

Количественная оценка аэротехногенного загрязнения территории Мурманской области (часть 1)

© 2008. Н.Е. Раткин, А.В. Шаблова

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

На основе многолетних исследований по изучению закономерностей аэротехногенного загрязнения снежного покрова и жидких осадков на территории Мурманской области выявлены факторы, определяющие пространственное распределение концентрации сульфатов, никеля и меди в условиях сложно-пересечённого рельефа, во времени. Определены границы зоны локального загрязнения сульфатами и тяжёлыми металлами (ТМ). Получены уравнения связи пространственного распределения концентрации вещества в снежном покрове и жидких осадках с расстоянием от источника выбросов, формирующейся за холодный и тёплый периоды года в различных формах рельефа локальной зоны за долговременную ретроспективу и перспективу. Определены величины концентрации сульфатов, никеля и меди в снежном покрове и жидких осадках региональной фоновой зоны.

On the bases of many years investigation of aero-techogenic laws of snow blanket and liquid atmospheric precipitates pollution on the territory of Murmansk region the factors were found out, that in course of time influence space distribution of sulfates, nickel and copper in conditions of complex cross-country landscape. The boundaries of the zone of local pollution with sulfates and heavy metals are determined. The equations are found of how the distance from the pollution source influences space distribution of the substance concentration in snow blanket and in liquid atmospheric precipitates during yearly periods of cold and warm in different local zone landscape forms during both the long-term retrospective and perspective. The amount of sulfates, nickel and copper concentration in snow blanket and in liquid atmospheric precipitates of the regional background zone is determined.

Введение

С учётом санитарно-гигиенических критериев и экологических требований к качеству природной среды в составе выбросов местных источников загрязнения атмосферы на Кольском полуострове в целом загрязнителями являются сернистый газ, никель и медь. Приоритетные источники загрязнения – комбинаты «Североникель» и «Печенганикель» [1].

Мурманская область характеризуется сложно-пересечённым рельефом. Проблема количественной оценки аэротехногенного загрязнения подстилающей поверхности в горных условиях является сложной и многоплановой, поскольку требует учёта множества природных факторов: абсолютных отметок, ориентацию и крутизну склонов, особенностей ветрового режима, типа подстилающей поверхности и растительности, мезорельефа [2 – 6].

Вопросы влияния природных факторов на пространственное распределение загрязняющих веществ в горных условиях изучены недостаточно. Это связано с необходимостью постановки многолетних и весьма трудоёмких натурных наблюдений на репрезентативных площадках, достаточно полно отражающих присущее данному району разнообразие локальных условий загрязнения

подстилающей поверхности. Постановка таких работ в настоящее время вряд ли осуществима и рентабельна.

Поэтому особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление пространственно-временных закономерностей загрязнения субарктических территорий и на этой основе разработка расчётных методов, позволяющих адекватно оценить величину аэротехногенной нагрузки приоритетных загрязняющих веществ, не прибегая к полевым работам в условиях сложно-пересечённого рельефа.

Материалы и методы

Результаты работы получены на основе гидрохимического опробования снежного покрова на территории Мурманской области: в 1979, 1983, 1990–1994 годах вокруг комбината «Печенганикель» на расстояниях до 80 км. В работе использованы результаты гидрохимического опробования снежного покрова и жидких осадков, выполненные в 1990–1991 годах вокруг комбината «Североникель» на расстояниях до 120 км. В работе использованы результаты гидрохимического опробования снежного покрова, выполненные в 1992–1994 годах в районе населённого пункта Тана (Норвегия), а так-

же, выполненные в 1992 году в районе пограничного поста Лотта, удалённых от источников загрязнения на расстояние более 180 км, материалы гидрохимического опробования снежного покрова и жидких осадков, выполненные в 1991, 1992, 2002 годах в районе поселка Краснощелье (рис. 1).

