

Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района

А. А. ОНУЧИН, Т. А. БУРЕНИНА, О. Н. ЗУБАРЕВА, О. В. ТРЕФИЛОВА, И. В. ДАНИЛОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru*

АННОТАЦИЯ

Определено содержание загрязняющих веществ и их состав в образцах снега. Полученные количественные показатели содержания никеля, меди, других тяжелых металлов и серы использованы для оценки характера пространственного загрязнения снежного покрова в зоне влияния предприятий Норильского промышленного района. Составлены картосхемы распределения тяжелых металлов и серы в регионе. Установлено, что большая часть загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в виде пыли, осаждается на подстилающую поверхность вблизи источников выбросов (на расстоянии до 7 км). Загрязнители, поступающие в атмосферу в виде аэрозолей и газов, переносятся на значительные расстояния. Повышенные по сравнению с фоном концентрации водорастворимых форм серы отмечены на расстоянии более 400 км. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что только 2 % всех выбросов серы осаждаются в радиусе 250 км, а оставшаяся часть серы включается в глобальные геохимические циклы.

Ключевые слова: снежный покров, загрязнение атмосферного воздуха, поллютанты, аэрозоли, техногенные нагрузки.

Снежный покров в условиях высоких широт является одним из наиболее информативных объектов при выявлении техногенного загрязнения природной среды. Это обусловлено продолжительностью его залегания и способностью накапливать и сохранять поллютанты, поступающие из нижних слоев атмосферы на подстилающую поверхность. Индикация состояния природной среды посредством химического состава снежного покрова имеет определенные преимущества по сравнению с другими методами. Так, зондирование состава атмосферного воздуха проводится в ограниченные временные интервалы, а методы биоиндикации не всегда применимы по всей территории из-за отсутствия биоиндикаторов. Результаты апробирования снежного покрова позволяют выполнять зо-

нирование территорий по степени загрязнения и могут служить объяснением масштабных процессов и явлений, протекающих в ландшафтах, подверженных техногенному воздействию. В частности, масштабы отмеченных региональных трендов изменения атмосферных осадков [Онучин, Мусохранова, 2013] могут быть интерпретированы с позиций степени и характера загрязнения снежного покрова.

Химический состав снежного покрова формируется в результате поступления различных химических элементов с выпадающими атмосферными осадками, поглощения снежным покровом из нижних слоев атмосферы газов, водорастворимых аэрозолей, а также за счет взаимодействия с ним твердых пылевых частиц, накопленных за период фор-

мирования снежного покрова [Василенко и др., 1985]. В свою очередь, талые воды могут явиться источником вторичного загрязнения других компонентов природных экосистем [Систер, Корецкий, 2004].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор проб снега проводился в течение трех лет (2002–2004 гг.) в период максимальных снеготолщин (вторая половина апреля) снегомером ВС-43 высотой 60 см и площадью поперечного сечения 50 см². В каждом пункте образцы снега отбирались (в соответствии с РД 52.04.186-89) в трехкратной повторности в вершинах равностороннего треугольника со стороной 10 м. Пробы брались со всей глубины залегания снежного покрова. На участках, где высота снежного покрова превышала 60 см, в снежной толще прорезались шурфы, а отбор пробы проводился в несколько приемов. Образцы герметично упаковывались в полиэтиленовые пакеты, снабжались маркерной биркой. Всего в анализ включено 108 пунктов отбора образцов снега, при этом в 2002 г. образцы снега взяты на 57 пунктах, в 2003 и 2004 гг. – на 64 и 24 снегомерных пунктах соответственно. На девяти снегомерных пунктах, которые позиционировались как мониторинговые, образцы отбирались ежегодно, на 24 пунктах – дважды, и на 75 – только в одном году из всего трехлетнего ряда наблюдений.

В минимально возможные сроки образцы снега доставлялись в лабораторию, растапливались при комнатной температуре, затем определялся общий объем талых вод. Для оценки твердого осадка или концентрации пыли талые пробы снега фильтровали через бумажные фильтры “зеленая лента”, предварительно высушенные и взвешенные. Фильтры с твердой фракцией поллютантов высушивались в сушильном шкафу до абсолютно сухого веса, после чего определялась масса твердой фракции поллютантов с точностью до 0,1 мг. После этого фильтры с твердым осадком и фильтраты талой снеговой воды отправлялись в химическую лабораторию для определения элементного состава образцов.

На основе данных по запасам воды в снежном покрове и концентрации твердых и

водорастворимых веществ в 1 л снеговой воды определялись интегральные нагрузки поллютантов, приходящиеся на единицу площади [Волкова, Давыдова, 1987]. С учетом продолжительности залегания снежного покрова рассчитывались средние величины нагрузок за различные интервалы времени.

Дальнейшая статистическая обработка и анализ данных проводились посредством стандартного программного обеспечения “STATISTICA-5”, “Microsoft Excel”. Карты, отображающие пространственное распределение поллютантов в снежном покрове и расчет их количества по зонам загрязнения составлялись с помощью метода планиметрирования [Швер, 1984] в программной среде ArcGIS 10.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассеивание и седиментация пылевых частиц определяется как их фракционным составом, так и условиями погоды, которая формируется на этой территории, т. е. с определенной синоптической ситуацией. Исследование пространственной динамики содержания пыли в снеге показали, что шлейфы пылевых нагрузок имеют ориентацию на северо-запад и юго-восток от г. Норильска, что в целом согласуется с характером ветрового режима. Преобладающими направлениями ветра в зимнее время являются юго-восточное, восточное и западное, а в летний период – северо-восточное и северное. Среднемесячная скорость ветров колеблется от 3,2 до 9,4 м/с. Зимой скорость ветра увеличивается вследствие активной циклонической деятельности. Согласно анализу ветрового режима, за период исследований (по метеостанции Норильск) среднемесячные скорости не превышали 8 м/с, а доля ветров юго-восточного направления увеличилась до 40 % (по сравнению со среднемноголетней величиной 25 %) за счет снижения повторяемости ветров восточного и западного направлений на 10–13 % и 5–7 % соответственно. Частицы более крупных фракций в первую очередь начинают выпадать из дымовых выбросов, формируя пылевые аномалии высокой концентрации. Результаты исследований указывают на то, что грубодисперсная фракция

