещенского района.

В качестве исходного уравнения трехмерной нестационарной модели переноса аэрозоля в атмосфере и выпадения его на подстилающую поверхность использовалось уравнение адвекции и диффузии примеси с учетом взаимодействия её с подстилающей поверхностью. Результатом расчета является концентрация примеси в атмосфере и количество частиц или масса, выпавшие на единицу площади подстилающей поверхности за время расчета:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial s}{\partial z} + bs - \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z} - m_x \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - m_y \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = s_0(\mathbf{r}, t). \quad (1)$$

Здесь  $s$  - концентрация аэрозоля,  $u, v, w$  - компоненты скорости,  $w_g$  - скорость гравитационного оседания примеси,  $b$  - коэффициент поглощения примеси,  $k$  - вертикальный коэффициент турбулентной диффузии,  $m_x, m_y$  - горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии,  $s_0(\mathbf{r}, t)$  - источник загрязняющих веществ.

Граничные условия для примеси следующие:

$$z = h, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} = 0,$$

$$x, y = d, \quad m_x \frac{\partial s}{\partial x} = 0, \quad m_y \frac{\partial s}{\partial y} = 0.$$

Здесь  $h$  - высота области распространения примеси,  $d$  - ее горизонтальный размер. Особо следует остановиться на нижнем граничном условии для примесей, которое имеет вид:

$$z = z_1, \quad k \frac{\partial s}{\partial z} + w_g s = b s.$$

Здесь  $z_1$  - параметр шероховатости,  $b$  - величина, имеющая размерность скорости и характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью.

## ТЭЦ ЗАО КУЧУКСУЛЬФАТ

С помощью программ, созданных на основе рассмотренной модели были проведены расчеты выпадения загрязняющего вещества (золы угля) в снег за зимний период 11.2004-03.2005 от ТЭЦ ЗАО КУЧУКСУЛЬФАТ.

По многолетним данным метеостанции Благовещенка рассчитана роза ветров за период 1965-1995гг. Преобладающими оказались ветры южного (29%), юго-западного (29%), западного (10%) направлений; остальные направления характеризуются повторяемостью 3-8% (северо-западное-4%, северное-3%, северо-восточное-7%, восточное-8%, юго-восточное-7%, штиль-3%). Средняя скорость ветра за рассматриваемый период 5 м/с.

Уравнение (1) дискретизировалось по пространственным переменным и решалось методом прямых. Для интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений применялся метод Рунге-Кутты второго порядка аппроксимации. Расчетная область составила  $10 \times 10$  км по горизонтали и 360 м по вертикали. Программа производит расчет выпадения примеси в снег за весь зимний период (150 дней). В соответствии с розой ветров определялось число дней за зимний период с определенным направлением ветра. Далее направление ветра менялось автоматически в соответствии с розой ветров. Для области, размеры которой указаны выше, расчет выпадения аэрозоля в снег за 5 месяцев занимает не больше 3 минут, что позволяет проводить многократные расчеты.

В процессе расчетов определялось, при каких значения коэффициента горизонтальной диффузии  $m$ , параметра взаимодействия с подстилающей поверхностью  $b$  результаты расчетов лучше всего совпадают с результатами измерений. Результатом расчета является масса примеси, выпавшая на единицу площади подстилающей поверхности за время расчета. Путем сравнения расчетов с экспериментальными данными подобраны значения эмпирических коэффициентов модели. Наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов:  $m=300$  м<sup>2</sup>/с,  $b=0,2$  м/с.

На рис.1 приведены соответствующие рассчитанные изолинии концентраций выпавшего в снег загрязняющего вещества (зола угля в г/м<sup>2</sup>) за зимний период от ТЭЦ ЗАО КУЧУКСУЛЬФАТ. Положение источника отмечено крестиком. Как видно из рис.1 наибольшее количество примеси (240-400 г/м<sup>2</sup>) выпало вблизи источника, на расстоянии, не превышающем 800 м от него.

