

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОРГАНОГЕННЫХ
ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
КОЛЬСКОЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ»**

Выполнил студент

419 группы:

Данилов Георгий Егорович

подпись студента

Научный руководитель:

с.н.с. Копцик Сергей Владимирович

подпись научного руководителя

Допущена к защите _____

Зав. кафедрой _____

подпись зав. кафедрой

Москва

2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ.....	7
1.1. Возникновение магнитных свойств почв.....	8
1.2. Органогенные горизонты.....	10
1.3. Минеральные горизонты.....	12
1.4. Магнитные свойства.....	15
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	22
2.1. Природные условия	22
2.2. Техногенное загрязнение	23
2.3. Исследуемые участки.....	23
2.4. Методы исследований	29
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	33
3.1. Магнитные свойства органогенных горизонтов почв	33
3.2. Магнитные свойства минеральных горизонтов лесных почв.....	35
3.3. Магнитные свойства минеральных горизонтов почв техногенных пустошей.....	37
3.4. Обсуждение результатов.....	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42

ВВЕДЕНИЕ

Магнетизм объектов окружающей среды обусловлен преимущественно соединениями железа. Железо есть всюду, это важный строительный материал мироздания. Астрономы находят железо в раскаленных атмосферах звезд. По мнению геофизиков, ядро земного шара состоит из железа с примесью никеля и кобальта, а земная кора, по подсчетам геохимиков, на 5,1% представлена железом [36]. Железо повсеместно распространено на поверхности Земли. Оно присутствует почти во всех горных породах и составляет в кислых породах 2-3% (граниты), в основных породах от 7-8 до 12-14% (базальт, габбро, диабаз и др.) и в ультраосновных породах 15-16% (перидотиты и др.). Наконец, железо играет огромную роль в жизни растений, животных и человека.

Магнетизм почв также определяется соединениями железа. Это связано с тем, что содержание железа в почвах на три и более порядков больше содержания других элементов, в том числе никеля, кобальта, хрома и др., которые также обуславливают возникновение сильных магнитных свойств. Состав, свойства, а, следовательно, и магнитная предыстория складывается из последовательности трансформаций, прошедших почвой к настоящему моменту. Цель исследователя состоит в том, чтобы по физическим свойствам современных почв составить представление о формировании их магнитных свойств в условиях развития почв из подстилающих пород. Это сложная задача, по всей видимости, не имеющая однозначного ответа. Для решения этой задачи необходимо систематическое изучение многообразия магнитных свойств почв, различающихся по своим свойствам, а также признаков их магнитного состояния.

Систематическое изучение магнитных свойств почв началось не так давно, в середине XX века [1]. Этому способствовал ряд предпосылок:

1. Разработка теории магнетизма в тридцатых годах прошлого века.

2. Создание необходимой аппаратуры для проведения магнитных измерений различных объектов.

3. Определение магнитных свойств индивидуальных минералов, пород и почв.

Следует отметить, что уже в первых работах обнаружены необычайно высокие значения магнитной восприимчивости почв по сравнению с их материнской породой. В результате исследований магнитных свойств почв были выявлены закономерные изменения магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности, намагниченности насыщения, коэрцитивной силы по профилю почв и в разных типах почв, что демонстрирует тесную связь магнитных характеристик с процессами почвообразования. Элементарные почвенные процессы типа оглеения, оглинения могут быть хорошо диагностированы по величине магнитной восприимчивости, а железистые минералы можно идентифицировать с помощью термомагнитного анализа.

В последнее время магнитные исследования стали все чаще применяться для диагностики загрязнения почв. В идеале такое исследование предполагает как знание начального магнитного состояния почв, так и наблюдение над изменением магнитных свойств почв во времени. В практике исследований и первое, и второе встречается крайне редко. В большинстве случаев, также как и при изучении других почвенных свойств, в области антропогенного воздействия исследуется как бы “мгновенный снимок” современного магнитного состояния почв. А представления о временной динамике изменений возникают на базе этого пространственного «снимка», теоретических представлений и отрывочных временных наблюдений.

При этом сложность экспериментального изучения экосистем, подверженных деградации под воздействием загрязнения, связана с необходимостью вычленения сравнительно небольшого вклада

антропогенного возмущения на фоне относительно большой естественной изменчивости (магнитных) свойств почв. В случае же сильных воздействий (техногенных катастроф), приводящих к гибели экосистем, свойства почв могут изменяться очень сильно. Однако такие изменения обычно связаны с началом других мощных и стремительно развивающихся процессов деградации почв, таких как разрушение органогенных горизонтов в результате гибели растительности, дегумификация, водная и ветровая эрозия, не возникающих при наличии нормально функционирующих экосистем. В этом случае техногенное воздействие выступает в роли “спускового крючка”, этих процессов. При исследовании реакции экосистем на воздействие горно-металлургических предприятий ситуация осложняется тем, что добывающие и перерабатывающие предприятия, как правило, расположены в рудоносных районах, т.е. в районах мощных естественных геохимических аномалий. Как следствие градиенты естественного и антропогенного пространственного изменения свойств окружающей среды часто совпадают по направлению, что затрудняет практическое разделение этих факторов.

Термин «загрязнение» используется в естественных науках в двух смыслах, которые следует четко различать. В географии, геологии, геохимии, почвоведении и др. он обычно означает возникшее в результате деятельности человека изменение состояния среды – например, превышение фонового значения содержания некоторого химического элемента или соединения, характерного для района исследований. При этом загрязнение не обязательно означает негативное воздействие на живые организмы. В науках о жизни – биологии, медицине, экологии, токсикологии и др. – понятие загрязнения явным образом связывается с негативным воздействием антропогенного изменения окружающей среды на живые организмы.

В природе распространены малоактивные, практически нейтральные по отношению к воздействию на живые организмы окисные соединения железа. Токсические соединения железа, попадающие в окружающую среду,

например, при авариях или нарушениях технологического цикла, достаточно быстро окисляются под действием мягких окислителей, в том числе и при действии кислорода воздуха. Поэтому обнаружение повышенного содержания сильномагнитных соединений обычно не означает прямой опасности для жизни. Однако поступление в окружающую среду токсических соединений часто сопровождается выбросами сильномагнитных соединений, или трансформацией выбрасываемых парамагнитных и диамагнитных соединений в сильномагнитные *in situ*. Поэтому изменение магнитного состояния среды является косвенным индикатором опасности.

Поступающие из атмосферы частицы сильномагнитных потенциально сильномагнитных (т.е. способных в почве быстро преобразовываться в сильномагнитные соединения) соединений в нормально функционирующих и умеренно нарушенных лесных экосистемах захватываются поверхностным органическим горизонтом, выполняющим защитные, буферные функции. Однако по мере нарастания нарушений подстилки утрачивают свои буферные свойства, при экстремальном воздействии полностью разрушаются, и магнитные частицы, как и опасные токсичные соединения, начинают свободно поступать и мигрировать по почвенному профилю. Поэтому значительное внимание также было уделено изучению магнитных свойств нижележащих минеральных горизонтов почвы.

ГЛАВА 1. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

Говоря о строении почвы, имеют в виду, прежде всего, чередование отдельных почвенных слоев от поверхности в глубину. Совокупность этих слоев, называемых генетическими горизонтами, образует почвенный профиль. Почвенные горизонты возникают в результате дифференциации почвенного профиля в процессе совместной эволюции почв, фито- и зооценозов; они различаются между собой по морфологическим признакам, составу и свойствам [18, 22]. Мощность выделенных горизонтов, их общий облик, закономерная смена по вертикали и сочетание в пределах профиля являются устойчивым морфологическим признаком типов почв.

Верхние горизонты естественных почв включают органо-минеральные и минеральные, которые в основном соответствуют современным процессам почвообразования [18, 22]. Органо-генные горизонты различаются составом растительных остатков и степенью их разложения, что позволяет отразить различия почв по трофности и гидротермическим режимам. Органо-минеральные (гумусовые) горизонты разделены по количеству и составу гумуса. Возможно присутствие в профиле несколько органо-генных и гумусовых горизонтов с разной степенью разложения или гумификации органического материала. В этом случае диагностическое значение придается одному горизонту, имеющему лучшее выражение и наибольшую мощность. Под органо-генными и/или органо-минеральными горизонтами располагаются минеральные горизонты, постепенно переходящие к почвообразующей породе.

Почвенные горизонты в почве могут располагаться закономерно, когда степень измененности почвообразующей породы постепенно уменьшается вниз по профилю. Эта закономерность может быть нарушена абиогенными факторами или механическим перемешиванием, в связи с чем выделяют различные типы строения почвенного профиля .

1.1. Возникновение магнитных свойств почв

В настоящее время существуют представления о нескольких путях генезиса магнитных свойств почв: педогенный, техногенный, литогенный и космогенный. В результате исследований в составе магнитных фракций из почв были выделены и морфологически описаны сферические магнитные частицы. Одной из первых гипотез их происхождения стал бактериальный синтез [4, 24]. Но в дальнейшем начали появляться техногенная [3, 30, 32-33], литогенная [20, 29] и космогенная [1, 26, 28, 35] гипотезы их формирования. Так, магнитные свойства минеральных горизонтов почв во многом унаследованы от почвообразующих пород и определяются магнетизмом почвенных минералов.

В настоящее время сферические магнитные частицы являются отдельным объектом изучения и используются исследователями как маркеры переноса естественных почвенных и загрязняющих веществ. Каждый из рассмотренных механизмов в зависимости от конкретных условий проявляется в разной степени. Похоже, что все больше исследователей полагает, что в целом основной вклад в магнетизм гумусовых горизонтов почв различных почвенных зон обусловлен, в основном, космогенным материалом. Так, ежегодно на поверхность Земли выпадает до 3000 т метеоритного вещества. В среднем железные метеориты содержат 90% железа, 8,5% никеля, 0,5% кобальта и 1% других элементов [37]. Согласно существующим оценкам, общая масса железа, принесенная метеоритами на Землю за время ее существования, составляет примерно 150 млрд. т.