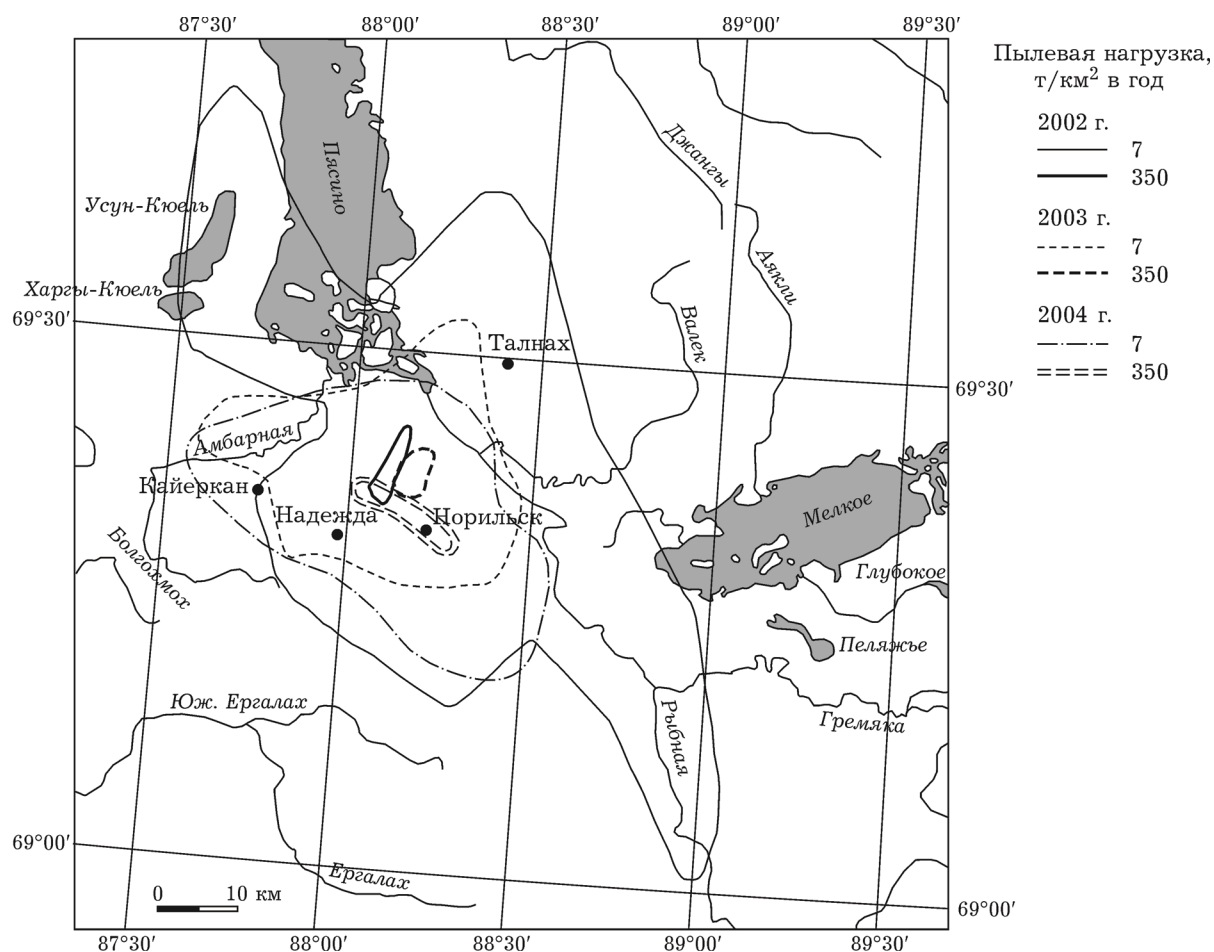


Рис. 1. Сравнение пространственного распределения пылевых нагрузок по годам

техногенных аэрозолей, в том числе и промышленной пыли, имея большую скорость седиментации, осаждается в основном в радиусе 40 км от источников загрязнения, при этом более 90 % – в радиусе до 7 км (рис. 1).

Сравнивая пространственное распределение пылевых нагрузок по годам, необходимо отметить следующее. По сравнению с 2002 г. в 2003 и 2004 гг. существенно уменьшилась площадь, ограниченная изолинией 7 т/км² в год, в основном за счет сокращения шлейфов северо-западного и юго-восточного направлений. Зона с пылевой нагрузкой свыше 350 т/км² в 2003 г. сместилась к востоку, а в 2004 г. – к юго-востоку (см. рис. 1). В зимний сезон 2003–2004 гг. более чем в два раза увеличилась доля ветров северо-западного направления по сравнению с двумя предыдущими годами, что, вероятно, стало одной из причин изменения ориентации шлей-

фа повышенных пылевых нагрузок, ограниченных изолинией 350 т/км² в год.

В целом различия в характере пространственного распределения поллютантов, очевидно, не могут быть объяснены только особенностями ветрового режима. Зависимости между метеорологическими элементами и уровнем загрязнения атмосферного воздуха очень сложны и не всегда проявляют себя как прямые корреляционные связи, так как из комплекса взаимосвязанных явлений вычлени роль одного из факторов чрезвычайно трудно.

Суммарные нагрузки осаждаемой из воздуха пыли по всем годам очень близки и варьируют в пределах от 43 до 47 тыс. т в год. Суммарная пылевая нагрузка на обследованной территории более чем в два раза превышает объем годовых выбросов пыли в атмосферу предприятиями ОАО «ГМК «Норильский никель»» [Государственный доклад...,

Т а б л и ц а 1

Пылевая нагрузка в различных пунктах, прилегающих к Норильскому промышленному району в 2002–2004 гг.

Год исследования	Интервал статистических показателей		
	средняя масса пыли, кг/км ² в сутки	стандартное отклонение, кг/км ²	коэффициент вариации, %
Пункты с преимущественным загрязнением промвыбросами			
2002	23–1419	2–855	2–112
2003	11–1881	4–824	11–92
2004	19–1533	2–454	9–30
Пункты с преимущественным загрязнением продуктами техногенной дефляции			
2002	4449–7480	1667–1959	29–37
2003	388–11195	132–5062	25–46
Пункты с преобладанием пылевых нагрузок, обусловленных природным атмосферным фоном			
2002	1–13	1–4	39–53
2003	1–13	1–10	5–105
2004	2–27	0,4–17	3–129
Пункты преимущественного загрязнения продуктами естественной дефляции			
2002	17–142	13–127	18–89
2003	17–214	3–39	18–133

2004]. Эти противоречия объясняются как методическими сложностями разделения атмосферной и дефляционной пыли, которая не учитывается официальной статистикой, так и наличием неучтенных источников атмосферного пылевого загрязнения, например, автотранспорта.