Также использованы данные о выбросах диоксида серы, никеля и меди в атмосферу Мурманской области металлургическими предприятиями «Североникель» и «Печенганикель» за годы проведения экспериментальных работ по гидрохимическому опробованию снежного покрова и жидких осадках. За эти же годы использовалась метеорологическая информация метеостанций «Мончегорск» и «Никель» о сезонной повторяемости направлений ветра и штилей.

Гидрохимическое опробование снежного покрова производилось в конце марта – начале апреля (в период максимального снегонакопления).

Отбор проб жидких осадков осуществлялся в период с апреля по октябрь с помощью полиэтиленовых бутылей ёмкостью три литра.

Работы по отбору, подготовке и химическому анализу проб проведены по методикам, применяемым в Институте проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН и многими другими исследователями [1, 6 – 10].

Все расчёты произведены на ЭВМ. Достоверность результатов достигалась на основе применения методов математической статистики: нуль – гипотеза, коэффициенты корреляции.

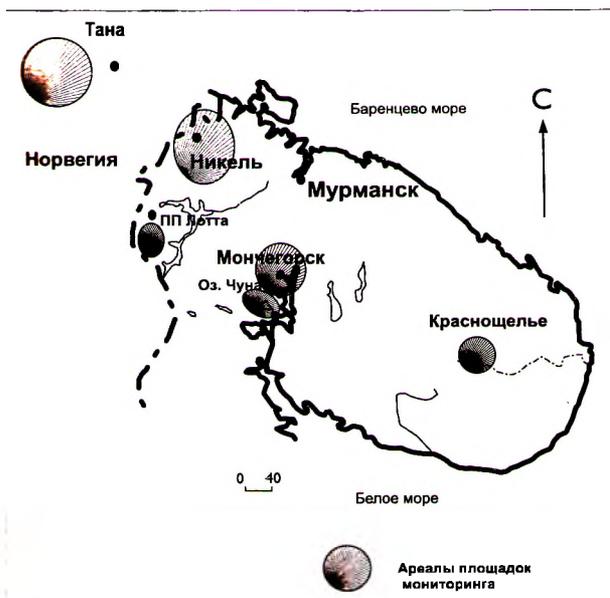


Рис. 1. Расположение объектов мониторинга

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что величина пространственного распределения концентрации вещества в снежном покрове и жидких осадках зависит от комплекса природных и антропогенных факторов. К природным следует отнести: расстояние природного объекта от источника выбросов, орографический фактор, повторяемость направлений ветра и штилей в районе источника выбросов. К техногенным факторам – объём выброса, высоту источника выбросов, механический состав и физико-химические свойства загрязнителей, дифференциацию годового выброса вещества в атмосферу по сторонам света в зависимости от розы ветров.

Математический анализ пространственного распределения удельной среднесуточной концентрации вещества – концентрации, формирующейся в снежном покрове и жидких осадках за сутки при среднесуточной эмиссии загрязнителя по различным сторонам света относительно источника загрязнения, равной одной тысяче тонн [11], позволил статистически достоверно установить нижеследующее.

На расстоянии 64-66 км от источника выбросов в величине концентрации сульфатов отмечается «порог». На расстоянии 66 км концентрация сульфатов значительно выше, чем на расстоянии 64 км (рис. 2). После преодоления порога концентрация сульфатов в снежном покрове не изменяется в пространстве. Для никеля и меди пороговые значения концентраций отмечаются на расстоянии 35-39 км от источника загрязнения (рис. 3).

Полученные результаты позволяют говорить, что среднеголетняя зона локального загрязнения снежного покрова и жидких осадков будет представлять собой окружность с радиусом 64-66 км от центра промышленной площадки типичного предприятия, а никелем и медью – 35-39 км, или, в среднем, для сульфатов – 65, а никеля и меди – 37 километров.

Общее количество таких частиц, достигающих подобного расстояния, будет зависеть от повторяемости направлений ветра по сторонам света и его скорости, которая на территории Мурманской области находится в пределах 4-7 м/с [12]. Наиболее высокий «порог» будет формироваться на севере от источника выбросов при южном направлении ветра, а самый низкий – на западе при восточном направлении (рис. 4).