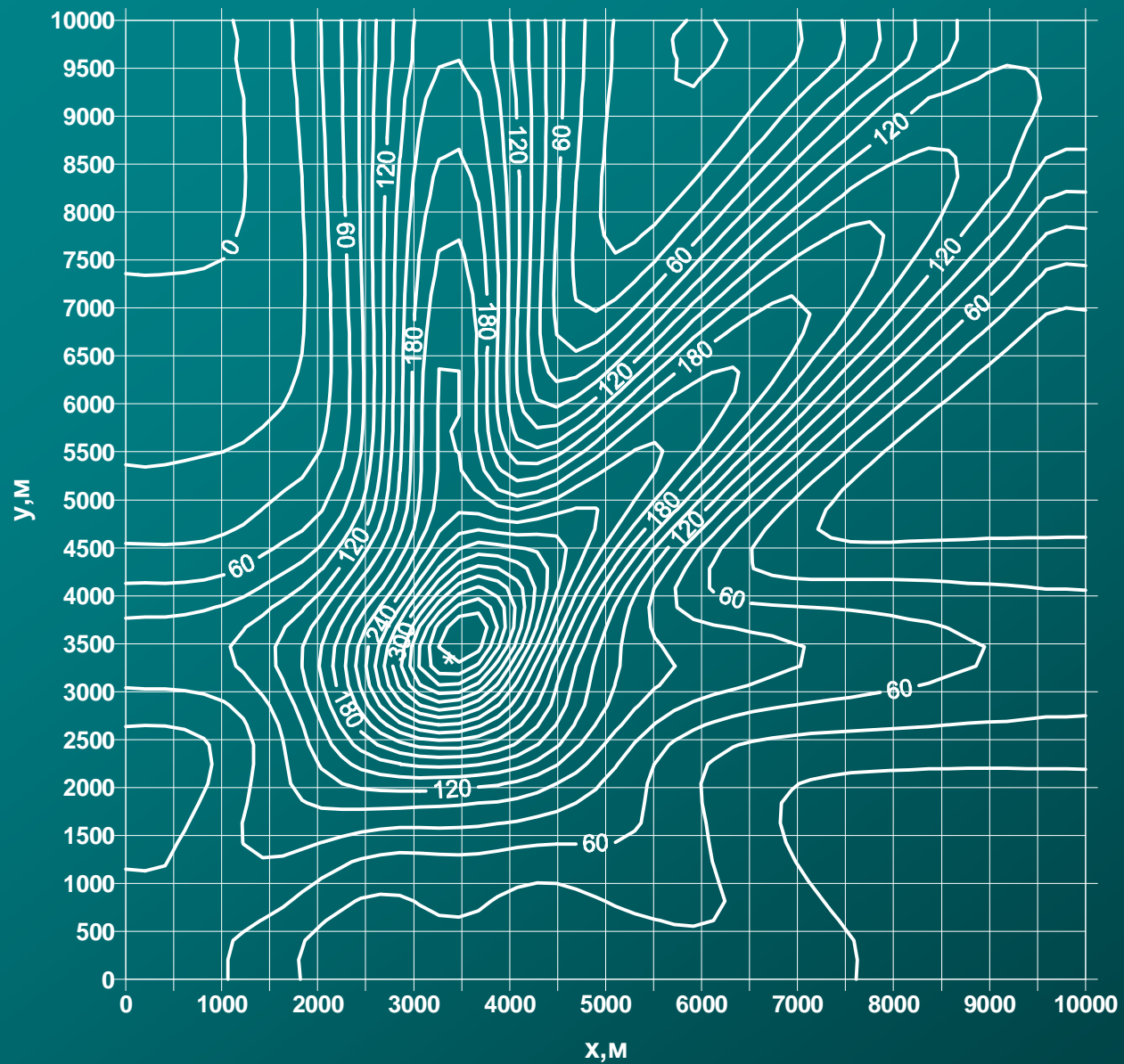


Рис.1 Схема рассчитанного распределения содержания золы угля  
(координаты источника 3400;3400)

