
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ, АККУМУЛИРОВАННЫХ В СНЕГОВОМ ПОКРОВЕ

А.А. Нульман, В.И. Уткин

Институт геофизики Уральского Отделения РАН
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, Россия, 620016

Н.И. Москаленко

Институт высокотемпературной электрохимии
Уральского Отделения РАН
ул. Софьи Ковалевской, 22, Екатеринбург, Россия, 620219

Для проб снега, отобранных в зонах влияния различных источников аэральных выбросов, приведены корреляции между суммарным содержанием 9 тяжелых металлов и объемной концентрацией сильномагнитных частиц. В зонах влияния высокотемпературных источников обнаружены повышенные значения удельной магнитной восприимчивости атмосферных выпадений.

Атмосферные потоки тяжелых металлов изучают по пространственно-временным характеристикам атмосферных выпадений, депонированных в снеговом покрове [1]. В странах с устойчивым снежным покровом он является наиболее подходящей депонирующей средой, поскольку накапливает атмосферные выпадения в течение длительного времени и минимизирует количество пылевых частиц, поднимаемых ветром с земной поверхности в пунктах наблюдений. По концентрациям загрязнителей в снежном покрове рассчитываются концентрации этих веществ в атмосфере [2]. В атмосферных аэрозолях присутствуют частицы ферритов и металлических ферромагнетиков, образовавшиеся в результате природных и антропогенных процессов в различных термодинамических условиях [3]. Объемная магнитная восприимчивость χ_v таких сильномагнитных частиц практически не зависит от восприимчивости материала, а определяется величиной размагничивающего фактора. Для идеальных сферических невзаимодействующих частиц $\chi_v = 3$. Восприимчивость парамагнитных минералов, не содержащих включений железа, не превышает $20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а такие широко распространенные минералы, как полевые шпаты, являются диамагнетиками с $\chi_v = 0 \div -0,6 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Таким образом, при объемной концентрации сильномагнитных частиц более 0,05% χ_v осадка должна определяться концентрацией сильномагнитного компонента. Это условие будет выполняться и при меньших концентрациях сильномагнитных частиц в зависимости от концентрации в основной массе осадка диамагнитного компонента. При указанных объемных концентрациях сильномагнитного компонента магнитный момент твердой фракции, извлеченной из проб талого снега массой 1 кг, достоверно фиксируется с помощью индукционных приборов, в частности, разработанных для измерения магнитных моментов образцов горных пород. Повышенные количества сильномагнитных частиц в атмосферных выпадениях на урбанизированных территориях были обнаружены разными авторами [4; 5]. Однако особенности магнитного загрязнения от различных

источников практически не изучены, и возможности получения геофизической информации при использовании магнитных методов подлежат детальному изучению.

Цель данной работы — исследовать особенности в магнитных характеристиках атмосферных выпадений, содержащих сильномагнитные частицы известных источников, и выявить связи этих характеристик со свойствами атмосферных выпадений.

Отбор проб снега производился на территории, относящейся к горно-таежной зоне Среднего Урала с преобладанием юго-западных зимних ветров и включавшей зоны с различной степенью урбанизации. Территория с высокой степенью урбанизации была представлена субширотным трансектом протяженностью 76 км, который начинался в юго-западной части г. Екатеринбурга и пересекал города Ревда и Дружинино. Пункты отбора проб снега располагались в парках (г. Екатеринбург) и в лесных массивах в небольших окнах древостоя на расстояниях ≥ 50 м от каких-либо антропогенных объектов. Интервалы между пунктами варьировали от 50 м до 5 км в зависимости от градиентов загрязнения. Источники сильномагнитных частиц: автодороги (автомагистраль «Московский тракт» и г. Екатеринбург), железная дорога Екатеринбург—Дружинино, медеплавильный завод, метизно-металлургический и другие предприятия по переработке металлов (г. Ревда), железнодорожный узел, котельные на угле (п. Дружинино), предприятия городской инфраструктуры. Пробы отбирались в зонах, где предполагалось влияние нескольких источников. Кроме того, были выделены две зоны, каждая из которых с высокой степенью вероятности характеризовалась загрязнением одинаковой интенсивности от одного известного источника. В каждую из зон входили участки с различными концентрациями магнитных загрязнителей в снеге. Территории, характеризующиеся монозагрязнением от медеплавильного завода, были представлены двумя участками, расположенными на расстояниях $1,6 \div 4,4$ км на запад и $4 \div 7$ км на восток от труб завода и удаленных от транспортных магистралей $> 1,5$ км. Зоны с преобладанием монозагрязнения от автодорог были расположены на расстояниях менее 350 м от автодорог в парках г. Екатеринбурга и на разных участках Московского тракта, удаленных от г. Ревда в западном направлении на $9 \div 10$ км и в восточном — на $25 \div 26$ км. Наименее урбанизированная территория была представлена тремя участками, удаленными на расстояния > 4 км от населенных пунктов и > 1 км от дорог. При этом расстояния от этих участков до г. Ревда составляли $30 \div 37$ и 75 км на запад и 27 км на юг. Всего в данной работе было опробовано 147 пунктов.