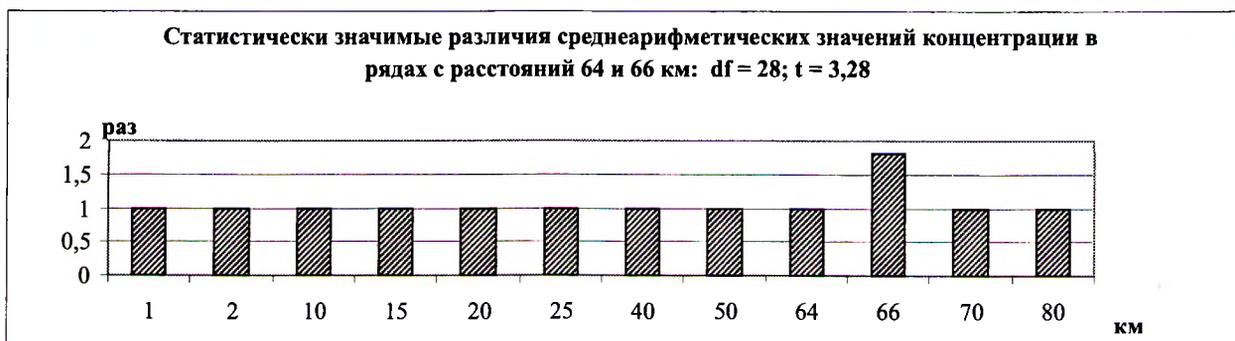


Рис. 2. Отношение среднеарифметических значений в рядах пространственного распределения удельной среднесуточной концентрации сульфатов, раз

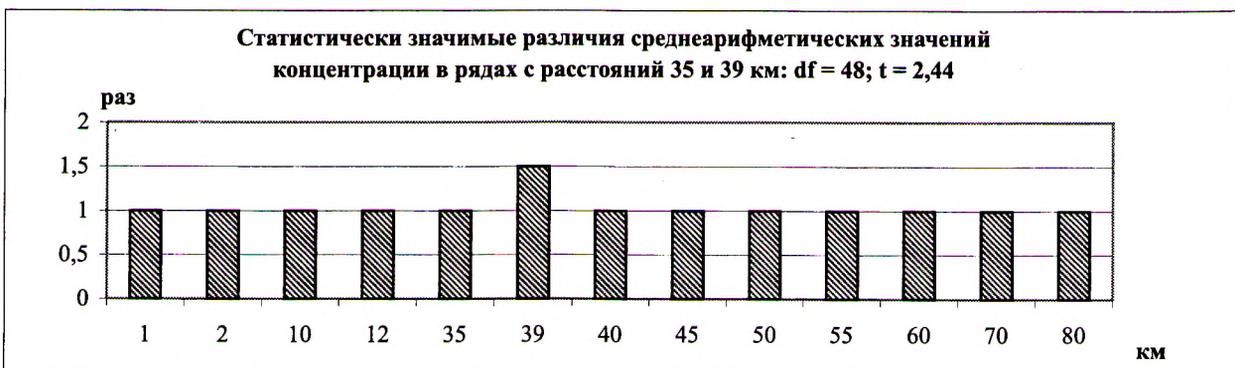


Рис. 3. Отношение среднеарифметических значений в рядах пространственного распределения удельной среднесуточной концентрации никеля и меди, раз

Сравнительный анализ пространственного распределения удельной среднесуточной концентрации на вершинах, склонах и равнинах показал, что интенсивность поступления сульфатов на поверхность вершин в 1,8 раза выше, чем на поверхность равнин. На поверхность склонов сульфаты поступают из атмосферы в 1,5 раза интенсивнее, чем на поверхность равнин (рис. 5). Уровень загрязнения равнин и склонов никелем, также как и медью, одинаков, но на вершины и никель, и медь поступают в 1,5 раза интенсивнее, чем на равнины (рис. 6).