Большинство современных исследователей считают, что в настоящее время антропогенная деятельность, в частности горнодобывающая и металлургическая промышленность, существенно влияет на перемещение и накопление железа в почвах. Ежегодно человек выносит из недр Земли на ее поверхность такое количество горных пород, которое всего в три раза

меньше общей суммы твердого стока всех рек планеты; эти породы содержат не менее 5-6% железа [36]. За последние 500 лет добыто до 2 млн. т железа, и интенсивность его добычи только возрастает. За весь антропогенный период выплавлено около 20 млрд. т железа, из него мировой металлофонд (сооружения, машины, механизмы) составляет 6 млрд. т, а остальные 14 млрд. т железа рассеяны в окружающей среде. Сюда следует добавить твердый сток и эоловый вынос, достигающие 10 млрд. т/год, что приближается к величине общей глобальной денудации – 23-25 млрд. т/год. При содержании в них железа в количестве 5% годовая величина его перемещения и дополнительного привноса в почвы составит 500 млн. т.

Также несомненно, что в настоящее время в индустриальных регионах и мегаполисах антропогенная деятельность приводит к заметному увеличению количества магнитного материала, попадающего в почву из атмосферы. Над крупными промышленными центрами еще в конце прошлого века в атмосферу ежегодно выбрасывалось до 30-50 т пыли, содержащей не менее 20-30% диспергированного железа [36]. Пыление открытых карьеров и отвалов также способствует поступлению металла в атмосферу и его перемещению на значительных площадях.

Дополнительным источником является вынос на поверхность Земли глубинных пород 520 действующими вулканами, составляющий как минимум 500 млн. т ежегодно [36]. Эти выбросы содержат не менее 7-10% железа в аллофаново-аморфных формах, которые наиболее легко растворяются и мигрируют в пространстве.

Таким образом, в настоящее время геохимический круговорот железа в десятки, а, возможно, в сотни раз превышает его естественный круговорот. По интенсивности антропогенной миграции формируются локальные и даже региональные антропоаномальные регионы. Среди отдельных крупных

геохимических очагов железа можно упомянуть земли, нарушенные разработкой курских железистых кварцитов (27 тыс. га).

В целом, общие запасы железа в верхнем 10-сантиметровом слое всех почв земного шара оценивают в 1 000 млрд. т, а в метровой толще – не менее, чем в 10 000 млрд. т. При этом содержание железа в океане составляет 14 млрд. т, а в мировом хозяйстве – 8 млрд. т. Таким образом, в почве содержится более чем в 700 раз больше железа, чем в океане. Такое соотношение подтверждает вывод о малой подвижности железа и его прочном закреплении в почвах в первичных и вторичных минералах, новообразованиях и др. [36].

Следует отметить, что одни лишь магнитные измерения часто не могут привести к достоверным выводам. Наблюдаемые свойства и эффекты на первых порах не столь объясняют внутренние особенности вещества, сколько сами нуждаются в объяснении. Это особенно важно учитывать при изучении магнитных свойств с точки зрения генезиса минералов, почв и горных пород. Связи свойств и генезиса опосредованы: условия зарождения, роста и преобразования минералов и агрегатов определяют их химический и фазовый состав, кристаллическую структуру, реальное кристаллическое состояние, внешнюю и внутреннюю морфологию, а все эти особенности играют роль факторов, определяющих физические свойства.

1.2. Органогенные горизонты

Наиболее общим для всех почв результатом почвообразовательного процесса является образование органогенных горизонтов. Органическое вещество почв весьма сложно по составу. Это растительные остатки, состоящие из белков, углеводов, лигнина, дубильных веществ, смол, жиров и т.д., и продукты их разложения и трансформации. Кроме растительных остатков заметный вклад вносят выделения живых корней. Одновременно с распадом органического вещества идут процессы синтеза из продуктов

распада. Содержание органического вещества в органогенных горизонтах превышает 70% (по весу).

Лесная подстилка — маломощный (до 15 см) поверхностный слой разлагающихся растительных и животных остатков, частично, особенно в нижней части, перемешанного с минеральными частицами. Лесная подстилка сплошным ковром покрывает поверхность почвы под пологом леса; обычно имеет слоистое строение, причем различаются слои (подгоризонты): свежий или слабо разложившийся опад (L); слой ферментации или разложения (F), в котором еще преобладают растительные остатки, отчасти сохранившие морфологическое строение, и слой гумификации (H), в котором преобладают сильно разложившиеся растительные остатки без видимой исходной формы и имеется механическая примесь минеральных компонентов [19].

Важным фактом, установленным при изучении магнитных свойств почв, является повышенный магнетизм органогенных горизонтов. Это явление наиболее выражено в почвах, развивающихся в автоморфных условиях на лессах и лессовидных суглинках различных природных зон. Высокие значения восприимчивости часто свойственны слою гумификации лесной подстилки. Исследования показывают, что почвенные оксиды и гидроксиды железа обычно находятся в высокодисперсном состоянии. Высокие значения магнитных параметров гумусовых горизонтов обусловлены в основном магнетитом.

В автоморфных ландшафтах, характеризующихся промывным водным режимом, поступление соединений железа из нижележащих горизонтов ограничено и обусловлено механическим перемешиванием. Процессы, связанные с накоплением аэрогенных магнитных частиц как естественного, так и техногенного происхождения, наиболее ярко проявляются в органогенных горизонтах. Древесина и целлюлоза обладают диамагнитными свойствами [34]. Вероятно, и другие внутренние ткани растений

диамагнитны. Действительно, за исключением гипераккумуляторов, растения не стремятся поглощать тяжелые металлы с помощью корней, относительное содержание металлов, в том числе железа, в их внутренних тканях существенно меньше, чем в почвах. В частности, поступление в почвы железа с высвобождающимися зольными элементами при сжигании растительных остатков не считается сколько-нибудь существенным фактором [25]. Твердые частицы, в том числе магнитные, могут накапливаться в растениях при поверхностном осаждении – захватываться устьицами листьев, попадать в поры коры, прилипать к смолянистым выделениям. И, разумеется, захватываться непосредственно в верхнем слое подстилки и далее мигрировать вниз с током воды. Другими словами, основной механизм модификации магнитных свойств и растений, и органогенных горизонтов почв должен быть связан с процессом аккумуляции «внешних» по отношению к растениям и к органическим соединениям почв сильномагнитных частиц.

1.3. Минеральные горизонты

Минеральные горизонты менее гумусированы, изменены растворами, мигрирующими сверху вниз при промывном и снизу вверх при выпотных режимах влажности. Влияние живых организмов на организацию почвенной массы этих горизонтов гораздо слабее, чем в органогенных. Организация почвенной массы минеральных горизонтов в значительной степени определяется абиогенными факторами. В них накапливаются вещества; вымываемые из поверхностных горизонтов, а также попадающие сюда с растворами грунтовых вод. В результате почвенная масса приобретает большую, по сравнению с поверхностными горизонтами, плотность, специфическую структуру и текстуру. Минеральных горизонтов, в зависимости от характера и степени изменений, может быть несколько.

Твердая фаза занимает до 60% (а иногда и более) объема почвы и состоит в основном из минеральных и органических веществ. Минералы составляют в гумусовых горизонтах почв не менее 90-95% от массы твердой фазы почв, а в более глубоких горизонтах до 99% и выше. Минеральная часть в значительной мере наследуется от почвообразующей породы и представлена первичными и вторичными минералами. По мере развития почвы происходят изменения минералов в результате выветривания и почвообразования. Магнитные свойства минеральных горизонтов наиболее давно и хорошо изучены.

В составе органического вещества почв преобладают гуминовые вещества, подразделяющиеся в зависимости от растворимости в кислотах и щелочах на гумин, гуминовые кислоты и фульвокислоты. Гуминовые кислоты – это специфические органические кислоты, состоящие из углерода, азота, кислорода и водорода. Основой их структуры являются ароматические соединения типа фенолов и азотосодержащие соединения циклического и алифатического рядов, соединенные между собой мостиками из атомов кислорода, азота и более сложных атомарных группировок. Гуминовые кислоты имеют сложное губчатое строение с множеством микропор. Фульвокислоты имеют более простое строение. Сетка ароматических соединений выражена слабее, но имеется большое количество боковых радикалов [15]. По своей природе органические вещества являются диамагнитными. Однако их способность образовывать различные соединения с железом может приводить к парамагнетизму. В зависимости от содержания парамагнитных ионов восприимчивость ГК и ФК изменяется от диамагнитной $-0,48 \cdot 10^{-6}$ до парамагнитной $12 \cdot 10^{-6}$ см³/г [1].

Поскольку минеральные вещества составляют основную часть почв, их магнитные свойства во многом определяются магнетизмом почвенных минералов. По химическому составу большинство минералов – это кислородные соединения. Среди всех порообразующих минералов

основными являются оксиды и силикаты, которые содержат ионы железа как в кристаллической структуре, так и в виде соединений или групп ионов на поверхности. Многие магнитные свойства почвенного образца определяются содержанием и магнетизмом оксидов и гидроксидов, в первую очередь оксидами и гидроксидами железа. Железо в различных соединениях твердой фазы почв встречается в двух и трехвалентном виде (Fe^{3+} , Fe^{2+})

Таблица 1.

Магнитные свойства минералов (ферри- и антиферромагнетики).