Пробы массой 1 кг отбирались пластмассовым пробоотборником диаметром 4,5 см по всей толще снежного покрова. Каждая проба включала от 3 до 12 колонок, отбиравшихся с интервалом 1 м по минипрофилям, перпендикулярным градиенту загрязнения. Отбор производился в период, непосредственно предшествующий снеготаянию. Пробы были растоплены на фильтрах «синяя лента» (номинальные размеры пор — $1 \div 2,5$ мкм). Были измерены дифференциальные магнитные моменты dM/dH [ед. СИ $\cdot \text{м}^3$] фильтров с осажденной твердой фракцией. Измерения проводились на приборе KLY-1 фирмы «Geofyzika», Чехия. Погреш-

ность абсолютной калибровки $\pm 1\%$. Погрешность относительной калибровки $\pm 0,4\%$ [6]. Были рассчитаны объемные магнитные концентрации $CfM = (dM/dH)/V$ [ед. Си], где V [м³] — объем снеговой воды в пробах.

Из 147 проб была составлена представительная выборка, включавшая 62 пробы с различными значениями параметра CfM , отобранные в зонах влияния различных источников загрязнения. Для этой выборки была определена масса осадка на фильтрах m [кг] и вычислены значения удельной магнитной восприимчивости твердой фракции $\chi = (dM/dH)/m$ [ед. Си · м³/кг]. Погрешность определения массы $\pm 10\%$.

Для 46 проб из данной выборки были определены массы девяти металлов — меди, цинка, железа, марганца, свинца, титана, хрома, никеля и кадмия на фильтрах m_i [мкг] и объемные концентрации этих металлов в фильтрате C_{fi} [мкг/л]. Фильтрат и фильтры подвергались химическому анализу методом атомно-эмиссионной спектromетрии с индуктивно-связанной плазмой с помощью спектрометров JY 48 и Optima 4300 DV. Низкие содержания титана, хрома, никеля, кадмия и свинца в фильтрате определены на массспектрометре Spectromass 2000 фирмы «Spectro». По формуле $C_{fi} = m_i/V$ [мкг/л] вычислялись объемные концентрации C_{fi} металлов, содержащихся в твердой фракции > 1 мкм. Вычислялись суммарные объемные концентрации тяжелых металлов в фильтрате $C_s = \sum_{i=1}^n C_{si}$ и в твердой фракции $C_f = \sum_{i=1}^n C_{fi}$, где n — количество металлов.