Физико-химические свойства загрязнителей определяют различия в интенсивности их выпадения на подстилающую поверхность. Интенсивность выпадения меди на поверхность всех форм рельефа на 20% выше, чем интенсивность выпадения никеля (рис. 7).

Влияние орографического фактора на величину концентрации загрязняющих веществ можно объяснить адиабатическим поднятием и соответствующим расширением воздуха, сопровождающимся его охлаждением до точки росы, конденсацией водяного пара на аэрозольных частицах с последующим поглощением частиц подстилающей поверхностью.

Многолетние исследования показали, что в региональной фоновой зоне концентрация вещества, соответственно, в снежном покрове и жидких осадках не изменяется во времени. Влияние орографического фактора, фактора расстояния и количества, выпадающих осадков на величину концентрации не проявляется. Она не зависит от динамики суммарного объема выброса загрязнителей в атмосферный воздух на территории Мурманской области, по крайней мере, в его достаточно широком диапазоне: 100-750 тыс. т/год применительно к диоксиду серы и 1-3 тыс. т – к никелю и меди (рис. 8-10).

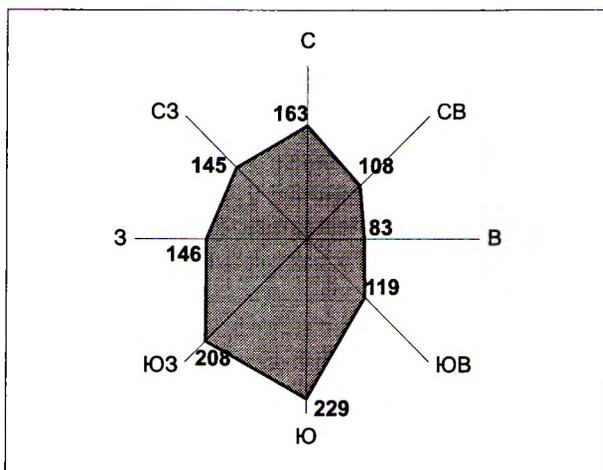


Рис. 4. Среднегодовое роза ветров в Мурманской области

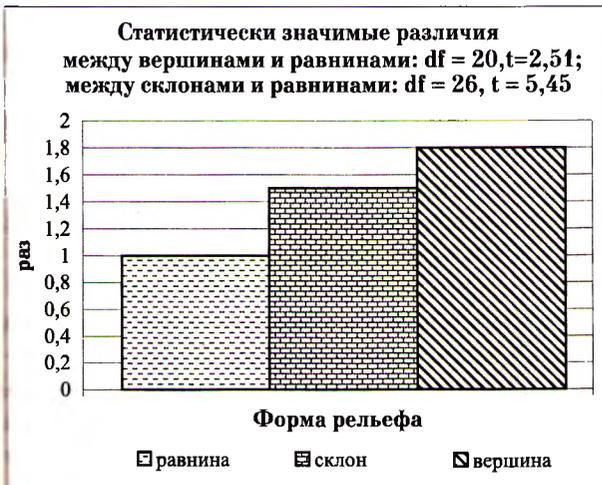


Рис. 5. Интенсивность локального выпадения сульфатов на поверхность вершин и склонов по отношению к интенсивности выпадения на поверхность равнин, раз

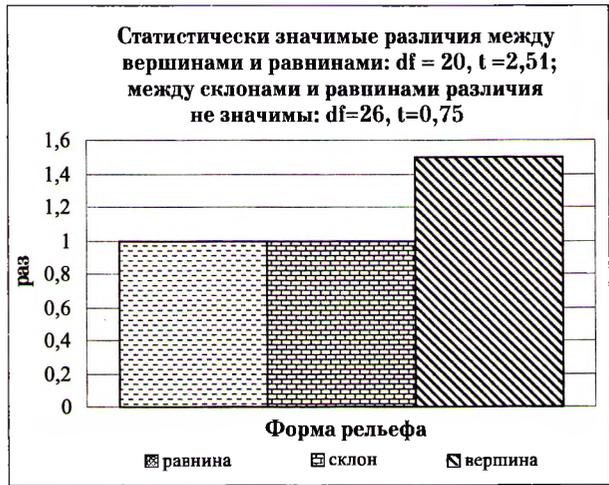


Рис. 6. Интенсивность локальных выпадений никеля и меди на поверхность вершин и склонов по отношению к интенсивности выпадения на поверхность равнин, раз