Название вещества	χ , 10^{-6} см ³ /г	Температура магнитного упорядочения	J_s , Гс·см ³ /г
Ферригидрит	150 ÷ 200	$T_N = -265^0$ С	0,4 / 1,2
Гетит	120 ÷ 430	$T_N = 120^0$ С	0,20 / 0,25
Лепидокрокит	163 ÷ 245	$T_N = -196^0$ С	0,25 / 0,32
Ферроксицит	2440 ÷ 27500	$T_N = 177^0$ С	7 / 9
Магнетит	300 000 ÷ 2 000 000	$T_C = 578^0$ С	97 / 92
Маггемит	300 000 ÷ 2 000 000	$T_C = 675^0$ С	88 / 83
Гематит	80 ÷ 260	$T_N = 675^0$ С $T_M = -20^0$ С	0,36

Основные магнитные свойства наиболее распространенных железосодержащих минералов представлены в табл. 1. Наибольшими и близкими величинами начальной восприимчивости и намагниченности характеризуются магнетит (Fe_3O_4) и маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Маггемит в природных условиях неустойчив и легко переходит в устойчивый гематит; как правило, маггемит встречается только в виде микроскопически мелких выделений, преимущественно в продуктах окисления магнетита.

Гораздо большее распространение в почвах и породах имеет магнетит ($\text{FeO Fe}_2\text{O}_3$), его катионное распределение имеет вид $(\text{Fe}^{3+})[\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}]\text{O}_{32}$. Поэтому восприимчивость и намагниченность почв, как правило, определяется магнетитом. Удельная намагниченность насыщения магнетита

– $92 \text{ Гс}\cdot\text{см}^3/\text{Г}$ при $T=300 \text{ К}$. Константы магнитной анизотропии при 20° С равны: $K_1 = -120\cdot 10^2 \text{ Дж/м}^3$ и $K_2 = -280\cdot 10^2 \text{ Дж/м}^3$ [21, 27]

1.4. Магнитные свойства

Процессы намагничивания

Смещение границ между доменами и вращение намагниченности доменов – это элементарные процессы намагничивания ферромагнетика. Энергетически более легким является процесс смещения границ, при этом векторы намагниченности M_s доменов, эти процессы происходят в относительно слабых магнитных полях. В первом приближении намагниченности M_s можно считать не поворачивающейся относительно осей легкого намагничивания. При вращении вектора M_s затрачивается работа против энергии анизотропии, поэтому процесс вращение магнитных моментов энергетически более трудный и происходит в достаточно сильных магнитных полях. В реальных кристаллах имеет место очень сложное расположение осей анизотропии, напряжения различной природы и дефекты кристаллической решетки влияют на процессы намагничивания. Это приводит к неоднозначности положения доменных границ, а, следовательно, к обратимым и необратимым процессам намагничивания.

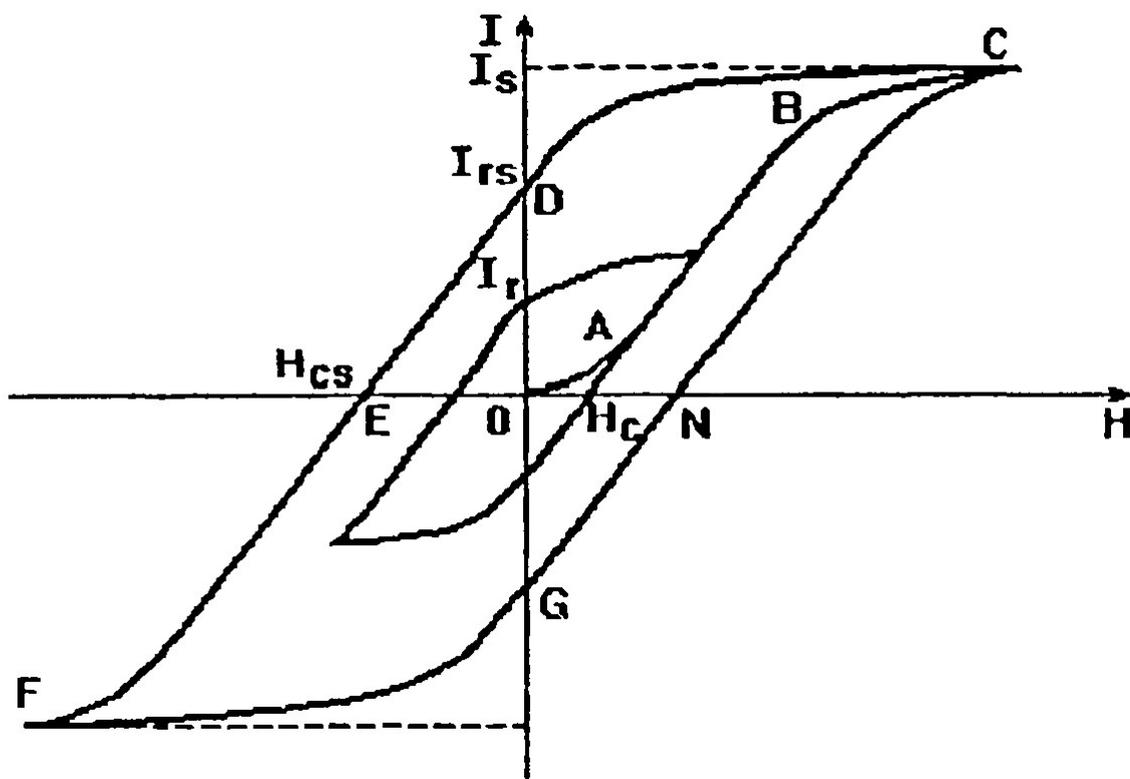


Рисунок 1. Типичная кривая намагничивания и петля гистерезиса ферромагнетика

Доменная структура и необратимые процессы приводят к явлению магнитного гистерезиса (рис. 1), заключающемуся в несовпадении кривых намагничивания и перемагничивания. Кривая ABC называется первоначальной кривой намагничивания. На начальном участке этой кривой OA идут обратимые процессы намагничивания, в основном, смещения границ. На участке AB необратимые смещения границ, и наконец, на участке BC процессы вращения векторов M_s доменов. После достижения технического насыщения (ориентация M_s всех доменов направлена по магнитному полю H) намагниченность всего образца $I = I_s$, при уменьшении H намагниченность будет также уменьшаться, но уже по кривой CD, которая не совпадает с ABC. При $H = 0$ будет сохраняться часть намагниченности, равная OD, которая называется остаточной намагниченностью (I_r). Дальнейшее уменьшение H (движение в отрицательном направлении) вызывает уменьшение намагниченности и при некотором значении поля называемого коэрцитивной силой (H_c) намагниченность станет равной нулю

(точка E). Однако это не означает, что образец размагнитился (при выключении поля при $H = H_c$, намагниченность не останется равной нулю). При дальнейшем уменьшении H (движение намагниченности по кривой EF) достигается насыщение $I = -I_s$. Если теперь изменять магнитное поле H , получим кривую FGNC, симметричную кривой CDEF. Обе кривые гистерезиса – нисходящая CDEF и восходящая FGNC не проходят через 0. Площадь петли гистерезиса является мерой энергии необратимых процессов. Чем шире петля, тем большую роль играют необратимые процессы и тем больше величина остаточной намагниченности I_r .

В зависимости от способа и условий намагничивания образца различают несколько видов остаточной намагниченности. Вязкая остаточная намагниченность I_{rv} возникает в результате процессов магнитного последействия в однодоменных и многодоменных частицах, это часть намагниченности, образующаяся при изотермическом воздействии постоянного магнитного поля во времени. В постоянном магнитном поле I_{rv} растет пропорционально логарифму времени.. Существует два основных механизма её образования. Первый заключается в том, что увеличение намагниченности с течением времени происходит за счет энергии тепловых флуктуаций, помогающих магнитным моментам доменов преодолевать все более высокие энергетические барьеры. Второй механизм состоит в перестройке самой структуры энергетических барьеров за счет диффузии атомов, точечных дефектов в кристаллической решетке (диффузионное последействие). Эта перестройка способствует росту I_{rv} . Вязкий вклад в намагниченность, всегда присутствующий в горных породах, обусловлен продолжительным воздействием геомагнитного поля. Исследования показали, что в ферромагнитных минералах горных пород наблюдается преимущественно диффузионная вязкость. Поэтому есть основания предполагать, что в почвенных минералах вязкая намагниченность также имеет преимущественно диффузионную природу.

В ферромагнетиках при температуре меньше температуры Кюри роль внешнего магнитного поля сводится к описанным выше процессам. Внешнее магнитное поле борется с магнитным беспорядком в ориентации векторов M_s отдельных доменов, не изменяя при этом магнитную структуру и намагниченность насыщения I_s . В антиферромагнетиках и ферримагнетиках влияние магнитного поля на магнитную структуру более сложное. Здесь в дополнении к описанным выше процессам намагничивания ферромагнетиков оно может стать причиной магнитных фазовых переходов.

Размерные эффекты и суперпарамагнетизм

При уменьшении размеров ферримагнитных кристаллов достигается некий предельный размер, ниже которого образование доменной структуры становится энергетически невыгодно. В этом случае кристаллы представляют из себя однородно намагниченные домены. Однодоменные частицы (SD) могут перемагничиваться только путём вращения векторов M_s . Магнитные свойства ансамбля однодоменных частиц в первом приближении определяются распределением магнитных частиц по размерам, точнее распределением объема магнитных частиц по их размерам.

Действительно, при повышении температуры T магнитный момент каждой частицы будет испытывать тепловые флуктуации. При малых T энергия анизотропии (KV) много больше энергии тепловых флуктуации (kT). Начиная с некоторой T энергия kT будет сравнима с KV , и тогда, за какое-то время, определяемое вероятностью процесса, пропорциональной $\exp(-KV/kT)$, частица может быть перемагничена не за счет воздействия внешнего поля H , а благодаря энергии тепловых флуктуации kT . Роль тепловых флуктуации увеличивается, с одной стороны, с повышением T , а с другой – за счет уменьшения объема частицы V . Если рассмотреть совокупность однодоменных частиц одного размера, то магнитные свойства такой совокупности будут определяться отношением объема частиц к температуре (V/T).