В более ранних работах [Савченко и др., 1992; Савченко, 1998] при составлении схем распределения пылевых нагрузок в Норильском промышленном районе (НПР) не принималось попыток отразить их генезис, а без этого невозможна разработка эффективных природоохранных мероприятий, направленных на снижение отрицательных последствий техногенного загрязнения.

В результате проведенных исследований установлено, что источниками пылевого загрязнения снежного покрова наряду с промвыбросами предприятий ГМК “Норильский никель” являются продукты дефляции с карьеров, хвостохранилищ и других техногенных объектов. Анализ полученных результатов позволил по генезису и характеру пылевых нагрузок условно дифференцировать участки, на которых проводились исследования, на четыре группы.

К первой группе отнесены участки, пылевая нагрузка которых обусловлена в основном промышленными выбросами. Вторая группа – участки с преобладанием продуктов дефляции твердых частиц различных промышленных объектов. Снегомерные пункты, расположенные на участках двух первых групп, находятся в непосредственной близости от предприятий ГМК “Норильский никель”, и поэтому загрязняются преимущественно техногенной пылью. К третьей группе отнесены участки, пылевые нагрузки на которых минимальны и обусловлены природным атмосферным фоном, а в четвертую группу включены пункты, на которых отмечено повышенное содержание пыли за счет естественной дефляции с бугров пучения, береговых откосов и т. д. Объекты двух последних групп находятся на значительном удалении от источников техногенного загрязнения атмосферы и пылевые нагрузки на них обусловлены осаждением твердой фракции аэрозолей в основном терригенного происхождения.

Результаты трехлетних наблюдений за пылевыми нагрузками в районе исследований сведены в табл. 1. Анализ полученных данных свидетельствует о незначительной

Т а б л и ц а 2

Распределение пылевой нагрузки на снежный покров в районе исследования по данным 2004 г.

Среднесуточная пылевая нагрузка, кг/км ²	Площадь пояса, км ²	Суммарная нагрузка на пояс, тыс. т в год
1000	26,3	9,6
750	58,6	16,0
300	45,8	6,3
175	93,8	6,0
75	166,0	4,5
35	365,3	4,7
Итого	755,9	47,1

межгодовой вариации пылевых нагрузок. В порядке убывания количества пыли на единицу площади участки, различающиеся по генезису пылевых нагрузок, выстраиваются в следующий ряд: дефляционная пыль с промышленных объектов, промвыбросы в атмосферу, естественная дефляция, природный атмосферный фон.

Картирование пылевых нагрузок по количественным показателям позволило выделить пояса загрязнения, ограниченные соответствующими изолиниями. Количественная оценка поступления твердых фракций атмосферного аэрозоля давалась для каждого выделенного пояса и в целом для зоны загрязнения ограниченной изолинией 20 кг/км² в сутки. Такое ограничение обусловлено величиной природного фона пылевых атмосферных нагрузок, которые варьируют в пределах от 1 до 27 кг/км² в сутки. Полученные результаты сведены в табл. 2.

В 2003 и 2004 гг., по сравнению с 2002 г., увеличились площади поясов с высокими нагрузками и уменьшились с низкими. Соответственно, изменилось распределение пылевых нагрузок по поясам. Это, вероятно, связано с метеорологической ситуацией, определяющей рассеивающую способность атмосферы [Селегей, Юрченко, 1990; Аргучинцев и др., 1993; Визенко, 1993]. Судя по характеру пространственного распределения пылевых нагрузок, в 2002 г. рассеивающая способность атмосферы была выше, чем в последующие два года, когда большая часть пылевых выбросов осаждалась в непосредственной близости от источников загрязнения.

Химический состав природной пыли по сравнению с техногенной характеризуется практически полным отсутствием серы. В то же время по сравнению с техногенной пылью в природной увеличена доля терригенных элементов – кальция и цинка, имеющих естественное происхождение (рис. 2).

Максимальной миграционной способностью обладают газовой-аэрозольные выбросы загрязняющих веществ, составляющие подавляющую часть всех выбросов в атмосферу предприятий НПП, что обуславливает широкое площадное распространение соединений серы, солей и водорастворимых форм металлов.

Известно, что на поверхности твердой и во внутреннем объеме жидкой дисперсной фазы атмосферных аэрозолей происходят различного рода фотохимические реакции, скорость которых во многом определяется удельной площадью поверхности образующих

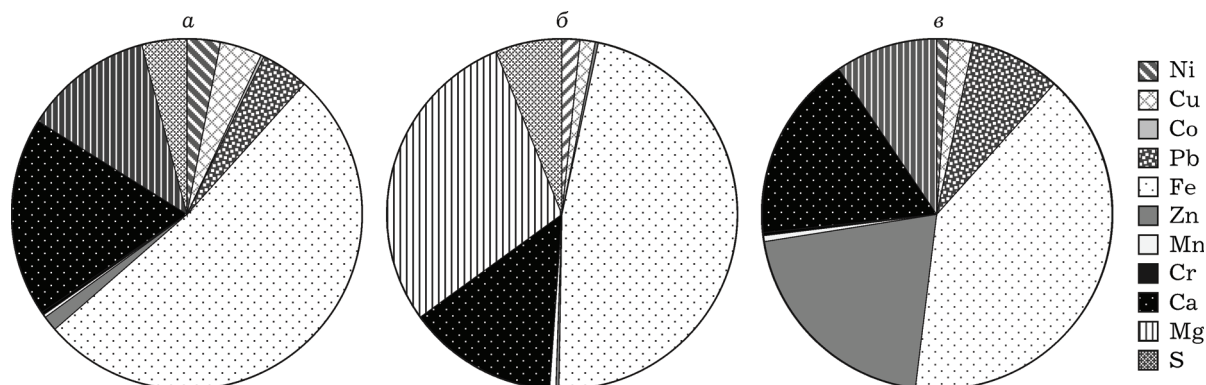


Рис. 2. Химический состав пыли в различных зонах: а – зона преимущественного загрязнения промвыбросами; б – зона загрязнения продуктами техногенной дефляции; в – зона природного фона пылевых нагрузок