Независимость концентрации вещества от величины его выброса в атмосферу можно объяснить физико-химическими и электрическими свойствами аэрозольных частиц, их способностью быть ядрами конденсации водяного пара, а также вымывающей способностью снега и дождя.

Во-первых, аэрозольные частицы сульфатов и ТМ могут быть ядрами конденсации водяного пара. Тогда увеличение выброса приведёт к увеличению числа таких ядер, содержащихся в единице объёма воздуха. Увеличение ядер конденсации приведёт к увеличению числа снежинок или капель дождя и, как следствие, к увеличению объёма влаги. При снижении выброса будет наблюдаться обратный процесс. В этом случае динамика объёма выброса вещества в атмосферу будет определять согласованную динамику величины мокрого выпадения загрязнителя на подстилающую поверхность, а его концентрация не будет изменяться. Это позволяет говорить, что выброс вещества влияет на уровень загрязнения ландшафтов, расположенных в фоновой зоне.

Во-вторых, можно допустить, что загрязняющие вещества, особенно никель и медь, не являются ядрами конденсации водяного пара в атмосфере фоновой зоны. Тогда их вынос из облака будет связан со снежинками и каплями дождя, имеющими другую природу образования. В этом случае, в зависимости от физико-химических свойств загрязнителя, не все частицы (например, имеющие одинаковый электрический заряд со снежинкой или каплей) способны прилипнуть к поверхности снежинки или капли дождя. Кроме того, известно, что аэрозольная частица прилипает к

чистой поверхности, после чего эта способность утрачивается [13]. Поскольку эффективная поверхность, например снежинки, ограничена, то и её способность осаждать частицы на своей поверхности, также ограничена. Поэтому, вероятно, при увеличении количества частиц в единице объёма воздуха, связанного с увеличением величины выброса, атмосферные осадки всё равно выносят то количество частиц, которое способны уместить на своей поверхности. При изменении количества или размеров, например, снежинок из облаков будет вымываться больше или меньше вещества, но при этом будет изменяться и запас влаги в снеге, а, следовательно, величина концентрации и в этом случае, не должна изменяться. При таком протекании процесса выноса сульфатов и ТМ из атмо-

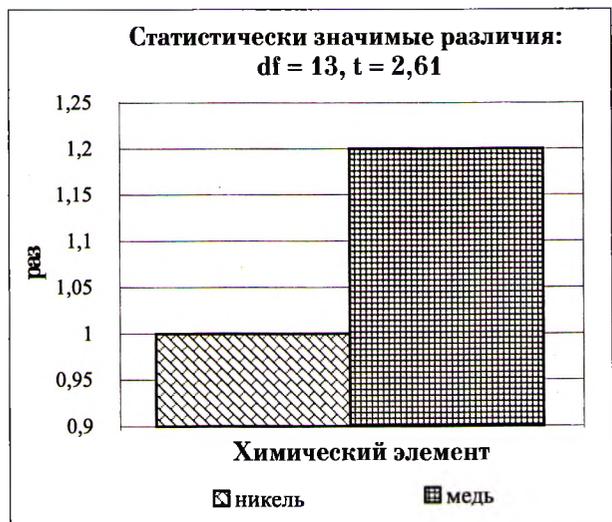


Рис. 7. Интенсивность локальных выпадений меди по отношению к интенсивности выпадения никеля на поверхность всех форм рельефа, раз