Если ансамбль частиц намагнитить в поле, то после его снятия остаточная намагниченность будет уменьшаться с течением времени под действием тепловых флуктуаций по экспоненциальному закону:

$$I_r(t) = I_r(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right),$$

где t - время, отсчитываемое после снятия H , τ_0 – время релаксации. Магнитные свойства ансамбля малых частиц различаются в зависимости от времени релаксации τ_0 . Если принять, что время измерения намагниченности равно t_0 , то:

1. при $t_0 \leq \tau_0$ направление M_s частицы можно считать полностью стабилизированными и практически не зависящим от тепловых флуктуаций.

2. при $t_0 \geq \tau_0$ направление M_s непрерывно изменяется под действием тепловых колебаний. У ансамбля таких частиц $I_r = 0$, $H_c = 0$. В магнитном поле такой ансамбль ведет себя как парамагнитный газ молекул с очень большим по сравнению с обычными парамагнетиками магнитным моментом. Такие частицы получили название суперпарамагнитных (SP), а само явление – суперпарамагнетизм. Восприимчивость суперпарамагнетиков из-за большого магнитного момента частиц существенно выше, чем восприимчивость парамагнетиков. При времени измерения намагниченности $t_0 \sim 1$ с верхнюю границу объема частиц с суперпарамагнитными свойствами можно оценить как $V_{SP} \leq 20 \cdot kT/K$. Намагничивание суперпарамагнитных частиц происходит в соответствии с законом Ланжевена.

Если время релаксации $\tau_0 \gg t_0$, то частицы разбиты на отдельные домены и называются многодоменными (MD). При промежуточных τ_0 ($> t_0$) частицы обладают промежуточными между стабильными и суперпарамагнитными свойствами. У ансамбля таких частиц остаточная намагниченность непрерывно уменьшается, их намагничивание также как и

размагничивание растянуто во времени. Такие частицы называются псевдооднородными (PSD), или магнитовязкими.

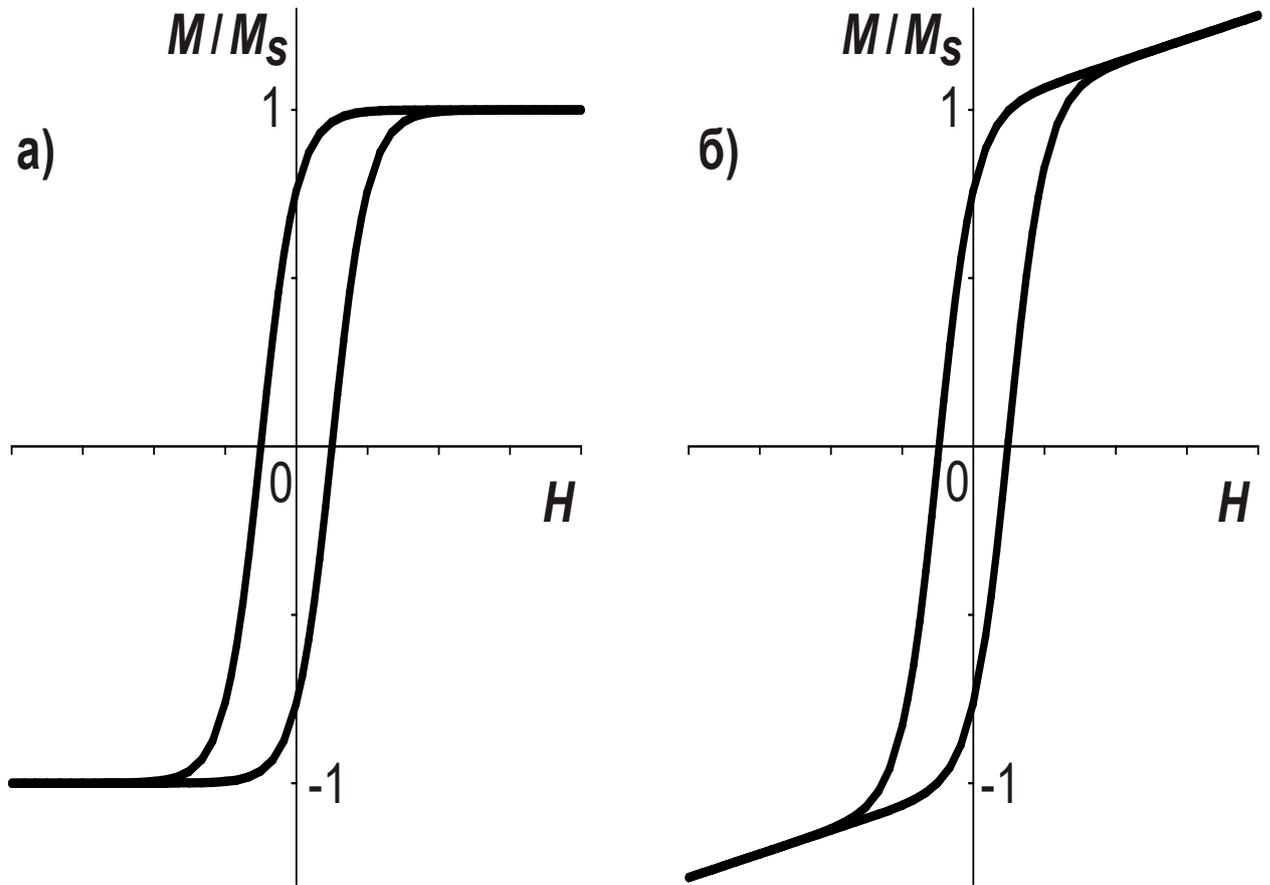


Рисунок 2. Ожидаемые кривые намагничивания минеральных горизонтов при различном соотношении вкладов многодоменных, псевдооднородных и однодоменных частиц, нормированные на намагниченность насыщения.

Критические размеры частиц магнетита 0,01-0,1 мкм (SP-PSD) и 10-20 мкм (PSD-MD) [21, 27]. Таким образом, на кривых намагничивания вклад многодоменных частиц магнетита должен характеризоваться достаточно узкой петлей гистерезиса с почти горизонтальными участками в области технического насыщения (рис. 2а) и очень малым положительным наклоном. При увеличении магнитного поля на фоне зависимости 2а должны проявиться вклады псевдооднородных (в виде затянутого перехода) и в сильных полях – однодоменных-суперпарамагнитных частиц в виде линейного участка с положительным наклоном (рис. 2б). В зависимости от

распределения частиц различных естественных магнитных минералов по размерам могут наблюдаться сложные петли гистерезиса. Чисто теоретически, при уменьшении количества сильномагнитных примесных частиц можно ожидать проявления диамагнитного вклада “чистой” почвенной матрицы. В горных породах и минеральных почвах наиболее часто наблюдаются кривые намагничивания типа 2б. В исследованных почвах автоморфных ландшафтов подобные кривые намагничивания должны быть характерны и для чистых, и для загрязненных почв.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хвойные леса Кольской Субарктики, находящиеся на северном пределе своего ареала, постоянно ощущают мощный природный стресс. Вместе с тем, лесные экосистемы в окрестностях комбинатов ОАО «Кольская ГМК» в течение шести десятилетий испытывают воздействие атмосферных выбросов диоксида серы и тяжелых металлов. Многочисленные исследования выявили значительные изменения в структуре и функционировании растительных и микробных сообществ и почв с приближением к источникам загрязнения [5, 6-9, 12, 14].

В последние двадцать лет сокращение объемов производства и совершенствование его технологии привело к значительному снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями Кольской ГМК. Однако негативное влияние техногенного загрязнения на природные экосистемы продолжается, а огромные запасы тяжелых металлов, накопленных в почвах, сохраняют их высокую токсичность и тормозят восстановление биоты.

2.1. Природные условия

Исследования проводили в лесных экосистемах Кольского п-ва, в течение более 60 лет подверженных влиянию атмосферных выбросов горно-металлургического комбината «Североникель». Объектами исследования послужили почвы типичных для северной тайги экосистем еловых лесов, занимающих автономные позиции в ландшафте и наиболее чувствительных к антропогенному воздействию. Зональные еловые леса на северном пределе своего распространения характеризуются низкорослыми сильно разреженными древостоями, в напочвенном покрове преобладают зеленые мхи, лишайники и кустарнички. Почвенный покров представлен преимущественно маломощными иллювиально-(железисто-гумусовыми

подзолами на сильно завалуненных несортированных моренных отложениях легкого гранулометрического состава.

2.2. Техногенное загрязнение

Весомый вклад в загрязнение природных экосистем вносят кислотообразующие соединения серы и тяжелые металлы, поступающие в атмосферу в составе выбросов крупнейшего в Северной Европе медно-никелевого комбината «Североникель». К середине 1980-х годов, периоду максимальной промышленной активности, выбросы загрязняющих веществ (преимущественно диоксида серы) в Мурманской области достигли почти 1 млн. т [23], в том числе комбинатом «Североникель» – 250 тыс. т. По данным Кольской ГМК, благодаря реконструкции производства выбросы диоксида серы в атмосферу комбинатом в последние два десятилетия были существенно сокращены и в настоящее время не превышают 34 тыс. т. С 1990 по 2013 гг. выбросы никеля сократились на 76% до 387 тонн/год, меди – на 88% до 439 тонн/год. Однако ежегодное поступление металлов из атмосферы в локальной зоне воздействия комбината «Североникель» сохраняется на высоком уровне – до 160-360 мг Ni/м² и 170-270 мг Cu/м² в течение 2005-2007 гг. Несмотря на сокращение выбросов концентрации Ni, Cu и Co в снеге вблизи источника загрязнения остаются экстремально высокими, в 2500, 1500 и 400 раз превышая фоновые уровни [31]. Концентрации металлов в дождевых водах, хотя и снизились в 2005-2011 гг. в 5-6 раз по сравнению с 1994 г., все еще выше фоновых значений в 150, 80 и >50 раз, соответственно.