На рис. 1 представлены зависимости суммарных концентраций тяжелых металлов в твердой фракции и в фильтрате талого снега в зависимости от дифференциального магнитного момента твердой фракции, отнесенного к единице объема. На всей обследованной территории суммарные концентрации тяжелых металлов варьируют в пылевой фракции почти на два порядка $C_f = (210 \div 16\,250)$ мкг/л, а в фильтрате менее чем на порядок $C_s = (110 \div 957)$ мкг/л. Таким образом, на большей части территории количество тяжелых металлов в фильтрате в среднем составляет менее 10% от концентрации в твердой фракции и не вносит значимого вклада в суммарную концентрацию тяжелых металлов. Сравнение параметра C_f с магнитным параметром CfM показало, что вне зависимости от природы источника и интенсивности загрязнения между объемной магнитной концентрацией пылевой фракции и суммарной концентрацией тяжелых металлов наблюдается линейная связь с коэффициентом корреляции $r = 0,94$. Однако зависимости коэффициентов корреляции от состава элементов, включенных в сумму тяжелых металлов, различны для зон влияния двух моноисточников различной природы. В зоне монозагрязнения от медеплавильного завода (13 проб) коэффициент корреляции r между параметром CfM и суммарными концентрациями C_f восьми металлов, за исключением железа, составил 0,99. При добавлении в сумму C_f концентраций железа коэффициент корреляции уменьшается до $r = 0,95$. В зонах монозагрязнения от автодорог (18 проб) для суммы из восьми концентраций металлов коэффициент корреляции составил $r = 0,94$. Добавление в сумму концентраций железа увеличило коэффициент до $r = 0,95$.

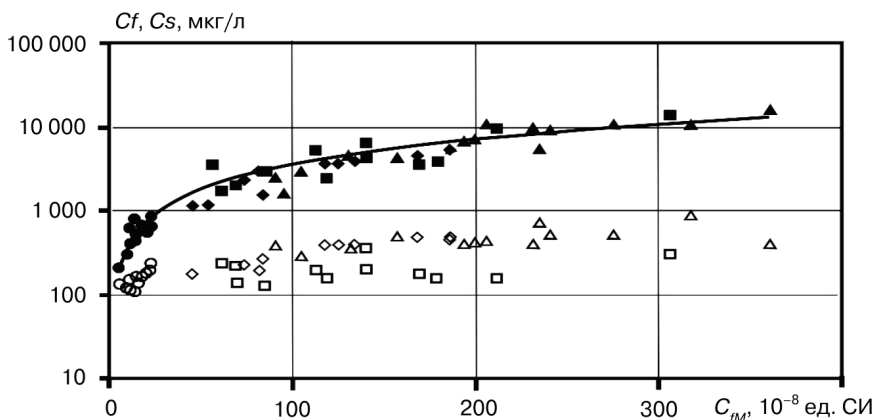


Рис. 1. Суммарные концентрации меди, свинца, цинка, железа, марганца, никеля, титана, хрома, кадмия в пылевой фракции > 1 мкм и в фильтрате в зависимости от концентрации магнитных загрязнителей в пробах снега

На рис. 2 сопоставлены значения параметров CfM и χ . Диаграмма χ (CfM) для участков с минимальной и с повышенной степенью урбанизации показана на рис. 2а. На всех участках с минимальной степенью урбанизации параметры CfM и χ варьируют слабо. Среднее значение $\overline{C_{fM}} = 15,5 \pm 5,3) \cdot 10^{-8}$ с коэффициентом вариации $v = \pm 0,34$. Среднее значение $\overline{\chi} = (240 \pm 120) \cdot 10^{-8}$ ед. СИ $\cdot$ м³/кг с коэффициентом вариации $v = \pm 0,5$. На урбанизированной территории величины объемной магнитной концентрации и удельной магнитной восприимчивости значительно превышены. С увеличением параметра CfM возрастает и параметр χ . Однако при возрастании CfM более чем на порядок $CfM = 23 \div 361 \cdot 10^{-8}$ величины χ увеличивается только в 5 раз $\chi = (480 \div 2500) \cdot 10^{-8}$ ед. СИ $\cdot$ м³/кг.

При этом на диаграмме $\chi(CfM)$ обнаружены две области максимальных значений, представляющие пробы, отобранные в окрестностях п. Дружинино (I) и г. Ревда (II) на расстояниях >500 м от автодорог. В этих зонах действуют однотипные источники, характеризующиеся различной интенсивностью, но одинаковым типом загрязнения (медеплавильное производство и котельные на угле). Обнаруженная тенденция более ярко проявилась для проб, отобранных в зонах двух известных источников с одинаковыми интенсивностями загрязнения (рис. 2б). На диаграмме $\chi(CfM)$ точки, представляющие два разных моноисточника, сгруппировались в два отдельных ансамбля. Ансамбль А (15 точек) представляет зону монозагрязнения от медеплавильного завода, ансамбль Б (13 точек) — зоны загрязнения от автодорог. В группе А $\overline{\chi} = (3130 \pm 740) \cdot 10^{-8}$ ед. СИ $\cdot$ м³/кг $v = 0,24$. В группе Б $\overline{\chi} = (750 \pm 200) \cdot 10^{-8}$ ед. СИ $\cdot$ м³/кг, $v = \pm 0,27$. Таким образом, величины удельной магнитной восприимчивости пылевой фракции в зонах монозагрязнения от медеплавильного производства и от автотранспорта отличаются в 4 раза.