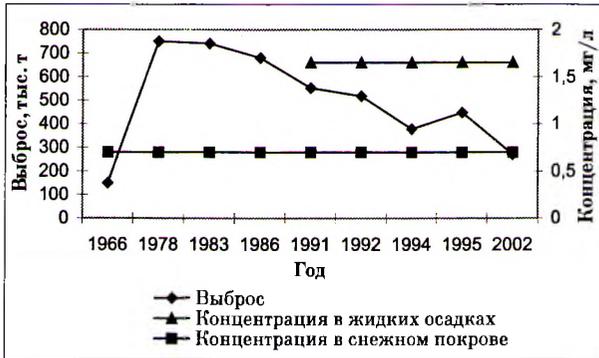


Рис. 8. Динамика выброса и среднегогодуной концентрации сульфатов в жидких осадках и снежном покрове (во времени различия концентраций, как в снежном покрове, так и в жидких осадках, статистически не значимы: $df = 20, t = 0,61$).

сферы можно говорить, что при увеличении объёма выброса вещества, особенно на фоне снижения количества выпадающих осадков, будет происходить накопление загрязняющих веществ в верхних слоях тропосферы и, возможно, выше. В данном случае не объём выброса вещества в атмосферу будет влиять на уровень фонового загрязнения ландшафтов, а количество осадков, выпадающих из атмосферы.

Скорее всего, совокупное влияние обоих рассмотренных факторов и определяет постоянство средней концентрации вещества на площади фоновой зоны во времени. В снежном покрове среднегогодуные концентрации сульфатов, никеля и меди составляют соответственно 0,7 мг/л, 1,88 и 1,69 мкг/л, а в жидких осадках, соответственно, 1,65 мг/л, 2,35 и 2,84 мкг/л.

Полученные результаты говорят и о независимости концентрации от объёма трансграничного переноса. Вывод из атмосферы веществ трансграничного происхождения,

как правило, находящихся под тропопаузой, или даже выше – в стратосфере, во многом не ясен. Происходящие процессы в атмосфере, например, фотохимические реакции и акустическая, или электрическая коагуляция, обуславливают опускание частиц в средние слои тропосферы, где они попадают в зону осадков, часть из которых может вымываться осадками по описанной выше схеме.

Сравнительная многолетняя оценка уровня загрязнения жидких осадков и снежного покрова показала, что интенсивность загрязнения жидких осадков сульфатами и медью во всех формах рельефа выше, чем снежного покрова. В то же время, интенсивность загрязнения жидких осадков никелем ниже, чем интенсивность загрязнения снежного покрова. Причём это характерно как для локальной, так и для региональной фоновой зоны (рис. 11).

Полученные результаты (см. рис. 5–7, 11) позволили получить уравнения для расчёта концентрации сульфатов, никеля и меди как в снежном покрове, так и в жидких осадках в зоне с локальным уровнем загрязнения, во времени и в пространстве (табл.).

Заключение

Проведённые исследования показали, что пространственное распределение концентрации вещества зависит от комплекса природных и техногенных факторов.

Протяжённость зоны локального загрязнения сульфатами и ТМ определяется как природными, так и техногенными факторами, обусловленными технологией производства и методами очистки газопылевых вы-



Рис. 9. Динамика выброса и среднегогодуной концентрации меди в жидких осадках и снежном покрове (во времени различия концентраций, как в снежном покрове, так и в жидких осадках, статистически не значимы: $df = 20, t = 0,22$).



Рис. 10. Динамика выброса и среднегогодуной концентрации меди в жидких осадках и снежном покрове (во времени различия концентраций, как в снежном покрове, так и в жидких осадках, статистически не значимы: $df = 20, t = 0,08$).

бросов. Среди природных факторов определяющую роль играет скорость ветра. Среди техногенных – высота источника выбросов и дисперсный состав загрязнителей. При характерной для Мурманской области специфике производственного процесса, высоте источника выбросов в 150 метров и среднемноголетней скорости ветра по сторонам света, равной 4-7 м/с, среднемноголетняя зона локального загрязнения сульфатами представляет окружность с радиусом 65-70 км от источника, а никелем – 35-40 км.