2.3. Исследуемые участки

Исследования проводили на 10 постоянных участках мониторинга на расстоянии от 2 до 64 км в южном направлении от комбината «Североникель» вдоль шоссе Мурманск – С.-Петербург (табл. 2, рис. 3).

Рисунок 3. Расположение участков мониторинга.

Таблица 2. Объекты исследования. Экосистемы еловых лесов на разном расстоянии от ГМК «Североникель»

Название сообщества	Состав древостоя	Класс лесных экосистем	Стадия техногенной сукцессии	Высота н.ур.м., м	Почва	Расстояние, км	Обозначение
Ельник с березой кустарничково-зеленомошный	6Е4Б	Ненарушенные (начального повреждения)	Условно фоновый тип состояния	160	Подзол иллювиально-гумусовый	60	К-100
Ельник с березой зеленомошно-кустарничковый	8Е2Б	Начального повреждения	Стадия начальной дефолиации	300	Подзол иллювиально-гумусовый	28	К-28
Ельник с березой кустарничковый	9Е1Б	Поврежденные	Стадия дефолиации	290	Подзол иллювиально-гумусовый химически загрязненный	21	К-24
Ельник с березой кустарничковый	8Е2Б	Поврежденные	Стадия интенсивной дефолиации	210	Подзол иллювиально-гумусовый химически загрязненный	19	К-20
Ельник кустарничковый	10Е	Сильно поврежденные	Стадия интенсивной дефолиации	210	Подзол иллювиально-гумусовый химически загрязненный	17	К-18
Елово-березовое вороничное редколесье	4Е6Б	Отмирающие	Техногенное редколесье	240	Подзол иллювиально-гумусовый химически загрязненный	7	К-7
Деревьев нет	-	Полностью разрушенные экосистемы	Техногенная пустошь	190	Подзол иллювиально-железистый химически загрязненный	5	МП 2007/8
Деревьев нет	-	Полностью разрушенные экосистемы	Техногенная пустошь	150	Хемозем, загрязненный Сu и Ni по подзолу иллювиально-железистому	3	МП 2004/5
Деревьев нет	-	Полностью разрушенные экосистемы	Техногенная пустошь	150	Абразём альфегумусовый иллювиально-железистый	2,5	МП 2003/6

В фоновых районах центральной части Кольского полуострова под еловыми лесами распространены иллювиально-гумусовые подзолы песчаного гранулометрического состава на сильно завалуненных несортированных моренных отложениях [16]. Профилю исследуемых подзолов в еловых лесах на фоновой территории (60 км от комбината) свойственен типичный набор основных генетических горизонтов: O – E – BHF – BC – C. Для них характерны следующие морфологические признаки: обязательное наличие с поверхности грубогумусного органогенного слоя (лесной подстилки O), маломощность (карликовость) и однотипность строения минерального профиля, осветленность верхней части минеральной толщи (элювиального подзолистого горизонта E) и охристая, красновато-бурая или темно-коричневая окраска срединной части (альфегумусового горизонта BHF) за счет иллювиированных железо- и алюмо-органических соединений, постепенный переход в почвообразующую породу C [16, 18].

Поверхностный органогенный горизонт лесных почв, или лесная подстилка, состоит преимущественно из разлагающихся растительных остатков и содержит наибольшее количество органического вещества и элементов питания на единицу массы. В бореальных лесах именно в нем распространена основная масса корней растений. Вместе с тем, благодаря своему поверхностному расположению, этот горизонт первым принимает загрязняющие вещества, поступающие из атмосферы, связывает и аккумулирует их в своем составе. Поэтому изучение магнитных свойств органогенных горизонтов почв индустриальных регионов представляет большой интерес для диагностики уровня загрязнения и состава поллютантов.

Альфегумусовый горизонт BHF в иллювиально-(железисто)-гумусовых подзолах является диагностическим для многих типов почв, характерных для почв таежных и тундровых ландшафтов и обладающих легким гранулометрическим составом. Образование этого горизонта обусловлено

процессами иллювиирования комплексных соединений железа, алюминия и органического вещества. Окрашен он обычно в яркие желто-охристые или кофейно-коричневые тона в зависимости от содержания оксидов железа и органического вещества в составе пленок, осажденных на поверхности минеральных частиц [17, 18]. Окраска обычно ослабевает с глубиной.

В зависимости от соотношения оксидов железа и органического вещества в составе пленок различают иллювиально-гумусовый (ВН) и иллювиально-железистый (ВF) горизонты, которые служат основанием для выделения иллювиально-гумусового и иллювиально-железистого подтипов альфегумусовых почв. Иллювиально-гумусовый горизонт ВН обладает кофейно-коричневой окраской, содержит от 3 до 10% гумуса и 2-5% оксалатрастворимых форм оксида железа [17]. Иллювиально-железистый горизонт ВF окрашен в охристые тона, содержит менее 3% гумуса и менее 2% оксалаторстворимых форм оксида железа.

Почвы техногенных пустошей в пределах нескольких километров от ГМК «Североникель» под воздействием сильной техногенной нагрузки заметно меняют свой облик [11]. Естественные иллювиально-гумусовые подзолы в связи с резким обеднением органическим веществом и загрязнением тяжелыми металлами трансформируются в иллювиально-железистые химически загрязнённые подзолы (МП-2007/8). Эти почвы сохраняют все типичные горизонты, однако, подстилка сильно деградирована и смешана с подзолистым горизонтом, а ниже залегает иллювиально-железистый горизонт ВF. Сильное загрязнение верхнего слоя приводит к формированию хемозёмов (Podzol (Phytotoxic)), загрязненных Cu и Ni по подзолу (МП-2004/5). Поверхностный горизонт хемозёмов представлен сильно разложенной подстилкой с высокой долей тонкодисперсных минеральных частиц и экстремальным содержанием доступных соединений никеля (230 мг/кг) и меди (800 мг/кг). Ближе к комбинату развитие эрозионных процессов сопровождается разрушением и

потерей верхних (органогенного и подзолистого) горизонтов и обнажением иллювиального горизонта ВF, приводя к образованию абразема альфегумусового (МП-2003/6, табл. 1). Следовательно, деградация верхней части почв пустошей под воздействием техногенной нагрузки приводит к изменению классификационной принадлежности почв на подтиповом или даже типовом уровне.

Образцы органогенных горизонтов почв – лесных подстилок – отбирали методом систематического отбора в 4-кратной повторности с участков размером 20*20 м и из разреза на границе участка. Каждый из 4-х подучастков характеризовали смешанным образцом, также систематически отобранным (с помощью бура). На каждом из участков брали пробы из разных подгоризонтов подстилки: верхнего листового подгоризонта (OL), нижележащего ферментативного и гумусового подгоризонтов (OFH), подстилки в целом (O). Для сравнения отбирали также основные минеральные горизонты подзолов – E, BH (BF), BC и C. Образцы высушивали и хранили в воздушно-сухом состоянии до проведения анализов. Концентрации металлов в растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS 7500a, Agilent).

Наглядное представление об изменении профильного распределения оксалаторастворимых соединений алюминия, железа и марганца по мере техногенной трансформации почв дает сравнение почв техногенных пустошей. Во всех почвах пустошей доминируют оксалаторастворимые соединения алюминия, причем подзол отличается его наибольшей дифференциацией по профилю и аккумуляцией в иллювиальном горизонте (рис. 4). Наибольшее содержание и дифференциация железа и марганца по профилю свойственна хемозему. В иллювиальных горизонтах исследуемых почв содержится также большое количество оксалаторастворимых соединений никеля (80-110 мг/кг) и меди (210-880 мг/кг), что указывает на их немалое участие в формировании аморфных осадков. Типичное для подзолов

элювиально-иллювиальное распределение оксалоторастворимых соединений железа, алюминия и марганца по профилю под воздействием техногенной нагрузки сменяется регрессивно-аккумулятивным в абраземах.

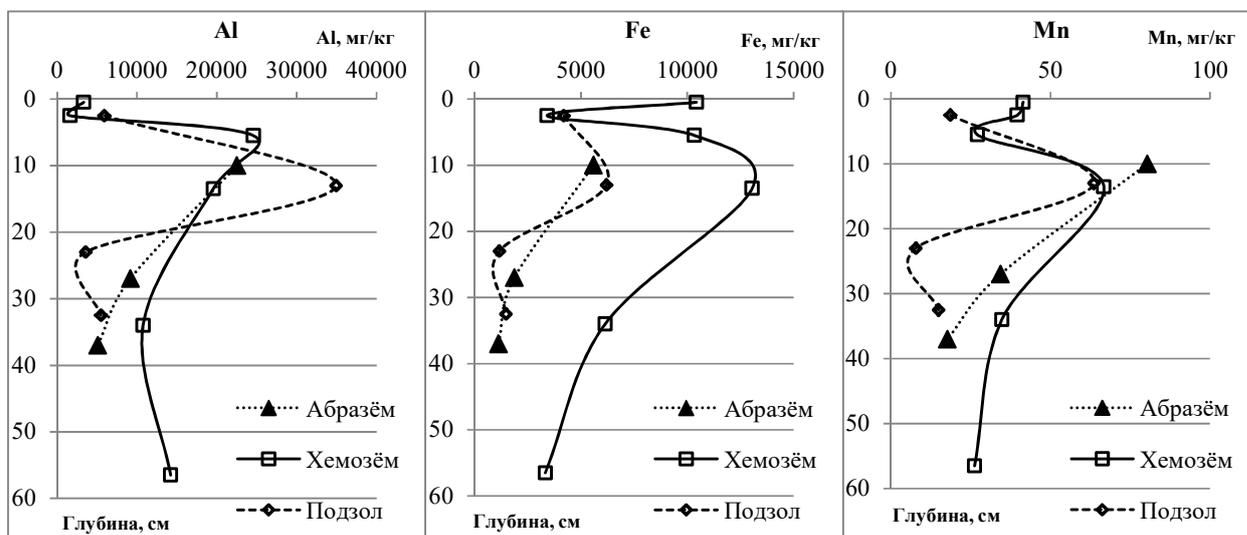


Рисунок 4. Распределение оксалоторастворимых соединений алюминия, железа и марганца по профилю почв техногенных пустошей (по [10]).

