

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 550.462

Вклад выбросов металлургии в пылеаэрозольное загрязнение Норильского промышленного района по снегогеохимическим данным

Ю.В. Ермолов¹✉, И.Д. Махатков^{1,2}, А.С. Черевко^{1*}

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2

² Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»
663305, г. Норильск, Красноярский край, ул. Комсомольская, 1

Поступила в редакцию 1.09.2022 г.;
после доработки 17.11.2022 г.;
принята к печати 8.12.2022 г.

В 2021 г. в Норильском промышленном районе нами исследовались концентрации и элементный химический состав неорганической (зольной) части твердых примесей снега. На основе анализа этих данных представлен перечень приоритетных загрязняющих химических элементов (Ni, Cu, Cd, Co, Sn, Pb, B, Zn) и предложен метод количественной оценки вклада атмосферных выбросов металлургического завода «Надежда» в загрязнение территории пылеаэрозолями. Зимой 2020/2021 гг. были обнаружены случаи преобладания выбросов этого источника в пылеаэрозольном загрязнении на расстоянии до 7 км от источника в широтном направлении.

Ключевые слова: Норильск, пылеаэрозольное загрязнение, снегогеохимическая съемка, тяжелые металлы, пространственное моделирование; Norilsk, aerosol pollution, snow-geochemical survey, heavy metals, spatial simulation.

Введение

Мониторинг снежного покрова и других объектов окружающей среды в Норильском промышленном районе (НПР) на протяжении многих лет обнаруживает сильное загрязнение территории пылеаэрозолями с высокими концентрациями тяжелых металлов [1–5]. Последнее из снегогеохимических обследований (2019 г.), проведенное уже после закрытия Никелевого завода (2016 г.), не выявило существенного улучшения ситуации, показав чрезвычайно опасный уровень загрязнения снега пылеаэрозолями во всех функциональных зонах Норильска [6]. Наряду с выбросами металлургии причиной этого вида загрязнения в НПР являются выбросы транспорта и других производств (прежде всего цементного завода), а также ветровая эрозия нарушенных земельных участков — карьеров, хвостохранилищ, золоотвалов, отвалов вскрышных пород [5]. Подвержены ветровой эрозии и почвы, которые здесь нередко лишены растительности и сильно загрязнены соединениями серы, меди, никеля, кобальта, кадмия [7]. Кроме того, пыльносится с дорог, посыпаемых в зимний период антигололедным материалом, в качестве которого до 2019 г. в Норильске повсеместно использовался отход металлургического

производства — гранулированный шлак. Поэтому при использовании данных снегогеохимической съемки для оценки загрязнения территории НПР пылеаэрозольными выбросами металлургии и эффективности предпринимаемых «Норникелем» природоохранных мер необходимо определить вклад металлургической составляющей в состав твердых примесей снега. Ранее этот вопрос рассматривался только на качественном уровне [5].

Твердые примеси снега в зонах воздействия разных промышленных предприятий характеризуются специфичными наборами индикаторных химических элементов (ХЭ), по концентрациям и соотношениям концентраций которых возможно диагностировать источники загрязнения [8]. Цель нашей работы — изучить возможность определения количественного вклада выбросов металлургии НПР в пылеаэрозольное загрязнение по данным элементного химического анализа неорганической (зольной) части твердых примесей снега с пространственной экстраполяцией точечных натурных наблюдений.

Объект и методы исследований

Отбор проб снега выполнен в третьей декаде апреля 2021 г. на нерегулярной сети точек, охватывающей территорию от г.п. Дудинка на западе до района Талнах г. Норильска на востоке (табл. 1). Из-за сильного ветрового перераспределения снег слабо накапливается на открытых поверхностях, поэтому площадки отбора проб выбирались

* Юрий Викторович Ермолов (ermolov.07@mail.ru);
Игорь Дмитриевич Махатков (makhatkov@mail.ru); Алла
Саввична Черевко (ascherevko@yandex.ru).

Сеть пробоотбора снежного покрова НПР и некоторые характеристики пылевого загрязнения снега