Величина пространственного распределения концентрации вещества в снежном покрове и жидких осадках локальной зоны также зависит и от природных, и от техногенных факторов. К природным факторам следует отнести фактор расстояния, орографический фактор и фактор повторяемости направлений ветра и штилей. Влияние этих факторов проявляется в том, что величина концентрации



Рис. 11. Различия в интенсивности загрязнения жидких осадков и снежного покрова во всех формах рельефа локальной и фоновой зоны, раз.

вещества выше на вершинах, расположенных по направлению движения преобладающих ветров и ближе к источнику выбросов. К техногенным факторам, влияющим на величину концентрации во времени и пространстве, относятся объём выброса, дисперсный состав и физико-химические свойства загрязнителей. Разные физико-химические свойства загрязнителей определяют разную интенсив-

Таблица

Уравнения связи концентрации загрязняющих веществ в снежном покрове и жидких осадках с расстоянием от источника выброса, мг/л

Форма рельефа	Уравнение связи	
	За холодный период года (ноябрь-март)	За теплый период года (апрель-октябрь)
Сульфаты		
Вершина	$q_i = c \cdot a X_i^b \cdot (P_i \cdot V)$	$q_{it} = c \cdot a X_i^b \cdot d \cdot (P_{it} \cdot V)$
Склон	$q_i = c_1 \cdot a X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V)$	$q_{it} = c_1 \cdot a X_i^{b_1} \cdot d \cdot (P_{it} \cdot V)$
Равнина	$q_i = a X_i^b \cdot (P_i \cdot V)$	$q_{it} = a X_i^b \cdot d \cdot (P_{it} \cdot V)$
Никель		
Вершина	$q_i = c_1 \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_1)$	$q_{it} = c_1 \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot d_1 \cdot (P_{it} \cdot V_1)$
Склон	$q_i = a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_1)$	$q_{it} = a_1 X_i^{b_1} \cdot d_1 \cdot (P_{it} \cdot V_1)$
Равнина	$q_i = a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_1)$	$q_{it} = a_1 X_i^{b_1} \cdot d_1 \cdot (P_{it} \cdot V_1)$
Медь		
Вершина	$q_i = c_1 \cdot m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_2)$	$q_{it} = c_1 \cdot m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot d_2 \cdot (P_{it} \cdot V_2)$
Склон	$q_i = m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_2)$	$q_{it} = m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot d_2 \cdot (P_{it} \cdot V_2)$
Равнина	$q_i = m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot (P_i \cdot V_2)$	$q_{it} = m \cdot a_1 X_i^{b_1} \cdot d_2 \cdot (P_{it} \cdot V_2)$