частицы компонентов и условиями окружающей среды (содержания в воздухе водяного пара, других газов и т. п.). В результате таких реакций изменяются физические, химические и токсикологические характеристики аэрозольных частиц. Так, значительная часть меди, никеля и свинца, поступающая в атмосферу в составе нерастворимых форм, по мере переноса воздушными потоками аэрозолей практически полностью переходит в водорастворимую форму. Этому, вероятно, способствует постепенное накопление на аэрозольных частицах кислот, вымывающих металлы из минеральных матриц [Исидоров, 2001]. Появление растворимых форм тяжелых металлов и их осаждение в результате седиментации частиц аэрозоля или подоблачного вымывания – фактор экологически неблагоприятный, поскольку высокую токсичность проявляют как раз ионные формы металлов, обладающие наибольшей подвижностью.

Как известно, особенности пространственного распределения поллютантов зависят от комплекса факторов. Прежде всего, это физико-химические свойства загрязнителей атмосферного воздуха, определяющие особенности их миграции и осаждения из воздушного потока, интенсивность и ритмичность работы промышленных предприятий – источников выбросов, их местоположение, температура пылегазового выброса. На условия воздушной миграции и седиментации поллютантов существенное влияние оказывают и природные факторы, такие как рельеф, скорость и направление ветра, инверсии и прочие атмосферные процессы [Волкова, Давыдова, 1987; Селегей, Юрченко, 1990; Аргучинцев и др., 1993; Ивлев, 1982; Учватов, 1993].

Анализ полученных результатов показал, что характер пространственного распределения нерастворимых форм меди (рис. 3, а) и других тяжелых металлов, за исключением свинца, хорошо согласуется с общей схемой пылевых нагрузок. В то же время поля концентраций водорастворимых форм этих элементов в меньшей степени обусловлены особенностями ветрового режима и по форме приближаются к концентрическим окружностям (см. рис. 3, б). Характерно, что изолиния нагрузки для меди в 5 кг/км^2 в год в северо-западной части поля загрязнения оги-

бает оз. Пясино, что может объясняться особенностями формирования барических полей над акваторией озера. Несмотря на меньшую абсолютную величину нагрузок водорастворимых форм, они распространяются на большие расстояния от источников загрязнения по сравнению с пылевыми нагрузками.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в пунктах преимущественного загрязнения промвыбросами общее содержание никеля в талой снеговой воде варьирует в пределах от 0,03 до 2,8 мг/л и снижается в 8–30 раз по мере удаления от источников загрязнения, составляя на фоновых участках 0,001–0,4 мг/л. Общее содержание меди в талой снеговой воде для первой группы участков составляет 0,03–25 мг/л, а для второй не превышает 0,2 мг/л. В зоне распространения техногенных пылевых нагрузок в составе нефилтрованных проб талого снега, как правило, преобладает нерастворимая форма меди (77–97 %).

В целом, в зоне преимущественного загрязнения промышленными выбросами за год на один квадратный километр выпадает от 17,5 до 2735 кг меди, 66–99 % данного количества составляет малоподвижная ее форма. На участках с относительно низкой пылевой нагрузкой в результате подоблачного вымывания на 1 км^2 земной поверхности осаждается от 0,05 до 56 кг меди. Доля водорастворимой формы здесь значительно выше, чем на участках, расположенных в непосредственной близости от промышленных объектов, и варьирует в пределах от 21 до 75 %.

Характер пространственного распределения нерастворимых и водорастворимых форм других тяжелых металлов, включая никель, кобальт, кадмий и ртуть аналогичен таковым для меди, в то время как пространственное распределение свинца имеет существенные отличия. Содержание свинца в образцах талой снеговой воды, отобранных в зоне распространения пылевых нагрузок, изменяется в пределах 0,002–0,11 мг/л, для участков с относительно низкими пылевыми нагрузками – 0,00001–0,002 мг/л. В течение года на один квадратный километр подстилающей поверхности данных зон выпадает свинца от 1 до 24,5 кг и от 0,02 до $1,5 \text{ кг/км}^2$ соответственно. При этом, если на участках первой группы на долю подвижных форм свинца при-