Номер площад-ки	Северная широта, град	Восточная долгота, град	Расстояние, направление от завода «Надежда»	Зола твердых примесей, мг/кг снега (кратность превышения фоновой концентрации)	Вклад выбросов завода «Надежда» в неорганическую (зольную) часть твердых примесей снега, % (медиана, $n = 15$)
1	69,3882	88,1900	11,2 км, северо-восток	44,1 (18)	22
2	69,3179	88,2948	13,3 км, юго-восток	232,3 (97)	19
3	69,3075	88,2143	10,3 км, юго-восток	265,5 (111)	5
4	69,3458	88,1715	8,6 км, восток	164,4 (69)	15
5	69,3962	86,1741	70 км, запад	45,5 (19)	3
6	69,4163	86,5313	57 км, запад (фон)	2,4 (1)	13
7	69,3247	87,3237	25,5 км, запад	3,9 (1,6)	17
8	69,3609	87,7498	8,8 км, запад	32,8 (14)	13
9	69,3489	87,7691	7,7 км, запад	49,1 (20)	19
10	69,3263	87,8781	3,1 км, запад	36,2 (15)	70
11	69,5431	88,4556	31 км, северо-восток	27,3 (11)	67*
12	69,5604	88,2108	27 км, северо-восток	15,7 (7)	14
13	69,5401	88,2911	27 км, северо-восток	18,5 (8)	20
14	69,5049	88,3394	24,7 км, северо-восток	11,0 (5)	21
15	69,4788	88,4242	24,8 км, северо-восток	13,8 (6)	8
16	69,4160	88,2932	16,4 км, северо-восток	131,0 (55)	5
17	69,3898	88,3645	17,3 км, восток	10,1 (4)	11
18	69,3746	88,0744	6,8 км, северо-восток	257,0 (107)	59
19	69,3508	88,0751	6,1 км, северо-восток	50,6 (21)	28
20	69,3766	88,3504	16,3 км, восток	8,3 (3)	10
21	69,3534	88,4063	17,9 км, восток	11,3 (5)	19
22	69,3989	87,6109	15,8 км, северо-запад	32,2 (13)	21
23	69,3137	88,0044	2,4 км, юго-восток	55,1 (23)	62
24	69,3316	87,9857	1 км, восток	478,8 (200)	100**

* Расчет не корректен ввиду влияния локального источника выбросов — рудника «Скалистый».

** Условное ориентировочное значение, принятое на основе снегогеохимических данных.

преимущественно в отрицательных формах рельефа — ловушках снега (в ложбинах, впадинах, речных долинах, озерных котловинах и др.). Как и в работе [6], фоновая проба взята нами в долине р. Косой, 57 км западнее металлургического завода «Надежда» и 10 км восточнее г.п. Дудинка. Пробы снега массой не менее 3 кг отбирались кернами из всей толщи снежного покрова с помощью пластиковой трубы диаметром 110 мм. Нижние 5 см кернов отбрасывались во избежание контактного загрязнения снега почвенными частицами. Таяние проб происходило при комнатной температуре, затем они фильтровались через мембранные фильтры МФАС-Б4 (средний диаметр пор 0,22 мкм). Твердые примеси на фильтрах после высушивания в сушильном шкафу при температуре 65 °С до постоянной массы помещались в кварцевые стаканы, взвешивались и озолялись в муфельной печи при температуре 450 °С в течение 1,5 ч. Затем, после охлаждения, взвешивания и растирки они исследовались атомно-эмиссионным методом [9] с определением концентраций 30 XЭ: Si, Al, Fe, Ti, Zr, V, Sc, Nb, Ga, Ca, Na, Mg, Sr, Ba, Be, La, Y, Yb, Co, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Mo, Mn, Sn, B, Zn, P.

Для статистического анализа результатов использовались средства Microsoft Excel, Python [10], для обращения с пространственной информацией и пространственного моделирования — Qgis [11] и Grass [12].

Результаты и обсуждение

Концентрации неорганической (зольной) части твердых примесей снега

Обнаруженные концентрации неорганической (зольной) части твердых примесей лежат в пределах от 2,4 (фоновая проба) до 478 мг/кг снега (1 км на восток от труб комбината «Надежда») (табл. 1). В фоновой пробе концентрация (2,4 мг/кг) близка к пороговой концентрации твердых примесей для «чистого снега» Арктики (2,3 мг/кг снега) [13] и осредненной региональной фоновой концентрации зольной части твердых примесей для юго-востока Западной Сибири (2,8 мг/кг) [14]. Близкие к фоновым значения (превышение < 10 раз) найдены в районе аэропорта Алыкель и в восточной части НПР (гидропорт Валек, микрорайон Оганер, лыжная база «Оль-гуль», район Талнах). Превышение фона в 10–25 раз встречается в разных частях НПР как на небольшом, так и на значительном удалении от металлургических заводов. Площадки с очень высокими концентрациями (превышение фона более чем в 50 раз) локализованы в центральной части НПР протяженностью около 15 км, от металлургического завода «Надежда» на западе до Цементного завода (подразделение ООО «Норильский обеспечивающий комплекс») на востоке,

особенно вблизи указанных предприятий (превышение фона до 200 раз).