2.4. Методы исследований

При подготовке к определению кривых намагничивания с целью гомогенизации образцов для каждого для каждого подгоризонта образцы подстилок размалывали в лабораторной шаровой мельнице с шарами из агата (природный минерал, скрытокристаллическая разновидность кварца. Чистый агат – диамагнетик).

Для исследования образцы помещались в парамагнитные полиэтиленовые капсулы диаметром 5 мм, высотой в 3 см (с также измеренными кривыми намагничивания), взвешивались и уплотнялись (для минимизации перемещения частиц внутри капсул).

В связи с тем, что реальные кривые намагничивания совпали с ожидаемыми, измерения проводились с переменным шагом по полю от 50 Э вблизи нуля и до 150 Э в сильных полях больших 3 кЭ. Для получения

значений начальной восприимчивости и дифференциальной восприимчивости в сильных полях соответствующие участки кривых намагничивания (до 0,5 кЭ и более 5кЭ) линейно аппроксимировались. Коэффициенты наклона данных прямых равны соответствующим восприимчивостям.

Характеристики штока:

Диаметр 4 мм.
Материал – кварцевое
стекло
Сигнал парамагнитный

Характеристики капсулы:

Диаметр 4 мм.
Длина 2,5-3 см.
Масса 30-40 мг.
Сигнал парамагнитный

Исследования магнитных свойств почв проводились на вибрационном магнитометре фирмы LakeShore серия 7407 (рис. 3) при комнатной температуре. Данная установка полностью автоматизирована. Капсула с образцом крепилась на кварцевый шток и в процессе измерений находилась равноудаленно между полюсными наконечниками для получения достоверных результатов.

Генератором механических колебаний с частотой 60Гц шток приводился в движение, вследствие чего изменялся магнитный поток, пронизывающий измерительные катушки. Вызванное ЭДС индукции, пропорциональное магнитному моменту образца, усиливается с помощью АЦП. Сигнал ЭДС преобразуется в цифровой, и записывается в память ЭВМ. Поле, создаваемое электромагнитом, измеряется при помощи датчика Холла. Сигнал напряжения Холла также усиливается, преобразуется и записывается. Генератор механических колебаний, источник питания, измерительные катушки и датчик Холла соединены напрямую с ЭВМ посредством АЦП и



Рисунок 5. Общий вид экспериментальной установки.

ЦАП, таким образом для проведения измерений достаточно обращаться только к программе управления.

Основные характеристики установки:

1. Максимальное поле, достижимое на установке, равно 16 кЭ;
2. Дискретность измерения поля 10 Э;
3. Точность измерения поля 0.5 Э;
4. Точность измерения величин магнитного момента 10^{-5} Гс·см³ (emu).

Измерение намагниченности

Исходная кривая для определения магнитного момента штока с пустой капсулой представлена на рис. 6. Его максимальный магнитный момент относительно образцов довольно мал, и в дальнейшем вклад его в суммарный момент будет не существенен. Зависимость момента от значения поля аппроксимируется линейной функцией методом наименьших квадратов.

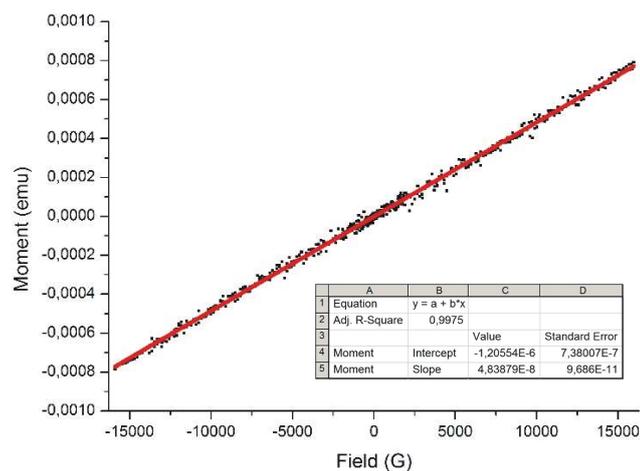


Рисунок 6. Магнитный момент штока с пустой капсулой.

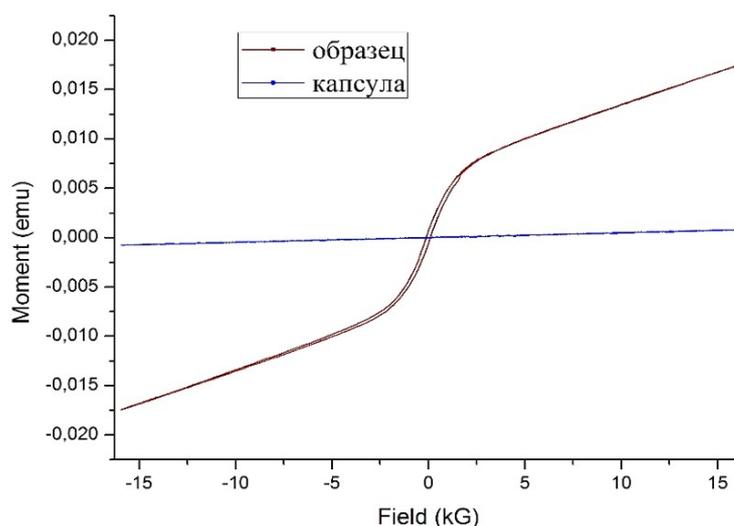


Рисунок 7. Магнитный момент образца в капсуле на штоке.

Исходные кривые для определения магнитного момента, полученные при анализе одного из образцов почв представлены на рисунке 7 – измеряемая для капсулы с образцом на штоке и пустой капсулы на штоке. Магнитный момент «образца» много больше парамагнитного вклада «капсулы» почти везде, кроме узкой области малых полей. Магнитный момент истинного образца определяется как разность магнитного момента «образца» и аппроксимирующей момент «капсулы» прямой.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

3.1. Магнитные свойства органогенных горизонтов почв

Кривые намагничивания подстилок показаны (рис. 8а) по данным Самсоновой и др. [19]. В целом, техническая намагниченность возрастает по мере приближения к комбинату. Возрастание, вероятно, может быть связано с двумя основными факторами: 1) возрастанием аэротехногенных выпадений сильномагнитных частиц и 2) с поступлением магнитных частиц условно-локального происхождения – с подмешиванием частиц из нижележащих минеральных горизонтов ввиду жизнедеятельности почвенных организмов и с переносом магнитных частиц с близлежащих открытых поверхностей с ветровой эрозией. Можно ожидать, что эти два источника поступления минеральных частиц должны существенно различаться характерными размерами выпадающих частиц.

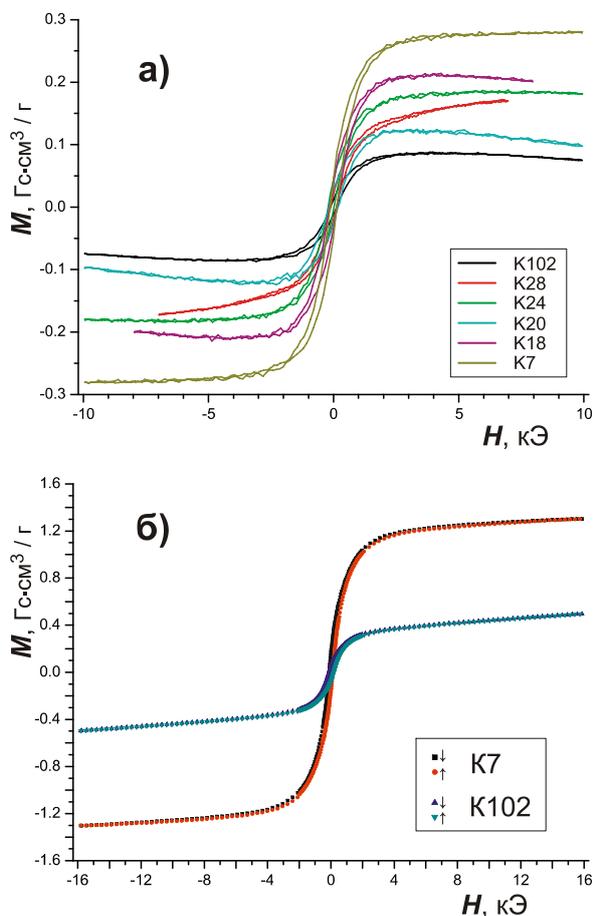


Рисунок 8. Кривые намагничивания подстилок (а; по [19]) и отожженных подстилок.

В первом случае поступают преимущественно мелкодисперсные частицы, во втором – преимущественно крупнодисперсные. Соответственно, поступление частиц аэротехгенного происхождения должно было бы детектироваться по изменению намагниченности в области парапроцесса. Как видно из рис. 8а, непосредственная интерпретация кривых затруднена пространственной изменчивостью свойств и/или точностью измерений. Недавно было высказано предположение [2], что именно точность измерений является главным препятствием.

