

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
«МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛЫХ ПОЧВ»

Выполнил студент

419 группы:

Будилин Вадим Сергеевич

подпись студента

Научный руководитель:

с.н.с. Копцик Сергей Владимирович

подпись научного руководителя

Допущена к защите _____

Зав. кафедрой _____

подпись зав. кафедрой

Москва

2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.1. Минеральные горизонты почв.....	6
1.2. Органогенные горизонты.....	8
1.3. Магнитные свойства.....	11
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	17
2.1. Природные условия.....	17
2.2. Техногенное загрязнение.....	18
2.3. Исследуемые участки.....	20
2.4. Методы исследований.....	20
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	23
3.1. Образцы фонового состояния.....	23
3.2. Образцы заповедника Пасвик.....	24
3.3. Образцы на стадии интенсивной дефолиации.....	25
3.4. Образцы техногенной пустоши.....	26
3.5. Обсуждение результатов.....	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Систематическое изучение магнитных свойств почв началось в середине XX века [1]. Для этого существовал ряд предпосылок:

1. В тридцатых годах была разработана теория магнетизма.
2. Создана необходимая аппаратура для проведения магнитных измерений различных объектов.
3. Определены магнитные свойства индивидуальных минералов, пород и почв.

Уже в первых работах по магнитным свойствам почв отмечены необычайно высокие значения магнитной восприимчивости почв по сравнению с их материнской породой (почвы Кубы, Гавай). Исследования магнитных свойств почв показали, что магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила закономерно изменяются по профилю почв и для разных типов почв, что указывает на тесную связь магнитных характеристик с процессами почвообразования. По величине магнитной восприимчивости хорошо диагностируются элементарные почвенные процессы типа оглеения, оглинения; с помощью термомагнитного анализа можно идентифицировать железистые минералы.

Содержание железа в почве превышает на три и более порядков содержание других элементов (никеля, кобальта, хрома и др.), также обуславливающих возникновение сильных магнитных свойств. Поэтому, магнетизм почв определяется соединениями железа. Состав, свойства, а, следовательно, и магнитная предыстория складывается из последовательности испытанных почвой к моменту изучения трансформаций. Задача исследования состоит в том, чтобы по физическим свойствам современных почв получить представление о формировании их

магнитных свойств в условиях возникновения почв из подстилающих пород. Интуитивно понятно, что эта задача далеко не проста и, по всей вероятности, не имеет однозначного ответа. Попытки её решения основываются на систематическом изучении многообразия магнитных свойств контрастных почв и признаков их магнитного состояния.

В последние годы/десятилетия магнитные исследования стали также использоваться 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 естественно развивающихся почв, в области антропогенного воздействия исследуется как бы “мгновенный снимок” современного магнитного состояния почв. А представления о динамике изменений возникают на основании этого пространственного «снимка», теоретических представлений и отрывочных временных наблюдений.

При этом сложность экспериментального изучения деградирующих под воздействием загрязнения экосистем связана с необходимостью выделения небольшой поправки, антропогенного возмущения на фоне относительно большой естественной изменчивости (магнитных) свойств почв. В случае же сильных воздействий (техногенных катастроф), обуславливающих гибель экосистем, свойства почв могут изменяться очень сильно. Однако такие изменения, как правило, связаны с началом других мощных и быстропротекающих естественных процессов изменения поверхностных горизонтов, таких как водная и ветровая эрозия, не возникающих при наличии нормально функционирующих экосистем. В этом случае техногенное воздействие выступает в роли “спускового крючка”, запускающего эти процессы.

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

В природе распространены 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 детектирование повышенного содержания сильномагнитных соединений, как правило, не означает прямой, непосредственной 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, корреляционным индикатором опасности.

Ввиду отмеченной выше необходимости измерять малые изменения магнитных свойств задачей работы явилось выяснение возможностей повышения точности измерений путем увеличения массы образца с целью последующего изучения магнитных свойств таёжных почв на северном пределе распространения лесных экосистем в зоне воздействия аэротехногенных выбросов комбинатов Кольской ГМК.

ГЛАВА 1. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

1.1. Минеральные горизонты почв

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 минеральных горизонтов почв, а в более глубоких горизонтах до 99% и выше. Минеральная часть в значительной степени наследуется от почвообразующей породы и представлена первичными и вторичными минералами. По мере развития почвы происходят изменения минералов в результате выветривания и почвообразовательного процесса. Магнитные свойства минеральных горизонтов являются наиболее изученными.

По методам химического разделения среди органического вещества почв выделяют гуминовые и фульвокислоты. По составу гуминовые кислоты – это 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 [13]. 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 $12 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ [1].

Так как минеральные вещества составляют основную часть почвенного образца, его магнитные свойства во многом определяются магнетизмом почвенных минералов. По химическому составу большинство минералов это кислородные соединения. Среди всех породообразующих 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 Fe. Железо в различных соединениях твердой фазы почв встречается в двух и трехвалентном виде (Fe^{3+} , Fe^{2+})

Основные магнитные свойства наиболее распространенных Fe-содержащих минералов представлены в табл. 1. Наибольшими и близкими величинами начальной восприимчивости и намагниченности характеризуются магнетит (Fe_3O_4) и маггемит ($\gamma-Fe_2O_3$). Маггемит в природных условиях неустойчив и легко переходит в устойчивый гематит; встречается только в виде микроскопически мелких выделений, преимущественно в продуктах окисления магнетита.

Таблица. 1.

Магнитные свойства минералов (ферри- и антиферромагнетики).

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

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: $K_1 = -120\cdot 10^2 \text{ Дж}/\text{м}^3$ и $K_2 = -280\cdot 10^2 \text{ Дж}/\text{м}^3$ [17, 22]

1.2. Органогенные горизонты

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).