Пересчеты концентраций неорганической (зольной) части пыли на суточную пылевую нагрузку с использованием медианы (170 мм) и максимума (263 мм) запаса влаги в снежном покрове за последние 20 лет на дату отбора проб (20 апреля) по данным Норильской метеостанции (<http://aisori-m.meteo.ru/>) показывают, что атмосферное загрязнение в центральной части НПП достигает умеренно-опасного уровня (суточный уровень выпадения пыли 250–450 кг/км²), а вблизи предприятий – опасного уровня (суточный уровень выпадения пыли 450–800 кг/км²) [6].

Концентрации и соотношения ХЭ в зольной части твердых примесей снега

К числу приоритетных загрязняющих ХЭ в НПП мы отнесли те, концентрации которых в золе твердых примесей более чем в три раза превышают кларки для основных вулканитов [15] (табл. 2). Использование этих кларков при расчете кларков кон-

Таблица 2

Базовые статистические параметры концентраций ХЭ в золе твердых примесей ($n = 24$)

Элемент	$C_{\min}$, мг/кг снега	C_{med} , мг/кг снега	$C_{\max}$, мг/кг снега	КВ, %	КК (C_{med} /кларк)
Si	48400	136000	361000	45	0,5
Fe	36100	115000	199000	34	1,4
Al	12100	44800	64700	35	0,5
Ca	17600	27700	70800	40	0,4
Mg	10400	17800	28600	31	0,5
Na	2740	8000	14700	44	0,4
Ti	871	3730	7630	49	0,5
Ni	503	3160	6520	47	47,7
Cu	449	1790	3780	50	25,1
Mn	484	1050	1580	26	0,7
Co	48,5	464	1750	73	15,6
P	213	409,5	1770	62	0,4
Zn	156	362	1880	79	3,3
Ba	77	333	697	50	0,8
Cr	110	250	533	40	1,9
V	56	136	199	27	0,6
Sr	40	113	248	45	0,2
Pb	24	95,1	486	72	9,7
Zr	44	80	132	34	0,7
Sn	3	28	177	90	11,3
B	15	28	2460	363	3,4
Y	9	15	28	31	0,6
Ga	8	15	25	28	0,6
Cd	0,9	8,8	167	174	23,4
La	2	7	13	43	0,4
Sc	1,5	6,1	10,2	42	0,2
Nb	2,1	4,6	7,4	31	0,5
Mo	0,3	2,2	21,5	121	1,6
Yb	1,2	2,0	3,3	31	0,8
Be	0,5	0,7	1,3	31	0,6

Примечание. $C_{\min}$ – минимум; C_{med} – медиана; $C_{\max}$ – максимум; КВ – коэффициент вариации.

центрации ($КК = C/\text{кларк}$) обусловлено литолого-геохимическими особенностями горных пород НПП, формированием почв на продуктах выветривания базальтовых траппов [16]. Медианы КК показывают, что в целом для НПП приоритетными загрязняющими ХЭ являются Ni ($КК = 48$), Cu (25), Cd (23), Co (16), Sn (11), Pb (10), B (3,4) и Zn (3,3). Кларки основных вулканитов превышены, но менее чем в три раза, по Fe, Cr и Mo. Медианы выборочных концентраций Ni, Cu, Cd, Co, Pb, Zn в золе твердых примесей снега в несколько раз превышают принятые и рекомендуемые нормативы их содержания в почвах [17, 18]. Определенный нами перечень приоритетных загрязняющих ХЭ существенно отличается от перечня из работы [6], где в него, по нашему мнению, ошибочно включены барий, стронций, титан, марганец и не включены свинец и олово.

Из приоритетных загрязняющих ХЭ только никель, медь и кобальт входят в число производимых «Норникелем» металлов.

Используемая для производства этих металлов руда обогащена относительно кларков основных вулканитов Cd (до 100 раз), Zn, Sn (до 7 раз), Pb (до 11 раз) и Cr (до 6 раз) [19], что отчасти объясняет повышенные концентрации этих ХЭ в золе твердых примесей снега. Одним из источников бора может быть используемый на предприятиях НПП уголь Кайерканского разреза, поскольку бор относится к углефильным элементам примесей [20], но сведений о его концентрациях в местном угле, как и в Норильских рудах, нами не найдено. Источником бора также может быть Талнахская обогатительная фабрика, поскольку вблизи нее (пробная площадка № 13) обнаружена его максимальная концентрация (2460 мг/кг золы твердых примесей). Вероятно, соединения этого элемента используются в технологии обогащения руды.