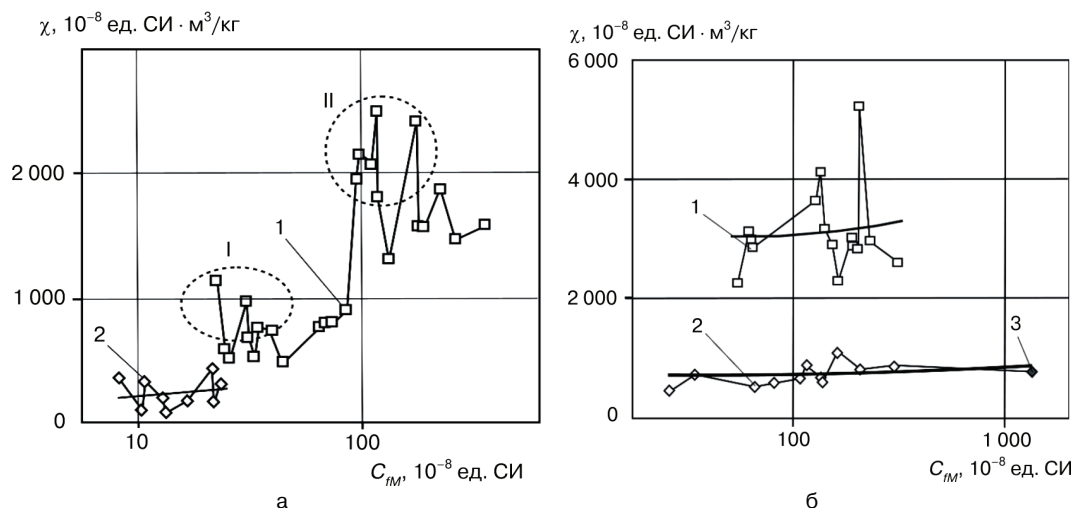


Рис. 2. Удельная магнитная восприимчивость пылевой фракции талого снега в зависимости от объемной магнитной концентрации в пробах:

а — зоны минимальной (1) и повышенной (2) урбанизации; I — окрестности п. Дружинино, II — окрестности г. Ревда (промзона); б — зоны влияния моноисточников: 1 — автотранспорт, 2 — медеплавильный завод, 3 — проба отобрана в непосредственной близости у автодороги (неаэрогенное загрязнение)

Анализ роли железа в тесноте связи между суммарным содержанием тяжелых металлов и магнитным параметром C_{fM} показывает, что в зоне загрязнения от автотранспорта с высокой долей вероятности сильномагнитный компонент представлен частицами металлического железа. Обнаруженное в зоне монозагрязнения от медеплавильного завода уменьшение коэффициента корреляции между параметрами C_f и C_{fM} при включении в сумму железа говорит о том, что сильномагнитные частицы имеют сложный, по-видимому, переменный состав. По всей вероятности, это ферриты, в которых могут присутствовать включения самородного железа. Таким образом, для двух ансамблей сильномагнитных частиц, имеющих различный элементный и фазовый состав, наблюдается универсальная линейная связь между параметрами C_f и C_{fM} . Наиболее вероятным физическим процессом, обуславливающим эту связь, представляется адсорбция ионов тяжелых металлов из раствора. Для подтверждения данного предположения необходимо исследовать поверхностные свойства частиц, генерируемых высоко- и низкотемпературными источниками.