Таблица 1

№ точки отбора пробы	Расстояние от источника(км)	Измеренная масса аэрозоля на единицу площади (г/м <sup>2</sup> )	Расчетная масса аэрозоля на единицу площади (г/м <sup>2</sup> )	Относительная погрешность %
1	0,8(ССЗ)	425	360	15
2	1,5(ССЗ)	193	240	24
3	3(ССЗ)	78	100	28

В таблице 1 приведены экспериментальные и рассчитанные значения концентраций аэрозоля на различных расстояниях от источника.

Проведенные численные расчеты показали хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными (таблица 1). Ореол рассеяния соответствует преобладающим направлениям ветра. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 28%.



## ТЭЦ – 2 (г. Барнаул)

По данным метеостанции г. Барнаула рассчитана роза ветров за рассматриваемый период. Преобладающими оказались ветры южного (25%), юго-западного (24%), западного (12%) направлений, остальные направления характеризуются повторяемостью 1-9% (северное-1%, северо-восточное-2%, северо-западное-4%, восточное-9%, юго-восточное-8%). Средняя скорость ветра за рассматриваемый период 2,1 м/с. В течение расчетного периода в 90% случаев преобладал тип погоды, определяемый периферией Сибирского антициклона либо малоградиентным полем пониженного давления. В таких случаях вертикальная составляющая скорости ветра не превышает сантиметров в секунду или долей сантиметра в секунду. В наших расчетах значение вертикальной скорости  $w$  составляет 0,005 м/с.

В процессе расчетов определялось, при каких значения коэффициента горизонтальной диффузии  $m$ , параметра взаимодействия с подстилающей поверхностью  $b$  результаты расчетов лучше всего совпадают с результатами измерений. Результатом расчета является масса примеси, выпавшая на единицу площади подстилающей поверхности за время расчета. Путем сравнения расчетов с экспериментальными данными подобраны значения эмпирических коэффициентов модели. Наилучшие результаты соответствуют следующим значениям коэффициентов:  $m=150 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $b=0,1 \text{ м/с}$ .