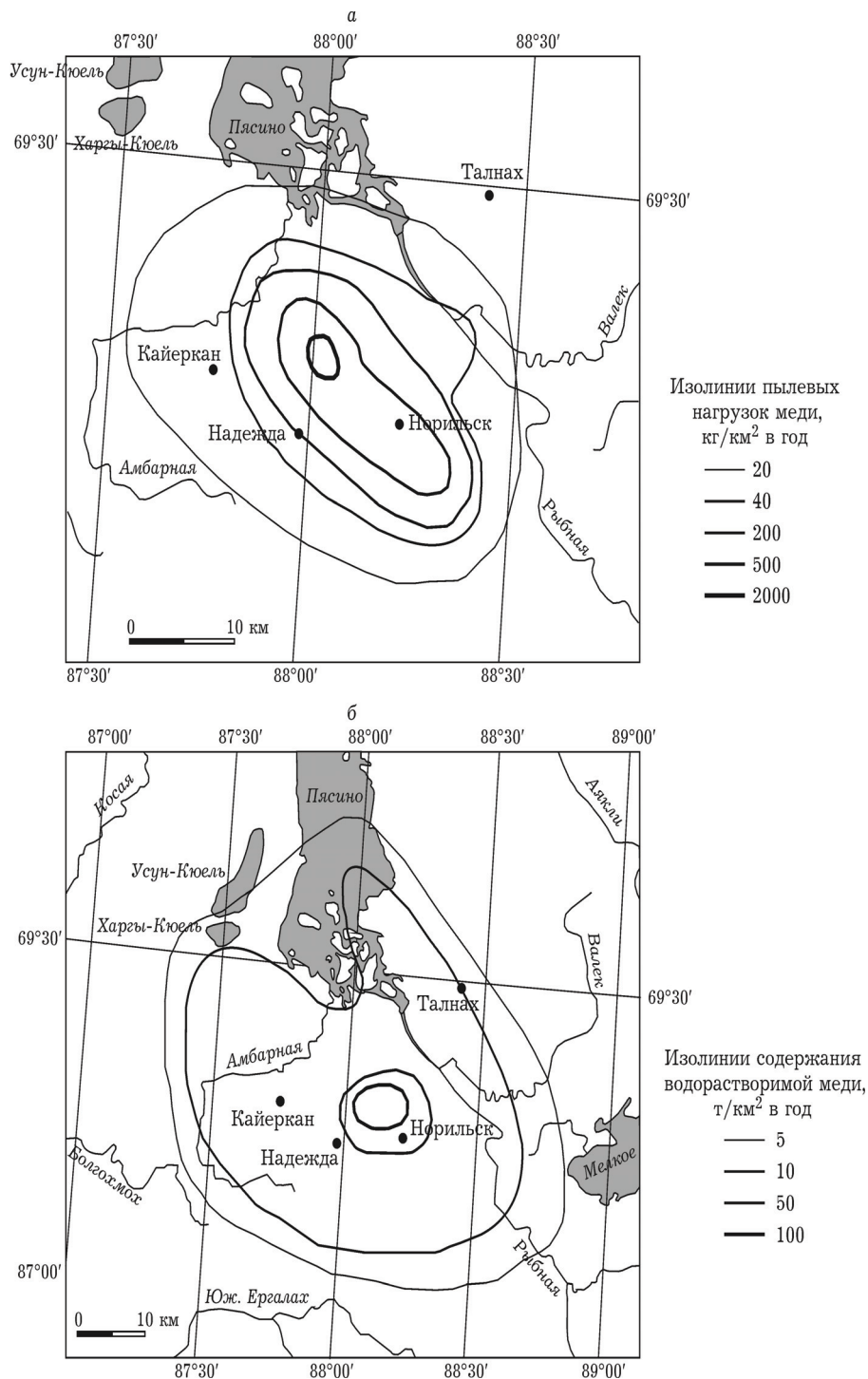


Рис. 3. Картограммы распространения меди с атмосферной пылью (а) и водорастворимых форм меди (б)

ходится 3–20 %, то на участках второй группы – от 6 до 99 %.

Очаговый характер пространственного распределения свинца обусловлен, вероятно, как разнородностью источников его поступления (автотранспорт, авиация, предприятия

цветной металлургии, энергетика и прочее), так и особенностями его сорбции на твердых частицах аэрозоля. По данным В. П. Учватова [1993], широкое варьирование содержания свинца в пыли объясняется тем, что его перенос на значительные расстояния осуще-

ствляется в составе самой тонкой фракции пыли, которая наиболее обогащена микроэлементами. Эти особенности В. Н. Макаров [2002] выделяет в числе основных факторов, определяющих мозаичный характер осаждения свинца.

Аномалии нерастворимых форм свинца приурочены к основным промышленным предприятиям ОАО ГМК «Норильский никель» – Медному и Никелевому заводам, Надеждинскому металлургическому комбинату, г. Талнаху и аэропорту Валек (рис. 4, а). Характер пространственного распределения водорастворимой, наиболее токсичной, формы свинца, также отличается большей неравномерностью по сравнению с подвижными формами меди и никеля. Кроме того, отмечено повышенное содержание водорастворимых форм свинца в образцах талой снеговой воды, взятых в районах, удаленных от Норильска на десятки и сотни километров, – это Шельмовские острова, устье р. Яктали, бассейн р. Агапа (см. рис. 4, б).

Определенный интерес представляет оценка вариабельности концентрации подвижных форм химических элементов в талой снеговой воде на участках, расположенных вне зоны сильного атмосферного загрязнения. Такая оценка обеспечивает получение информации о содержании различных микроэлементов, в первую очередь тяжелых металлов, в компонентах среды которое обусловлено природным фоном.

Анализ показателей нагрузки тяжелых металлов на фоновых участках выявил значительную изменчивость содержания их водорастворимых форм в талой снеговой воде. По меди на плато Путорана анализируемые показатели варьируют от 0,5 до 5,2 кг/км² в год. Приведенные данные свидетельствуют о том, что нагрузки водорастворимых форм меди на отдельных фоновых участках сопоставимы с таковыми в зоне сильного атмосферного загрязнения. В Приангарье фоновые показатели водорастворимых форм меди находятся в пределах от 0,4 до 0,9 кг/км² в год.

Для выявления причин такой вариабельности и оценки потоков тяжелых металлов в компонентах природной среды необходима постановка специальных экспериментов с экранированием снежного покрова и оценкой

вклада атмосферной и почвенно-геологической составляющих этих потоков. Возможно, причиной повышенного содержания меди в талой снеговой воде является диффузия микроэлементов из близко залегающих рудных тел. Известно, что в гетерогенной системе мерзлого грунта диффузия растворенных соединений осуществляется по незамерзшим пленкам, облегающим частицы грунта, в снежной толще – по жидкоподобной пленке на поверхности кристаллов снега [Макаров и др., 1990]. Повышенные концентрации химических элементов в снежном покрове могут служить основанием для применения геохимических методов поиска и разведки полезных ископаемых в районах проявления таких аномалий. Теоретической основой таких методов служит учение о миграции химических элементов-индикаторов месторождений полезных ископаемых, которое развито В. И. Вернадским, А. Е. Ферсманом и другими геохимиками [Антропова, 1975].

Соединения серы, являющиеся главным загрязнителем в Норильском промышленном районе, поступают в состав атмосферного аэрозоля преимущественно в газообразной форме. Нерастворимая форма серы оседает в зоне седиментации пыли, повторяя очертания шлейфов пылевых нагрузок (рис. 5, а). Наибольшее ее содержание отмечается в пробах снега, отобранных в районе Медного завода.