Чтобы проверить это предположение мы измерили (рис. 8б) кривые намагничивания подстилок с двух площадок мониторинга, отоженных подстилок на протяжении 6 часов при постепенном трехступенчатом повышении температуры до 350° С. Выбор конечной температуры определялся компромиссом между противоречащими желаниями максимально не нарушить минеральные включения подстилок и полностью окислить их органическое вещество.

Потери при прокаливании по двум участкам составили 80-94% веса, что позволило увеличить массу минеральной фракции в капсуле и, соответственно, увеличить измеряемый магнитный момент примерно на порядок и тем самым увеличить точность измерений. Как видно из рис. 8б, изменение намагниченности в области парапроцесса действительно четко проявляется в виде . При очевидной разнице в величине технической намагниченности – 0,33 и 1,17 Гс·см³/г для подстилок ненарушенных (начального повреждения) и отмирающих лесных экосистем, дифференциальные восприимчивости в сильных полях весьма близки, $\chi_{SP} = 10 \cdot 10^{-6}$ и $9,0 \cdot 10^{-6}$ см³/г для образцов отоженной подстилки с условно-фонового и загрязненного участков.

Второе же предположение о поступлении магнитных частиц при подмешивании частиц из нижележащих минеральных горизонтов и с переносом магнитных частиц с близлежащих территорий с ветровой эрозией

теоретически кажется вполне обоснованным и потому требует определения магнитных свойств минеральных горизонтов почв. Этому вопросу и посвящена остальная часть работы.

3.2. Магнитные свойства минеральных горизонтов лесных почв

Кривые намагничивания, полученные при анализе образцов почвы на разных расстояниях представлены на рисунке 8.

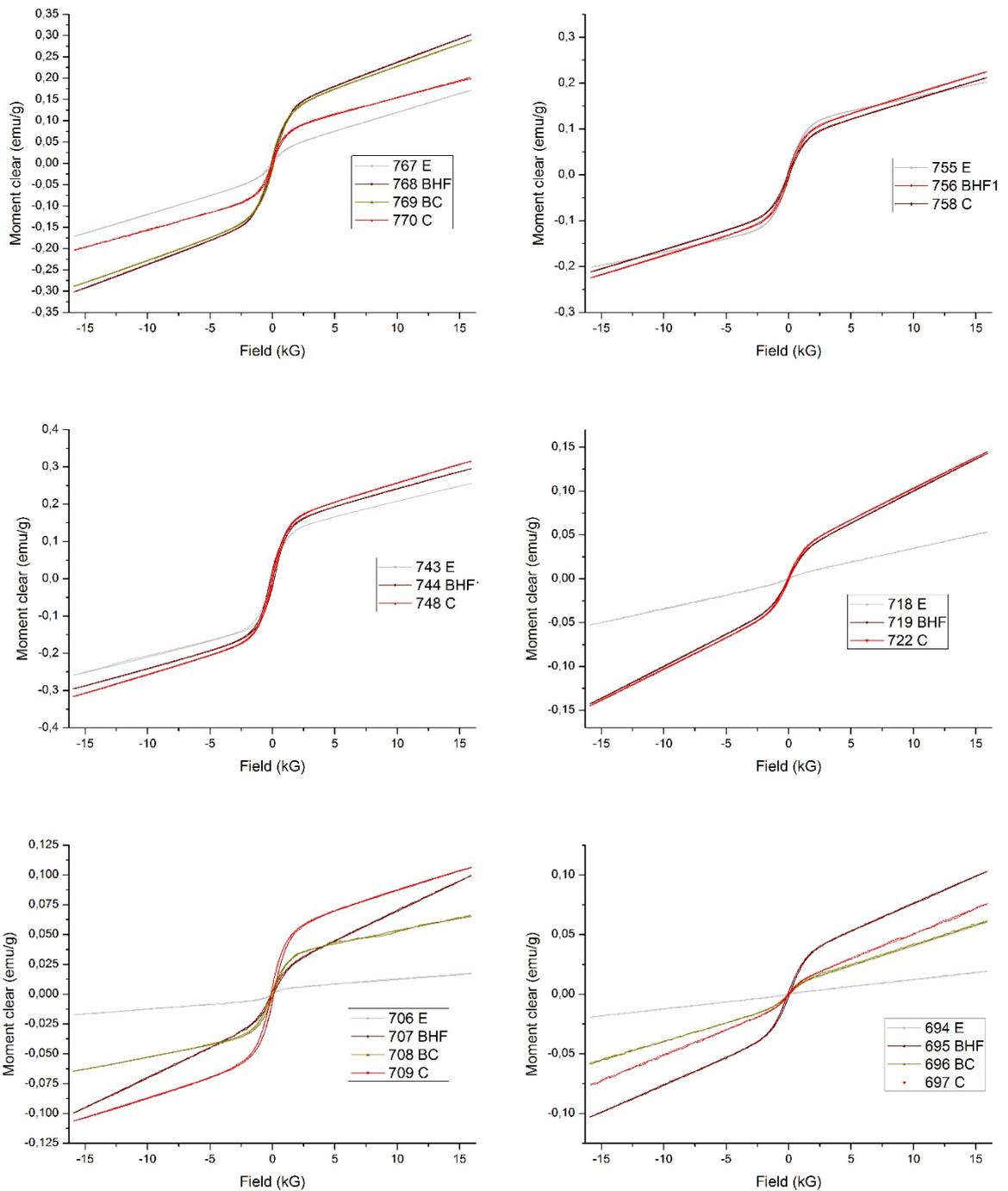


Рисунок 9. Приведенные на массы кривые намагничивания образцов с участков: а – 7 километр, б – 18 километр, в – 20 километр, г – 24 километр, д – 28 километр, е – 102 километр.

3.3. Магнитные свойства минеральных горизонтов почв

техногенных пустошей

Кривые намагничивания образцов почв техногенных пустошей представлены на рис. 9.

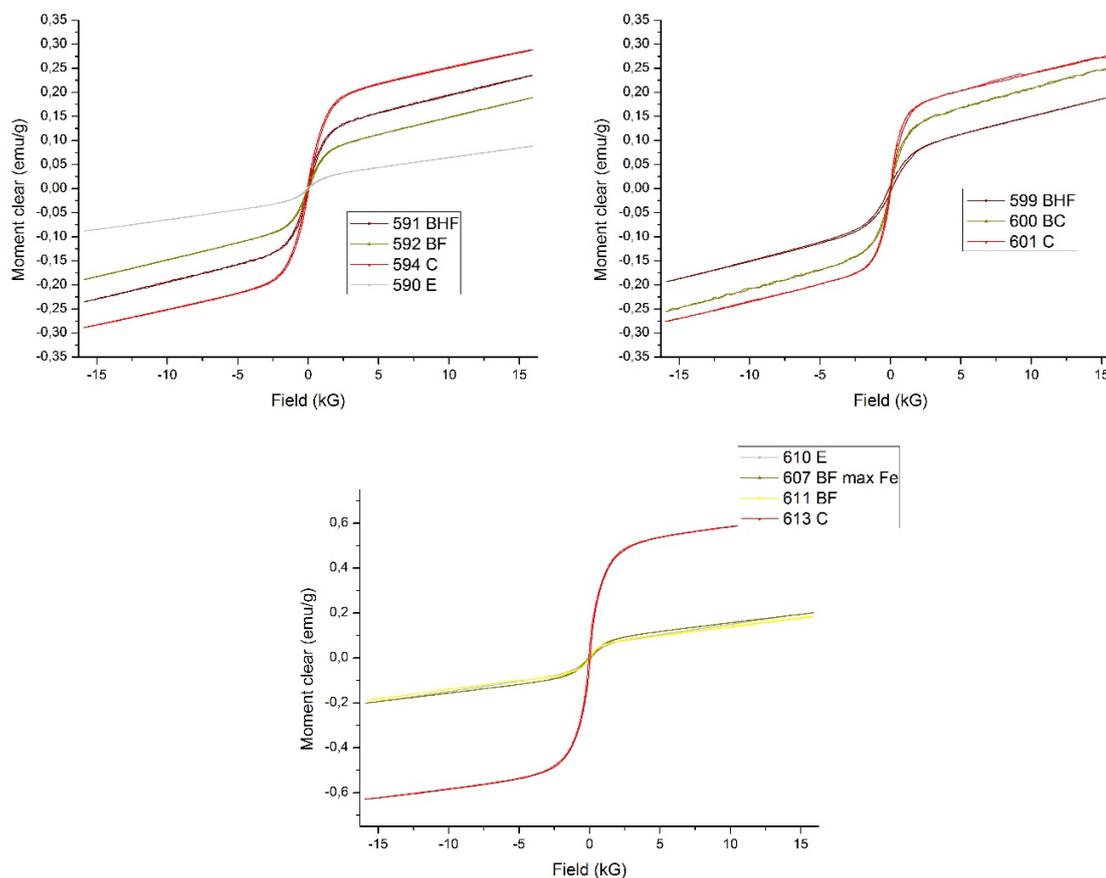


Рисунок 10. Кривые намагничивания образцов почв техногенной пустоши.

а – участок 2004, б – участок 2006, в – участок 2007.

3.4. Обсуждение результатов

Сводные результаты по всем образцам сведены в таблице 3а и 3б.

Таблица 3а. Магнитная восприимчивость в области парапроцесса.

	Расстояние, км	E, emu/(g*kG)	BHF, emu/(g*kG)	BC, emu/(g*kG)	C, emu/(g*kG)
K102	59,89	0,00117	0,00461	0,00336	0,00411

K28	28,02	0,00083	0,00502	0,00216	0,00341
K24	20,88	0,0031	0,00731		0,00714
K20	18,57	0,00829	0,0095		0,01023
K18	16,75	0,00584	0,00848		0,00839
K7	7,47	0,00883	0,01119	0,0106	0,00768
МП2004	3,19	0,0041	0,00725	0,00707	0,00668
МП2006/3	2,51		0,00739	0,00803	0,00694
МП2007/8	5,24	0,00907	0,01007	0,00903	0,02168

Таблица 3б. Нормированная магнитная восприимчивость в области парапроцесса.