Анализ нормированных концентрации ХЭ методом главных компонент с использованием ковариационной матрицы показал, что в пространстве первых двух компонент (в сумме – 98,6% дисперсии концентраций элементов) явно выделяется группа элементов, связанных с металлургическим производством: Ni, Co, Fe, Ga (рис. 1). Достаточно компактную группу также образуют литофильные породообразующие элементы: Na, Si, Al, Ti, Mg.

Сильное удаление и диагональное размещение указанных групп на графике нагрузок указывает на отрицательные корреляционные связи между элементами этих групп, что подтверждается коэффициентами их парных корреляций (табл. 3).

Кластерный иерархический анализ показал первоочередное отделение кластера элементов Cd, Pb, Sn, B, Zn от остальных (рис. 2). Для элементов этого кластера характерны очень высокие коэффициенты варьирования концентраций (от 72 до 363%), что объясняется присутствием в выборке единичных проб с крайне высокими концентрациями этих ХЭ (на 1–2 порядка выше медианных значений) и указывает на присутствие локальных аномалий, не связанных с выбросами металлургических заводов.

В пределах рассматриваемого кластера положительные корреляции концентраций наблюдаются

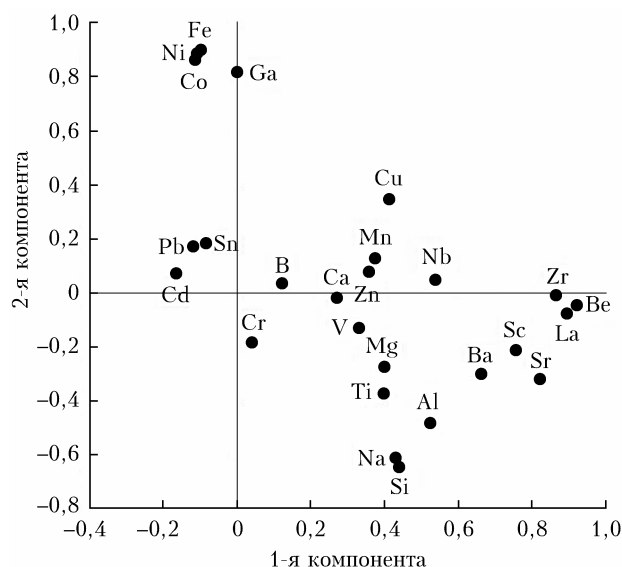


Рис. 1. Положение химических элементов в пространстве главных компонент

в парах Pb–Sn ($r = 0,6$) и B–Zn ($r = 0,7$), что указывает на сходство источников их поступления в снег.

На высоком уровне различий также выделяется кластер железа, никеля, кобальта и галлия, что согласуется с результатами анализа методом главных компонент и корреляционного анализа (табл. 3) и свидетельствует о том, что эти ХЭ находятся преимущественно в составе одних и тех же минералов.

Любопытно, что медь не попала в этот кластер и коэффициенты корреляции между ее концентрациями и концентрациями никеля, кобальта, железа и галлия низкие. Причины этого могут быть следующие: во-первых, медь поступает не только с выбросами «Надежды», другой, вероятно, более мощный ее источник – Медный завод, где перерабатывается

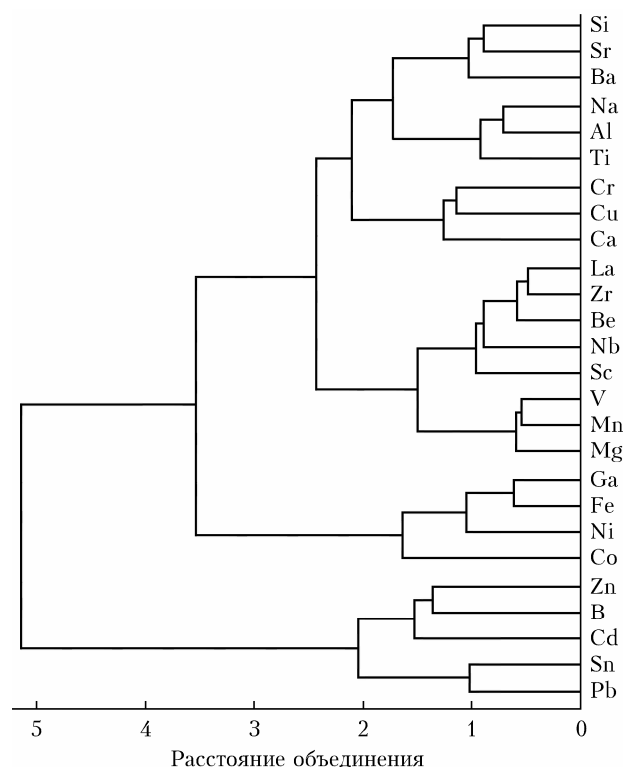


Рис. 2. Диаграмма результатов кластерного анализа нормированных концентраций ХЭ (кластеризация по методу Варда, мера близости – евклидово расстояние)