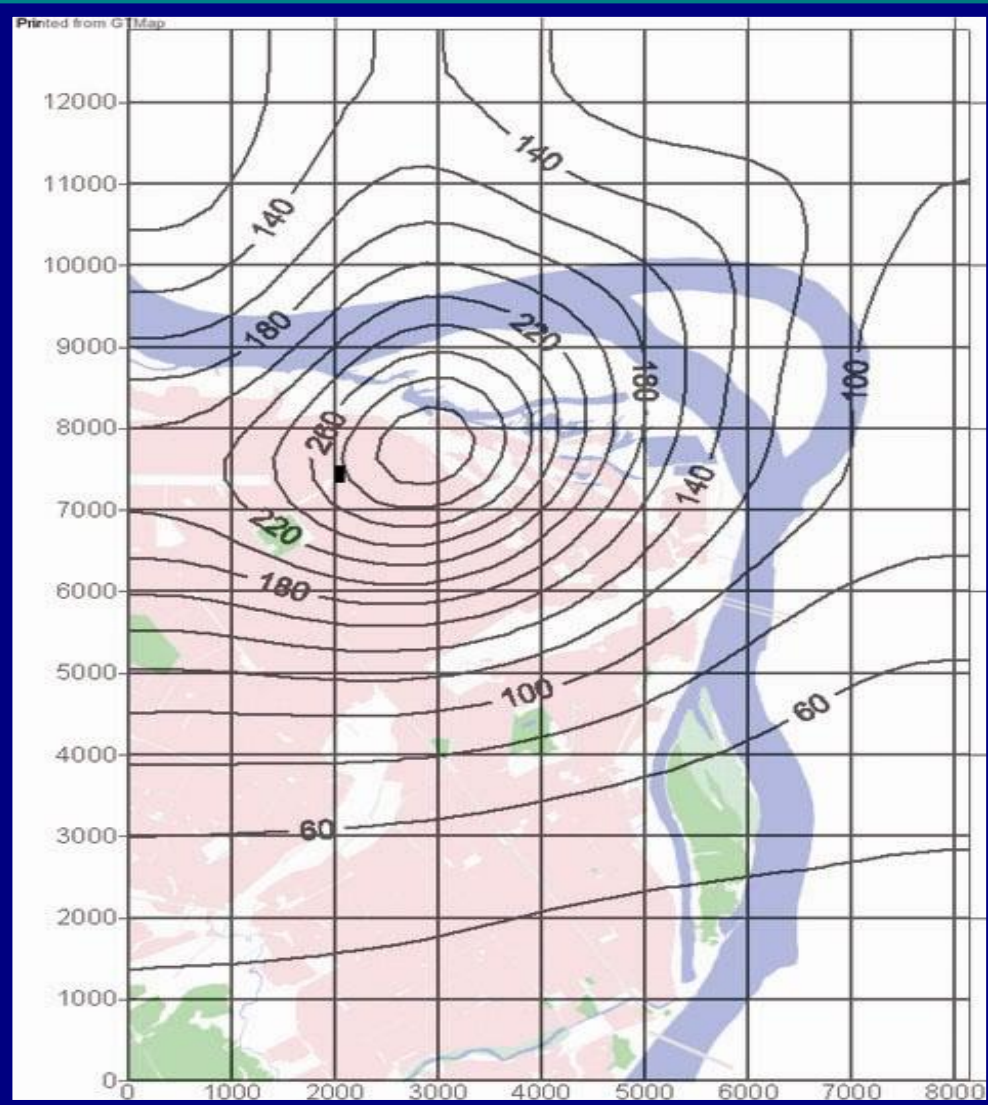


Рис.2. Изолинии выпавшего в снег загрязняющего вещества (летучей золы, т/км<sup>2</sup>) за зимний период (ТЭЦ-2, г. Барнаул).

На рис. 2 приведены соответствующие рассчитанные изолинии концентраций выпавшего в снег загрязняющего вещества (золы угля в г/м<sup>2</sup>) за зимний период от ТЭЦ-2 для г. Барнаула. Как видно из рис.2 основная часть золы угля выпала в непосредственной близости от предприятия (500-750г/м<sup>2</sup>). На территорию промзоны, реки Обь и ее прибрежные районы пришлось 100-400 г/м<sup>2</sup>. На жилые кварталы, расположенные в северо-восточной части города, наибольшее влияние выбросы ТЭЦ-2 оказывают при ветрах восточной четверти, которые отмечались в 19% всех случаев и штилях - 15%. На территорию жилых кварталов выпало 50-300 г/м<sup>2</sup>.

В таблице 2 приведены экспериментальные и рассчитанные значения концентраций аэрозоля на различных расстояниях от источника.

Таблица 2

№ точки отбора пробы	Расстояние от источника(км)	Измеренная масса аэрозоля на единицу площади (г/м <sup>2</sup> )	Расчетная масса аэрозоля на единицу площади (г/м <sup>2</sup> )	Относительная погрешность %
1	1(ЗСЗ)	500	500	0
2	1(ССЗ)	653	550	23,4
3	2(ССЗ)	255	250	1,9
4	3(ССЗ)	123	125	1,6

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Концентрации суммарных загрязнителей и отдельных элементов в пробах снега распределены по **логнормальному** закону
- Средний элементный состав нерастворимых веществ в снежном покрове Алтайского края устойчиво **повторяется** из зимы в зиму
- Влияние антропогенного фактора в загрязнении снегового покрова в Алтайском крае заметно даже на **больших** расстояниях от городов и промышленных центров
- Средний элементный состав нерастворимых веществ, существенно **отличается** от общей распространенности элементов в литосфере

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**