Различные значения χ осадка для источников разных типов наблюдались в пределах территории, размеры которой обуславливают одинаковое региональное загрязнение атмосферы. Повышенные значения χ в окрестностях г. Ревда (при высоких значениях C_{fM}) и п. Дружинино (при низких C_{fM}) могут объясняться пониженным объемом в атмосферных выпадениях слабомагнитного пылевого компонента или его пониженной плотностью. Последнее представляется наиболее вероятным, поскольку трудно представить, что в атмосфере вблизи двух промышленных центров, расположенных в различных ландшафтных условиях, одинаково понижено количество пыли. С другой стороны, быстрое остывание

расплавленного минерального вещества в присутствии значительного количества газов должно приводить к образованию пористых продуктов с пониженной плотностью. Наши эксперименты по фильтрованию снеговой воды после длительной выдержки показали, что в пробах, отобранных в зоне влияния медеплавильного завода, некоторая часть сильномагнитных частиц длительное время остается на поверхности, следовательно, имеет плотность $< 1 \text{ т/м}^3$.

Рассмотренные два моноисточника представляют два больших класса источников сильномагнитных атмосферных аэрозолей. Процесс плавления руды в отражательной печи медеплавильного завода аналогичен другим высокотемпературным производственным и бытовым процессам, связанным с плавлением руды и сжиганием жидкого и твердого топлива. Автотранспорт является наиболее мощным и широко распространенным источником металлических сильномагнитных частиц, которые также присутствуют в выбросах из вентиляционных труб металлообрабатывающих производств, жилых помещений и объектов городской инфраструктуры. Таким образом, можно ожидать, что полученные результаты будут справедливы и для других источников сходной физической природы. Физические процессы, являющиеся источниками пылевых выбросов при высокотемпературных производственных процессах, в определенной степени аналогичны некоторым процессам, связанным с вулканической деятельностью и сопровождающим падение метеоритов.

Исследование магнитных характеристик атмосферных выпадений позволило заключить следующее:

1. Параметр CfM , характеризующий объемную концентрацию сильномагнитных загрязнителей в снежном покрове, может служить количественным показателем суммарного содержания тяжелых металлов в атмосферных выпадениях и, следовательно, использоваться для оценки содержания тяжелых металлов в атмосферных потоках.

2. Удельная магнитная восприимчивость твердой фракции талого снега является показателем генезиса антропогенных атмосферных выпадений.

3. Для исследования атмосферных выпадений целесообразно применять оперативные, высокоточные и относительно дешевые магнитные методы. Они не требуют специальной подготовки и разрушения исследуемых образцов, что позволяет в дальнейшем анализировать эти образцы другими методами.

4. Повышенная концентрация сильномагнитных примесей в сочетании с пониженной плотностью продуктов, образующихся при процессах, происходящих в мощных высокотемпературных антропогенных источниках, возможно, характерна и для определенных природных, в частности, вулканогенных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Головин А.А., Самаев С.Б., Соколов Л.С. Современные подходы к методике эколого-геохимических исследований урбанизированных территорий // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 3. — С. 67—73.
- [2] Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.

- [3] *Лисицин А.П.* Осадконакопление в океанах. — М.: Наука, 1974.
- [4] *Hunt A.* The application of mineral magnetic methods to atmospheric aerosol discrimination // *Phys of the Earth and Planet. Inter.* — 1986. — V. 42. — N. 1—2. — P. 10—21.
- [5] *Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю., Таловская А.В.* Способ определения загрязненности снежного покрова техногенными компонентами / Пат. 2229737 (Россия). Оpubл. 27.05.2004.
- [6] *Нульман А.А., Уткин В.И.* Калибровочные образцы для измерений индукционного магнитного момента // *Измерительная техника.* — 2000. — № 1. — С. 52—54.

STUDY OF MAGNETIC CHARACTERISTIC OF ATMOSPHERIC FALLINGS ACCUMULATED IN SNOW

A.A. Nulman, V.I. Outkin

Institute of Geophysics, Urals's Department RAS
Amundsen str., 100, Yekaterinburg, Russia, 620016

N.I. Moskalenko

Institute of High Temperature Electrochemistry
Urals's Department RAS
Kovalevskoy str., 22, Yekaterinburg, Russia, 620219

In zones of influence of different sources of atmospheric discharges the correlations between sums of concentrations of 9 heavy metals and volumes magnetic concentrations of strongly magnetic particles in snow were described. In high temperature influenced zone the high values of mass specific magnetic susceptibility of atmospheric fallings were found.