медный концентрат с обогатительных фабрик и анодная медь с «Надежды»; во-вторых, в отличие от никеля, железа и кобальта значительная часть меди выбрасывается в атмосферу в ионной форме, а затем в разной мере сорбируется твердыми частицами атмосферного аэрозоля в зависимости от их количества и сорбционной емкости. В пользу этого свидетельствует обнаруженная нами ранее в пределах

Таблица 3
Матрица парных корреляций между концентрациями ХЭ в неорганической (зольной) части твердых примесей снега

Элемент	Fe	Ni	Co	Ga	Sn	Cu	Pb	Zn	B	Cr	Cd	Mo	Ti	Mg	Al	Si
Ni	0,76															
Co	0,68	0,67														
Ga	0,75	0,49	0,76													
Sn	0,35	0,20	0,40	0,41												
Cu	0,17	0,42	0,02	0,05	0,18											
Pb	0,10	0,17	0,06	0,08	0,60	0,33										
Zn	0,01	0,04	-0,23	-0,06	-0,14	0,58	0,40									
B	-0,08	0,08	-0,23	-0,14	-0,29	0,29	0,28	0,79								
Cr	-0,25	-0,16	-0,55	-0,32	-0,02	0,44	0,42	0,48	0,33							
Cd	-0,04	0,05	-0,07	-0,11	-0,21	0,06	0,29	0,36	0,56	0,09						
Mo	-0,46	-0,35	-0,33	-0,16	-0,23	0,19	0,22	0,46	0,19	0,40	0,15					
Ti	-0,45	-0,64	-0,53	-0,23	-0,30	-0,18	0,01	0,25	0,33	0,07	0,30	0,41				
Mg	-0,30	-0,47	-0,67	-0,28	-0,35	0,32	-0,07	0,47	0,36	0,61	0,15	0,24	0,54			
Al	-0,45	-0,65	-0,55	-0,26	-0,40	-0,08	-0,11	0,31	0,35	0,14	0,26	0,33	0,90	0,72		
Si	-0,32	-0,53	-0,58	-0,31	-0,35	0,15	-0,18	0,34	0,31	0,25	0,12	0,12	0,70	0,86	0,87	
Na	-0,57	-0,78	-0,56	-0,23	-0,21	-0,13	-0,04	0,17	0,15	0,09	0,06	0,47	0,88	0,57	0,84	0,74

Примечание. Полужирным выделены коэффициенты корреляции, значимые с вероятностью (γ) 0,99.

зоны основного выпадения грубодисперсных пылеаэрозольных выбросов НПП повышенная доля растворенной меди от общего содержания в снеге (в среднем 36%) по сравнению с кобальтом (27%), никелем (8%) и железом (2%) [21].

Таким образом, анализ методом главных компонент, кластерный и корреляционный анализы отчетливо выявили техногенную «металлургическую» ассоциацию ХЭ (Ni–Co–Fe). Для них в отличие от остальных приоритетных загрязняющих ХЭ прослеживаются зависимость концентраций от расстояния до металлургического завода «Надежда» и существенные отрицательные корреляции ($r = -0,5 \div -0,8$) с породообразующими литофильными элементами (Si, Al, Na, Ti, Mg, табл. 3). По всей видимости, никель, кобальт и железо, в отличие от других загрязнителей, поступают в атмосферу и снег преимущественно в составе пылеаэрозоля выбросов именно этого производства. По соотношениям между концентрациями ХЭ «металлургической» ассоциации и концентрациями породообразующих литофильных элементов (Ni/Si, Ni/Al, Ni/Ti, Ni/Na, Ni/Mg, Co/Si, Co/Al, Co/Ti, Co/Na, Co/Mg, Fe/Si, Fe/Al, Fe/Ti, Fe/Na, Fe/Mg) можно судить о доле выбросов «Надежды» в составе неорганической части твердых примесей снега. При приближении к заводу эти соотношения увеличиваются. Максимальные значения большинства из них найдены в пробе с площадки № 24, взятой в непосредственной близости от завода.

Предположив, что около 100% твердых примесей в пробе № 24 — материал, поступивший с выбросами «Надежды», мы рассчитали относительно нее вклад выбросов завода в примеси снега для каждой из остальных проб по формуле

$$\frac{R_i}{R_{\max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_i — отношение концентрации одного из ХЭ металлургической ассоциации (Ni, Co, Fe) к концентрации одного из литофильных элементов (Si, Al, Na, Ti, Mg) в неорганической (зольной) части твердых примесей i -й пробы снега; $R_{\max}$ — отношение концентраций для этой же пары ХЭ в золе твердых примесей из пробы № 24, где вклад выбросов завода «Надежда» в примеси снега условно принят за 100%. По сути, это аналог формулы расчета коэффициента обогащения [22], в котором вместо данных о фоновом материале использованы данные по наиболее загрязненной выбросами завода «Надежда» пробе, а полученный результат выражен в процентах.