Основная масса серы, выбрасываемая предприятиями ОАО ГМК «Норильский никель», поступает в атмосферу в форме SO₂ и переносится на значительные расстояния от источника загрязнения. На участки, расположенные под факелом выбросов ежегодно поступает 570–16 899 кг/км² серы, в твердой и водорастворимой формах. По мере удаления от источников загрязнения масса серы, накапливающаяся в снежном покрове, снижается до 46–1743 кг/км². Шлейф повышенных по сравнению с фоном (который по нашим оценкам на севере Красноярского края не превышает 50 кг/км² в год) концентраций водорастворимых форм серы в снежном покрове вытянут в юго-восточном направлении на расстоянии более 400 км (см. рис. 5, б). Поскольку сера в форме газообразных соединений является достаточно подвижным эле-

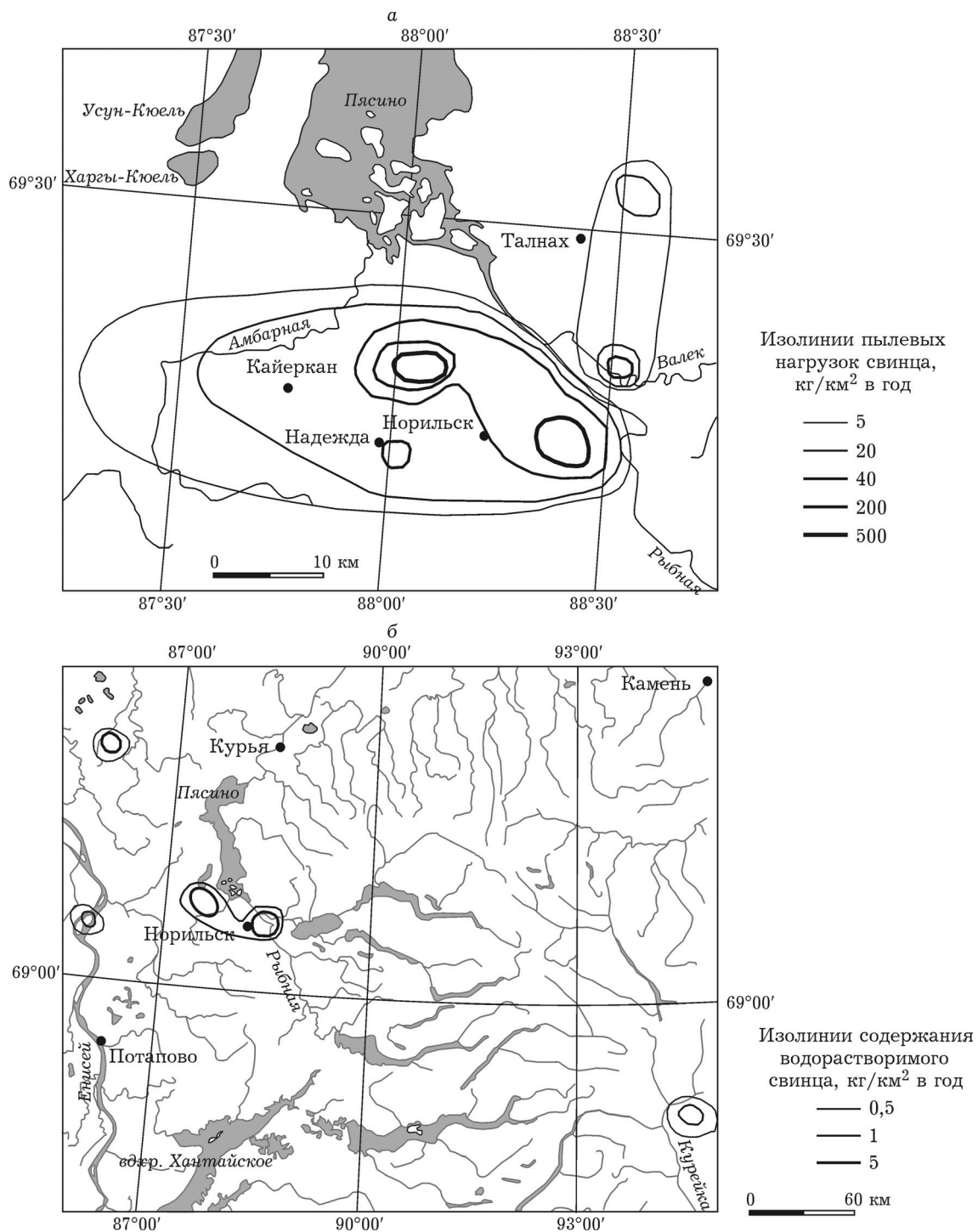


Рис. 4. Картограммы распространения свинца с атмосферной пылью (а) и его водорастворимых форм (б)

ментом, то говорить о природном фоне ее содержания в снежном покрове можно весьма условно. Большая часть промышленных выбросов SO₂, попадая в верхние слои атмосферы, переносится на большие расстояния.

По данным наблюдений сети Росгидромета за загрязнением снежного покрова в 1998–2001 гг. средние величины поступления серы на европейскую часть России составили 420, а на азиатскую – 210 кг/км² в год [Маслова, 2004]. По данным наших измерений, содер-