	Расстояние, км	E	BHF	BC	C
K102	59,89	0,28	1,12	0,82	1
K28	28,02	0,20	1,22	0,53	0,83
K24	20,88	0,75	1,78		1,74
K20	18,57	2,02	2,31		2,49
K18	16,75	1,42	2,06		2,04
K7	7,47	2,15	2,72	2,83	1,87
МП2004	3,19	1,00	1,76	1,72	1,63
МП2006/3	2,51		1,80	1,95	1,69
МП2007/8	5,24	2,21	2,45	2,20	5,27

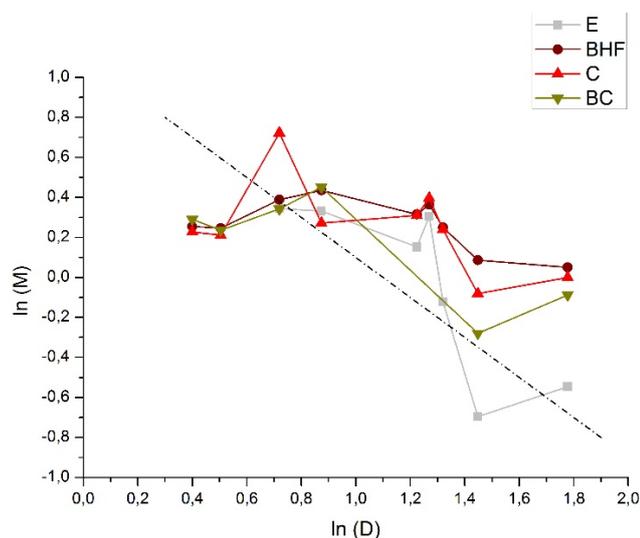


Рисунок 11. Нормированная магнитная восприимчивость в области парапроцесса (в логарифмических координатах)

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что в целом содержание сильномагнитных частиц в подстилках возрастает по мере приближения к металлургическому комбинату – возрастают как начальная восприимчивость и намагниченность насыщения, так и дифференциальная восприимчивость в полях насыщения. При этом относительное содержание мелкодисперсных частиц вблизи комбината заметно выше, чем крупнодисперсных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что наряду с естественной вариабельностью магнитных свойств в окрестностях комбината «Североникель» наблюдаются закономерные изменения.
2. Обнаружено, что в почвообразующей породе техническая намагниченность и начальная восприимчивость в целом закономерно возрастает с приближением к комбинату, увеличиваясь в 10-20 раз от условно-фонового леса к техногенным пустошам. Это, скорее всего, связано с увеличением содержания крупнодисперсных / многодоменных сильномагнитных частиц, что характерно для рудоносных районов. В тоже время техническая намагниченность С-горизонта является сильно варьирующим свойством и на расстояниях, существенно меньших размера геохимической аномалии.
3. Проведены качественные сравнения относительных расположений петель гистерезиса горизонтов почв, полученных на каждом из «лесных» участков. Показано, что в целом намагниченность верхнего минерального горизонта меньше, чем у нижележащих горизонтов, что согласуется с представлениями о формировании подзолов. Это объясняется обеднением верхнего минеральных горизонта магнитными соединениями вследствие вымывания и их накоплением в нижележащих.
4. Показано, что изменение намагниченности в области парапроцесса, связанное с содержанием мелкодисперсных сильномагнитных частиц является консервативным, менее варьирующим параметром. Более того, обнаружено, что по мере приближения к комбинату, начиная примерно со стадии дефолиации, наклон кривых в области парапроцесса весьма мало изменяется по почвенному профилю.

5. Вероятным объяснением этого наблюдения является превышение выпадений мелкодисперсных сильномагнитных частиц удерживающей способности почв и относительно свободную миграцию частиц вниз по почвенному профилю. Если это объяснение верно, это также означает накопление в почвах и нижележащих породах мелкодисперсных частиц соединений токсичных металлов – Cu, Ni, Cd и др., образуемых в одном и том же технологическом процессе, и, соответственно, долговременные экологические последствия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль, ЯГТУ, 1995, 222 с.
2. Будилин В.С., Магнитные свойства таёжных почв, бакалаврская работа, М., физический факультет МГУ, 2015, 32 с.
3. Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Ковач Р.Г. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. 2004. № 5. С. 566-580.
4. Глебова И.Н., Бабанин В.Ф., Карпачевский Л.О., Куткин И.А., Шоба С.А. О природе повышенного магнетизма органно-аккумулятивных горизонтов почв. Почвоведение. 1984. № 3. С. 37-43.
5. Дончева А.В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности. М.: Лесная промышленность, 1978. 96 с.
6. Евдокимова Г.А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 272 с.
7. Кашулина Г.М. Аэротехногенная трансформация почв Европейского субарктического региона. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с. Ч. 2. 234 с.
8. Копцик Г.Н., Лукина Н.В., Копцик С.В., Щербенко Т.А., Ливанцова С.Ю. Поглощение макроэлементов и тяжелых металлов елью в условиях интенсивного атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Лесоведение. 2008. № 2. С. 3-12.
9. Копцик С.В., Копцик Г.Н. Многомерный статистический анализ реакции подстилок лесных почв на атмосферное загрязнение // Экология. 2000. № 2. С. 89-96.
10. Копцик Г.Н., Смирнова И.Е., Копцик С.В., Захаренко А.И., Турбаевская В.В. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи

- комбината «Североникель» на Кольском полуострове // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015. № 2. С. 42-48.
11. Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375-1391.
 12. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1989. 96 с.
 13. Кудрявцева А.Д. Реакция древесного яруса экосистем еловых лесов Кольской субарктики на атмосферное загрязнение. Дипломная работа. М., МГУ, 2012.
 14. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
 15. Орлов Д.С. Гуминовые кислоты почв.- М.: Из-во МГУ, 1974, 333с.
 16. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
 17. Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
 18. Розанов Б.Г. Морфология почв. М., Из-во МГУ, 1983, 320 с.
 19. Самсонова В.В., Карпенко О.И., Копцик С.В., Перов Н.С., Родионова В.В., Бенедиктова А.И. Исследование магнитных свойств почв в зоне влияния комбината «Североникель». В кн.: Физические проблемы экологии, № 19, М., МАКС Пресс, 2013, с. 442-447.
 20. Сандиминова Е.И., Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Магнитные сферы из вулканогенных пород Курильских островов и южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 135-140.

21. Трухин В.И., Гаранян В.К., Жилиева В.А., Кудрявцева Г.П. Ферромагнетизм минералов. М., МГУ, 1983, 96с.
22. Фокин А.Д. Почва, биосфера и жизнь на Земле, М., Наука, 1986, 178 с.
23. Baklanov A., Kljuchnikova E., Rodjushkuna I., Smagin A. The monitoring and modeling of the atmosphere pollution in the industrial districts of Kola North // Air Pollution Problems in the Northern Regions of Fennoscandia Including Kola. NILU Report TR, 1994. No. 14/94. P. 20-40.
24. Blakemore P.R. Magnetotactic bacteria. Science. 1975. V. 190. №4212. P. 377-379.
25. Dearing J.A. J.A., Hay K.L., Baban S.M.J., Huddleston A.S., Wellington E.M.H., Loveland P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. Geophys. J. Int., 1996, 127 (3), 728-734.
26. Dekov V. M., Molin G. M., Dimova M., Griggio C., Rajta I., Uzonyi I. Cosmic spherules from metalliferous sediments: A long journey to the seafloor // Neues Jahrbuch fur Mineralogie. Abhandlungen. 2007. V. 183. № 3. P. 269-282.
27. Dunlop D. J. and Özdemir Ö. Magnetizations in Rocks and Minerals. In Treatise on Geophysics, vol. 5, ed. by M. Kono (Elsevier, Amsterdam, 2007), pp. 277-336.
28. Goresy A. Electron Microprobe Analysis and Ore Microscopic Study of Magnetic Spherules and Grains Collected from the Greenland Ice // Contr. Mineral, and Petrol. 1968. Vol. 17. P. 331-346.
29. Iyer S.D., Gupta S.M., Charan S.N., Mills O.P. Volcanogenic-hydrothermal iron-rich materials from the southern part of the Central Indian Ocean Basin // Marine Geology. 1999. Vol. 158. P. 15-25.

30. Jordanova D., Veneva L., Hoffmann V. Magnetic susceptibility screening of anthropogenic impact on the Danube river sediments in northwestern Bulgaria preliminary results // Stud. Geophys. Geod. 2003. Vol. 47. P. 403-418.
31. Kashulina G., de Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environment. 2014. V. 89. P. 672-682.
32. Kapicka A., Petrovsky E., Jordanova N. Comparison of in situ field measurements of soil magnetic susceptibility with laboratory data // Studia geoph. et geod. 1997. Vol. 41. P. 391-395.
33. Maher B.A. Comments on «Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess» // Quaternary Science Reviews. 1999. № 18. P. 865-869.
34. Rákoš M., Murín J., Kafka D., Varga Z., Olčák D. NMR and magnetic study of woods and cellulose. Czech. J. Phys. B, 1984, 34 (4), 332-340.
35. Szoor Gy., Elekes Z., Rozsa P., Uzonyi I., Simulak J., Kiss A.Z. Magnetic spherules: Cosmic dust or markers of a meteoritic impact? // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2001. Vol. 181. P. 557-562.
36. Зонн С.В. Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
37. Таубе П.П., Руденко Е.И. От водорода до ... ? М.: Высшая школа, 1964. С 160-165.