Примечание: q_i, q_{it} – концентрация элемента, соответственно, в снежном покрове и жидких осадках в i -й точке, мг/л; c, c_1 – статистически достоверные эмпирические коэффициенты, характеризующие различия в величине пространственного распределения содержания загрязнителей в снежном покрове и жидких осадках, обусловленные орографическим фактором ($c = 1,8; c_1 = 1,5$); $a X_i^b = -6,18 X_i^{-0,59}$ – удельная среднесуточная концентрация сульфатов в снежном покрове равнин за холодный период года в i -й точке, мг/(л · сутки · тыс. т); $a_1 X_i^{b_1} = -1,39 X_i^{-1,45}$ – удельная среднесуточная концентрация никеля в снежном покрове равнин за холодный период года в i -ой точке, мг/(л · сутки · тыс. т); $a, a_1 = \ln a; \ln a_1$ – свободный член уравнения регрессии; b, b_1 – коэффициент регрессии; X_i – расстояние от источника выброса i -й точки, км; $(P_i \cdot V); (P_i \cdot V_1); (P_i \cdot V_2)$ – эмиссия, соответственно, сульфатов, никеля и меди в атмосферу по различным сторонам света относительно источника выбросов за холодный период года во времени, тыс. т; $(P_{it} \cdot V); (P_{it} \cdot V_1); (P_{it} \cdot V_2)$ – эмиссия, соответственно, сульфатов, никеля и меди в атмосферу по различным сторонам света относительно источника выбросов за теплый период года во времени, тыс. т; P_i – продолжительность направления ветра за холодный период года на i -ю точку, сутки; P_{it} – продолжительность направления ветра за теплый период года на i -ю точку, сутки; $V, V_1; V_2$ – выброс, соответственно, сульфатов, никеля и меди за год, тыс. т; t – статистически достоверный эмпирический коэффициент, характеризующий различия в величине пространственного распределения содержания меди над распределением никеля как в снежном покрове, так и жидких осадках, обусловленные различными физико-химическими свойствами загрязнителей ($m = 1,2$); d, d_1, d_2 – статистически достоверные эмпирические коэффициенты, характеризующие различия в величине пространственного распределения содержания загрязнителей в жидких осадках над их распределением в снежном покрове, обусловленные разной вымывающей способностью жидких и твердых осадков ($d = 1,7; d_1 = 0,9; d_2 = 1,2$).

ность их поступления на подстилающую поверхность вершин склонов и равнин, а их пространственное распределение выражается степенной функцией.

В регионально-фоновой зоне средняя концентрация элемента, соответственно, в снежном покрове и жидких осадках на площади фоновой зоны не изменяется во времени и пространстве. Она не зависит от органографического фактора, фактора расстояния, количества выпадающих твердых и жидких осадков, распределения направлений ветра по сторонам света, объема выброса вещества в атмосферу источником загрязнения и обусловленного трансграничным переносом, по крайней мере, в широком диапазоне этого объема. Статистически достоверная средне-многолетняя фоновая концентрация в снежном покрове составляет для сульфатов, никеля и меди 0,7 мг/л, 1,88 и 1,69 мкг/л соответственно, а в жидких осадках – 1,65 мг/л, 2,35 и 2,84 мкг/л соответственно.

Литература

1. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра АН СССР, 1989. 96 с.
2. Иверонова М.И. Закономерности распределения снежного покрова на склонах и лесолуговом поясе хребта Терской Алатау // Работы Тянь-Шаньской физико-географической станции. М.: 1956. Т. 67. С. 127-137. (Тр. Ин-та географии АН СССР. Вып. 5).
3. Соседов И.С. Исследование баланса снеговой влаги на горных склонах. Алма-Ата: Наука, 1967. 197 с.
4. Северский И.В., Благовещенский В.П. Оценка лавинной опасности горной территории. Алма-Ата: Наука, 1983. 217 с.
5. Северский И.В., Северский С.И. Влияние локальных природных факторов на распределение снежного покрова в горах // Снежный покров в горах и лавины. М.: Наука, 1987. С. 16-23.
6. Раткин Н.Е., Макарова Т.Д. Роль снежного покрова в загрязнении ландшафтов Мурманской области // Эколого-географические проблемы Кольского Севера. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 1992. С. 20-35.
7. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометиздат, 1985. 181 с.
8. Глазовский Н.Ф., Злобина А.И., Учватов В.П. Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеобского бассейна // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 67-83.
9. Раткин Н.Е., Асминг В.Э., Кошкин В.В. Влияние природных локальных факторов на загрязнение снежного покрова (на примере Печенгского района) // Вестник МГТУ. № 3. 1998. С. 151-160.
10. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: Изд. Кольск. науч. центра РАН, 1996. 213 с.
11. Раткин Н.Е. О возможностях применения метода расчёта содержания сульфатов, никеля и меди в снежном покрове в геоэкологических исследованиях // Геохимия. 2002. № 2. С. 208-219.
12. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Вып. 2. Мурманская область. Л.: Гидрометеозидат, 1988. 316 с.
13. Петрянов-Соколов И.С., Сутугин А.Г. Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 142 с.