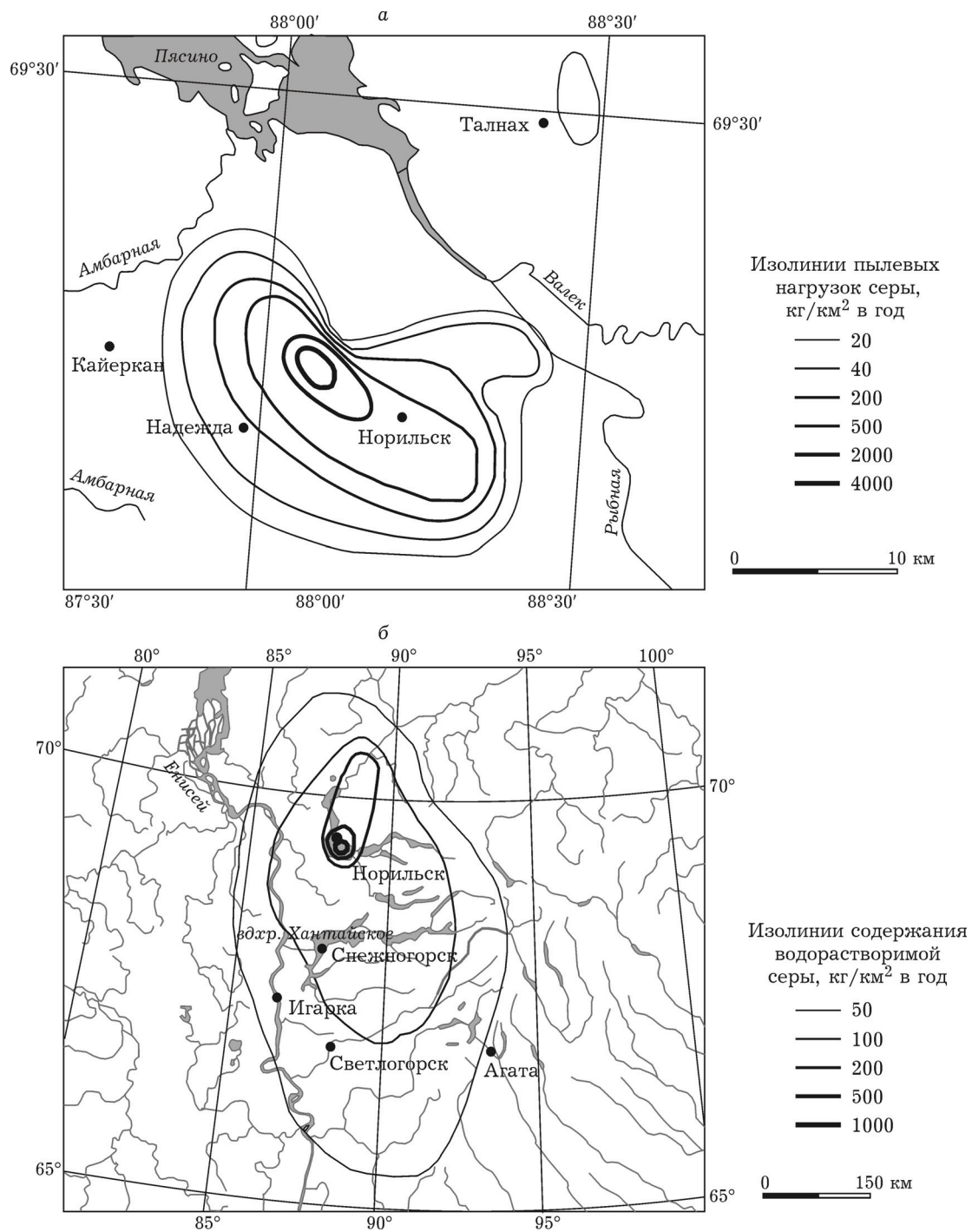


Рис. 5. Картограммы распределения серы с атмосферной пылью (а) и ее водорастворимых форм (б)

жание водорастворимых форм серы в снежном покрове пригородной зоны г. Красноярск составляет 585–714, а в Приангарье 150–170 $\text{кг}/\text{км}^2$ в год.

Суммарная годовая нагрузка водорастворимой серы на территорию, ограниченную

изолинией 50 $\text{кг}/\text{км}^2$ в год с площадью около 180 тыс. км^2 , равна 21,5 тыс. т (табл. 3), что составляет около 2 % суммарных годовых выбросов серы предприятиями ГМК «Норильский никель» [Государственный доклад..., 2004]. Очевидно, что «судьба» остальной ча-

Т а б л и ц а 3

Распределение нагрузки водорастворимой серы в снежном покрове на территории прилегающей к НПП

Средняя годовая нагрузка, кг/км ²	Площадь пояса, км ²	Суммарная нагрузка на пояс, тыс. т в год
5000	50,9	0,25
2500	206,9	0,52
750	644,3	0,48
350	7045,2	2,47
150	66 395,6	9,96
75	103 685,8	7,78
Итого	178 028,7	21,46

сти газообразных соединений серы зависит от многих факторов, что существенно осложняет возможности научно-обоснованного прогноза по вопросам оценки протяженности переноса, скорости фотохимической трансформации, местоположения и площади зоны выпадения “кислотных” осадков [Беликова и др., 1988; Кислотные дожди..., 1989]. В работе В. Н. Макарова с соавт. [1990] отмечается, что в дальний перенос вовлекается 85 % сернистого газа, поступающего с промвыбросами НПП, который затем переходит в сульфаты.

Из доступных литературных источников известно, что выбросы диоксида серы при определенных атмосферных условиях переносятся воздушными потоками на значительные расстояния (более 1000 км) и оседают на больших площадях. Фактически такой перенос оказывает глобальное воздействие на загрязнение атмосферы. [Прохоренко, 2006; www.newscientist.com, 2010].

Интерес к дальнему переносу выбросов диоксида серы от производств НПП проявляют западные исследователи (США, Канада, Норвегия, Швеция), которые занимаются изучением загрязнения воздуха Арктики [Rahn, 1980; Joranger, Ottar, 1984].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты трехлетних исследований показали, что суммарные пылевые нагрузки по всем годам достаточно близки и варьируют в пределах от 43 до 47 тыс. т. Основная

масса промышленной пыли осаждается в радиусе до 30 км от источников загрязнения, при этом 90 % – в радиусе до 7 км. Характер пространственного распределения поллютантов изменяется по годам и связан с условиями переноса воздушных масс и рассеивания промвыбросов.

Установлено, что источниками пылевого загрязнения снежного покрова наряду с промвыбросами предприятий, являются продукты дефляции с карьеров, хвостохранилищ и других техногенных объектов. Поэтому суммарная пылевая нагрузка на обследованной территории более чем в два раза превышает данные официальной статистики, которая учитывает только пылевые выбросы предприятий ОАО ГМК “Норильский никель”.

Выполнено картирование района исследований как по степени пылевых нагрузок, так и по содержанию в снежном покрове водорастворимых и твердых форм различных поллютантов. Установлено, что химический состав природной пыли по сравнению с техногенной характеризуется практически полным отсутствием серы, тогда как доля в ней терригенных элементов – кальция и цинка – существенно выше. Показано, что максимальной миграционной способностью обладают газовой-аэрозольные формы загрязняющих веществ, составляющие подавляющую часть всех выбросов в атмосферу, что обуславливает широкое площадное распространение соединений серы и водорастворимых форм металлов. Вблизи предприятий НПП в составе нефилтрованных талых вод преобладают нерастворимые формы химических соединений, а с удалением от источников выбросов возрастает доля растворимых форм поллютантов.