Частные оценки вклада выбросов «Надежды» по каждой паре загрязняющий элемент/литофильный элемент существенно различаются, коэффициенты их варьирования для большинства проб превышают 33%, в связи с чем для общей оценки использовались медианы, а не средние значения частных оценок (табл. 1, колонка 6).

Рассчитанные медианные значения вклада выбросов завода «Надежда» в неорганическую (золь-

ную) часть твердых примесей снега закономерно снижаются с увеличением расстояния от источника выбросов (рис. 3). Это снижение наилучшим образом описывается степенной функцией $R^2 = 0,52$. Концентрация неорганической (зольной) части твердых примесей в снеге также падает с увеличением расстояния от производства, но не столь явно. На восток от «Надежды» в пределах 17 км, где расположено множество различных источников пылеаэрозольного загрязнения территории, концентрация очень изменчива, на большем расстоянии — низкая.

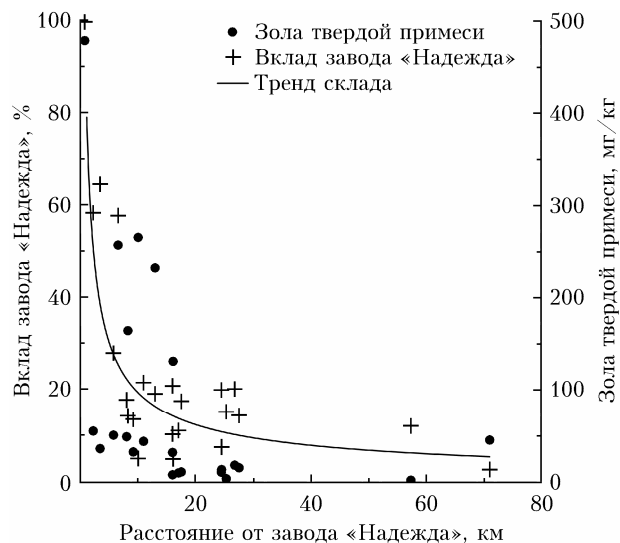


Рис. 3. Концентрация неорганической (зольной) части твердых примесей и доля в ней выбросов металлургии

В пределах обследованной территории преобладание выбросов завода «Надежда» в составе неорганической (зольной) части твердых примесей снега наблюдается на расстоянии до 7 км от завода, что соответствует радиусу выпадения 90% грубодисперсной фракции техногенного аэрозоля по оценке А.А. Онучина с соавт. [5]. На большем расстоянии вклад выбросов «Надежды» не превышает 22%. Единственное исключение — площадка № 11 в районе Талнах, находящаяся в зоне локального воздействия рудника «Скалистый», где, вероятно, вследствие загрязнения снега частицами руды расчетный вклад выбросов металлургии оказался неправдоподобно высоким (67%). Поэтому при построении пространственных моделей эта точка нами не учитывалась. Также необходимо отметить, что показанные выше пространственные закономерности некорректно экстраполировать в северном и северо-западном направлениях от завода «Надежда», поскольку эта часть прилегающей к предприятию территории осталась необследованной. Северо-западнее «Надежды» преобладание ее выбросов в составе твердых примесей снега, вероятно, будет сохраняться на значительно большем расстоянии, поскольку именно на северо-запад они чаще всего переносятся ветром в зимний период, а других локальных источников загрязнения там нет.

Пространственная экстраполяция результатов снегосъемки позволила ориентировочно оценить степень и характер загрязнения снежного покрова в районе Норильска. Правдоподобные пространственные модели изменения концентраций неорганической (зольной) части твердых примесей в снеге были получены методами нерегулярных триангуляционных сетей (TIN) и сплайна, в частности методом В-сплайна (рис. 4). Наибольшая концентрация примесей металлургического происхождения наблюдается вокруг основных источников этого загрязнения — завода «Надежда» и отчасти — Медного завода.

завод. Ореол загрязнения примесями не металлургического происхождения, учитывая обилие и разнообразие источников, вероятно, гораздо сложнее полученной нами модели.

Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Вклад выбросов металлургического завода «Надежда» в пылеаэрозольное загрязнение НПП отражается в элементном химическом составе неор-

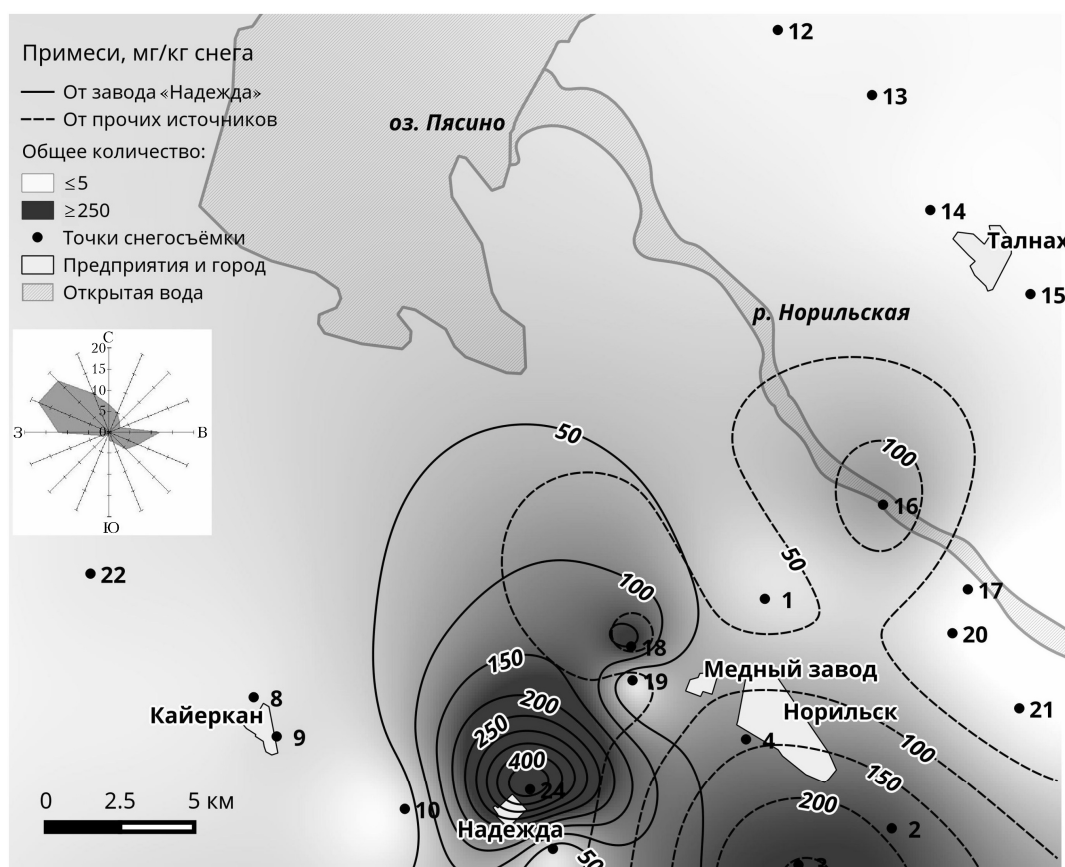


Рис. 4. Результаты экстраполяции В-сплайном концентрации неорганической (зольной) части твердых примесей, мг/кг снега

Модельный «компактный» ореол этого загрязнения несколько вытянут на север, в сторону оз. Пясино, что согласуется с преобладающими направлениями ветра в зимний период и результатами численного моделирования полей выпадения никеля и свинца от Медного завода в зимний период [23, 24], но требует уточнения ввиду отсутствия у нас снегеохимических данных для этой части зоны воздействия.

Источники и ореолы распространения неметаллургического загрязнения не имеют одной явной локализации, но в целом смещены восточнее и юго-восточнее источников и ореолов преобладающего распространения металлургических выбросов, ближе к административной и жилой зонам г. Норильска. Наиболее мощный из них, по-видимому, цементный

ганической (зольной) части твердых примесей снега. Он положительно коррелирует с концентрациями «металлургических» элементов (Ni, Fe и Co) и отрицательно — с концентрациями литофильных элементов (Si, Al, Ti, Na, Mg). По соотношениям между концентрациями «металлургических» и литофильных элементов в неорганической (зольной) части твердых примесей снега возможна количественная оценка этого вклада.

2. В широтном направлении пылеаэрозольное загрязнение снега выбросами металлургического завода «Надежда» преобладает на удалении до 7 км от источника, дальше доминирует загрязнение другого генезиса. Сильное загрязнение неметаллургического происхождения свойственно территории Цен-

трального района г. Норильска, максимально проявляясь южнее него, вблизи Цементного завода.