Анализ полученных результатов показал, что характер пространственного распределения нерастворимых форм меди и никеля, серы и других элементов хорошо согласуется с общей схемой пылевых нагрузок. В то же время поля концентраций водорастворимых форм этих элементов в меньшей степени обусловлены особенностями ветрового режима, и их контуры по форме приближаются к концентрическим окружностям. Существенные отличия от общих закономерностей

в характере пространственного распределения имеют растворимые и нерастворимые формы свинца. Очаговый характер пространственного распределения свинца обусловлен, вероятно, как разнородностью источников его поступления (автотранспорт, авиация, предприятия цветной металлургии, энергетика и др.), так и особенностями его сорбции на твердых частицах аэрозоля.

Концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в талой снеговой воде на фоновых участках существенно варьируют. Нагрузки водорастворимых форм меди на отдельных участках сопоставимы с таковыми на участках, расположенных в зоне сильного атмосферного загрязнения, где действует техногенный фактор. Предполагается, что причиной этого является диффузия микроэлементов из близко залегающих рудных тел. Повышенные концентрации химических элементов в снежном покрове на фоновых участках могут служить основанием для применения геохимических методов поиска и разведки полезных ископаемых в районах проявления таких аномалий.

Шлейф распространения водорастворимых форм серы с концентрацией выше 200 кг/км^2 в год вытянут более чем на 100 км в северном, а с концентрацией выше 50 кг/км^2 – более чем на 400 км в юго-восточном направлении. Суммарная годовая нагрузка водорастворимой серы на территорию, ограниченную изолинией 50 кг/км^2 в год с площадью около 180 тыс. км^2 , равна $21,5 \text{ тыс. т}$, что составляет около 2% валовых выбросов серы предприятиями ГМК “Норильский никель”.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно констатировать, что мониторинг загрязнения снежного покрова в условиях Заполярья является надежным и достаточно эффективным методом оценки техногенного воздействия на природные объекты, а поллютанты, накопленные в снежном покрове, несут потенциальную угрозу вторичного загрязнения других компонентов природных экосистем.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Института леса за помощь в сборе и первичной обработке материалов, А. С. Шишкину, Н.Н. Кошурниковой, Г. В. Пермяковой, О. А. Шапченковой.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 14.В25.31.0031.

ЛИТЕРАТУРА

- Антропова Л. В. Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л.: Недра, 1975. 144 с.
- Аргучинцев В. К., Аргучинцев А. В., Макухин В. Л. Потенциал рассеивания примесей атмосферой Ангарска // География и прир. ресурсы. 1993. № 3. С. 37–43.
- Беликова Т., Василенко В., Дликман И., Назаров И. Дальний перенос загрязняющих веществ и закисление атмосферных осадков // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Л., 1988. Вып. 6. С. 141–147.
- Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. и др. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
- Визенко О. С. Потенциал рассеивающей способности атмосферы Прибайкалья // География и прир. ресурсы. 1993. № 1. С. 64–68.
- Волкова В.Г., Давыдова Н.Д. Техногенез и трансформация ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1987. 187 с.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2002 году. М.: НИА; Природа, РЭФИА, 2004. 224 с.
- Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 368 с.
- Исидоров В. А. Экологическая химия: учебное пособие для вузов. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.
- Кислотные дожди / под ред. Ю. А. Израэль и др. Л., 1989. 270 с.
- Макаров В. Н. Свинец в биосфере Якутии. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. 114 с.
- Макаров В. Н., Федосеев Н. Ф., Федосеева В. И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.
- Маслова И. Я. Экологическое и агрохимическое значение атмосферной серы техногенного происхождения // Сиб. экол. журн. 2004. Т. 11, № 3. С. 377–390.
- Онучин А. А., Мусохранова А. В. Тенденции изменения атмосферных осадков в районе Норильского горно-металлургического комбината // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С. 41–48.
- Прохоренко А. М. Исследование путей переноса загрязненных воздушных масс в Арктику // Успехи современного естествознания. 2006. № 4. С. 73–77.
- РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.
- Савченко В. А. Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 194 с.
- Савченко В. А., Кошубаров В. А., Гребенец В. И., Лоллаев А. Б. Состояние окружающей природной среды в НПП: Отчет НРКОП. Норильск, 1992. 120 с.
- Селегей Т. С., Юрченко И. П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и прир. ресурсы. 1990. № 2. С. 132 – 137.
- Систер В. Г., Корецкий В. Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. М.: Изд-во МГУИЭ, 2004. 159 с.

Учватов В. П. Геохимия тяжелых металлов фоновых и техногенных ландшафтов центра Европейской России // География и прир. ресурсы. 1993. № 3. С. 48–59.

Швер Ц. А. Закономерности распределения количества осадков на континентах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 288 с.

Joranger E., Ottar B. Air Pollution Studies in Norwegian Arctic // Geophys. Res. Lett. 1984. Vol. 11, N 5. P. 365–368.

Rahn K. A., Joranger E., Semb A., Conway T. J. High Winter Concentrations of SO₂ in the Norwegian Arctic and Transport from Eurasia // Nature. 1980. Vol. 287, N 10. P. 824–826.

www.newscientist.com, 2010

Snow Pollution in the Norilsk Industrial Area

A. A. ONUCHIN, T. A. BURENINA, O. N. ZUBAREVA, O. V. TREFILOVA, I. V. DANILOVA

V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS

660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28

E-mail: onuchin@ksc.krasn.ru

The content of pollutants in snow samples and their composition were determined. The obtained data on the contents of nickel, copper and other heavy metals and sulfur were used to assess the patterns of snow cover pollution in the Norilsk industrial area. Maps of spatial distribution of heavy metals and sulfur in the region were compiled. The major part of the pollutants entering the atmosphere in the form of dust was deposited on the underlying surface near the sources of industrial emissions (up to 7 km from them). The pollutants entering the atmosphere in the form of aerosols and gases were transported over considerable distances. Greater concentrations of water-soluble forms of sulfur, compared with the background, were marked at a distance of more than 400 km. Calculations showed that only 2 % of sulfur emissions were deposited within 250 km from the sources of emissions, and the remaining portion of sulfur incorporated into the global geochemical cycles.

Key words: snow cover, air pollution, pollutants, aerosols, technogenic load.