Список литературы

1. *Vlasova T.M.* The response of lichens to atmospheric pollution in the Siberian Arctic // *Antarctic Sci.* 1992. V. 4, N 4. P. 119.
2. *Игамбердиев В.М., Терешенков О.М., Кутыев Х.А., Попова Е.Н.* Оценка современного состояния природной среды: Норильский промышленный район // *Народное хозяйство Республики Коми.* 1994. № 1. С. 54–61.
3. *Allen-Gil S.M., Ford J., Lasorsa B.K., Vlasova T.M., Landers D.H.* Heavy metal contamination in the Taymyr Peninsula, Siberian Arctic // *Sci. Total Environ.* 2003. V. 301, N 1–3. P. 119–138.
4. *Zhulidov A.V., Roberts R.D., Pavlov D.F., Kämäri J., Gurtovaya T.Y., Meriläinen J.J., Pospelov I.N.* Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex // *Environ. Monitor. Assess.* 2011. V. 181, N 1–4. P. 539–553.
5. *Онушин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В.* Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // *Сиб. эколог. журн.* 2014. Т. 21, № 6. С. 1025–1037.
6. *Кузьминская Н.Ю., Медведев А.И.* Геохимия снежного покрова г. Норильска // *Сб. докл. XIV Междунар. симп. Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер. «Научные Международные симпозиумы «Проблемы экоинформатики»* / под ред. Ф.А. Мкртчяна. М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. С. 263–268.
7. *Ершов Ю.И.* Эколого-геохимическая оценка мерзлотных почв среднесибирского плоскогорья // *Сиб. эколог. журн.* 2014. № 6. С. 975–986.
8. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
9. *Черевко А.С., Морозова А.А.* Многоэлементный атомно-эмиссионный анализ горных пород, почв и зол растений с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона и многоэлементного анализатора эмиссионных спектров // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2022. Т. 88, № 1. С. 49–58.
10. *Van Rossum G., Drake F.L.* Python 3 Reference Manual. Scotts Valley: CreateSpace, 2009. 242 p.
11. *QGIS* QGIS Geographic Information System. QGIS Association. USA, 2022. URL: <http://www.qgis.org> (last access: 26.08.2022).
12. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhrner J.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // *Geosci. Model Dev.* 2015. V. 8. P. 1991–2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
13. *Горюнова Н.В., Шевченко В.П.* Новые данные о распределении и вещественном составе нано- и микрочастиц в снеге Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2013. № 4. С. 71–78.
14. *Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б.* Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 3, № 1. С. 75–81.
15. *Григорьев Н.А.* Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
16. *Ершов Ю.И.* Почвы Среднесибирского плоскогорья. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева, 2004. 86 с.
17. *Биогеохимическая индикация микроэлементов* / под ред. Т.И. Моисеенко. М.: Изд-во РАН, 2018, 386 с.
18. *СанПиН 1.2.3685-21* Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 26.08.2022).
19. *Григорьева А.В., Волков А.В., Мурашов К.Ю.* Редкие и редкоземельные элементы в Cu–Ni рудах Норильского района // *Арктика: экология и экономика.* 2021. Т. 11, № 1. С. 76–89.
20. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.
21. *Ermolov Y.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolpashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolentsev N.B.* Accumulation of chemical elements in the biochemical food chain of the Northern Norilsk Plateau // *Geochem. Int.* 2020. V. 58, N 5. P. 562–573.
22. *Zoller W.H., Gladney E.S., Duce R.A.* Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole // *Science.* 1974. V. 183. P. 198–200.
23. *Ранута В.Ф.* Реконструкция полей длительного техногенного загрязнения местности // *Сб. тр. СибНИГМИ, вып. 105 «Гидрометеорология Сибири».* 2006. С. 129–139.
24. *Леженин А.А., Ранута В.Ф., Ярославцева Т.В.* Численный анализ атмосферной циркуляции и распространения загрязняющих примесей в окрестностях Норильского промышленного района // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 6. С. 467–471; *Lezhenin A.A., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V.* Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transfer in the environs of Norilsk industrial region // *Atmos. Ocean.* Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 565–569.

Yu.V. Ermolov, I.D. Makhatkov, A.S. Cherevko. Contribution of metal industry emissions to dust aerosol pollution of the Norilsk Industrial District according to snow geochemical data.

In 2021, concentrations and elemental chemical composition of the inorganic part of solid snow impurities were studied on the territory of the Norilsk Industrial District. Based on the analysis of these data, a list of priority polluting chemical elements is compiled (Ni, Cu, Cd, Co, Sn, Pb, B, and Zn) and a method for quantifying the contribution of atmospheric emissions from Nadezhda Metallurgical Plant to aerosol pollution of the territory is suggested. In the sub-latitudinal direction, emissions from this plant predominate in dust pollution of the air at a distance of up to 7 km from the source.