Подстилка — маломощный (до 15 см) поверхностный слой разлагающегося (различные подгоризонты его находятся на разных стадиях разложения) органического вещества, частично, особенно в нижней части, перемешанного с минеральными компонентами. Лесная подстилка сплошным ковром покрывает поверхность почвы под пологом леса; обычно имеет слоистое строение, причем различаются слои: свежий или слабо разложившийся опад (L); слой ферментации или разложения (F), в котором еще преобладают растительные остатки с сохранившейся исходной формой, и слой гумификации (H), в котором преобладают сильно разложившиеся растительные остатки без видимой исходной формы и имеется механическая примесь минеральных компонентов [15].

Одним из важнейших фактов, установленных при изучении магнитных свойств почв, является повышенный магнетизм органогенных горизонтов. Наиболее выражено это явление в почвах, развивающихся в автоморфных

условиях на лессах и лессовидных суглинках различных почвенно-географических зон. Часто высокими значениями восприимчивости обладает слой гумификации лесной подстилки. Мессбауэровские исследования показывают, что почвенные оксиды и гидроксиды железа обычно находятся в высокодисперсном состоянии. Как показывают исследования, высокие значения магнитных параметров гумусовых горизонтов обусловлены магнетитом.

В случае автоморфных ландшафтов (промывной водный режим) поступление соединений железа из нижележащих горизонтов ограничено и определяется 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 [29]. 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. Так, поступление в почвы железа с высвобождающимися зольными элементами при сжигании растительных остатков не рассматривается как сколько-нибудь существенный фактор почвообразования [20]. 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.

В настоящее время существуют представления о нескольких путях генезиса магнитных свойств органогенных горизонтов: педогенный, техногенный, литогенный и космогенный. В результате исследований в оставшихся магнитных фракциях из почв были выделены и морфологически описаны сферические магнитные частицы. Одной из первых гипотез их происхождения стал бактериальный синтез [3, 19]. Но в дальнейшем начали выявляться техногенная [2, 25, 27, 28], литогенная [16, 24] и космогенная [1, 21, 23, 30], гипотезы их формирования.

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. Несомненно также, что в промышленных регионах и мегаполисах антропогенная деятельность приводит к заметному увеличению количества магнитного материала, попадающего в почву из атмосферы.

Уместно отметить, что одни лишь магнитные измерения не могут привести к достоверным выводам. 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.

1.3. Магнитные свойства

Процессы намагничивания

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

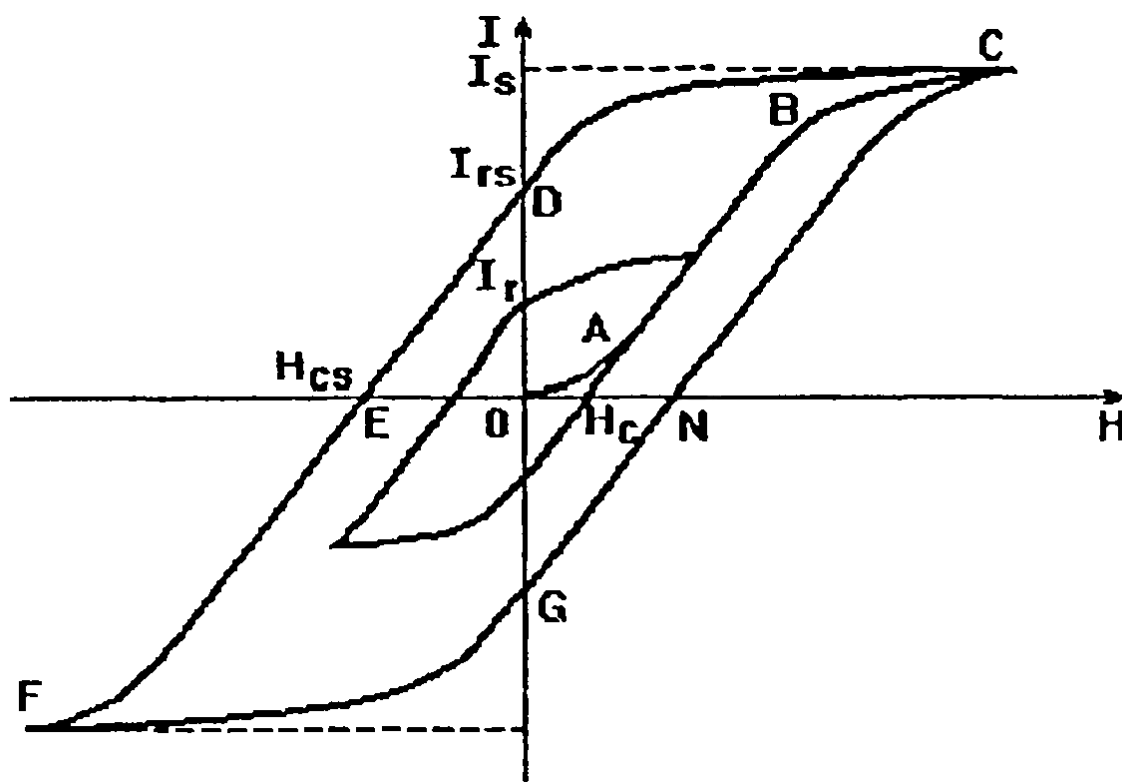


Рисунок 1. Типичная кривая намагничивания и петля гистерезиса ферромагнетика

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 по магнитному полю H), когда 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 I_r . Уменьшение H (в отрицательном направлении) вызывает уменьшение намагниченности и при некотором значении поля называемого коэрцитивной силой (H_c) намагниченность станет равной нулю. Однако это не означает, что образец размагнитился (при выключении поля $H = H_c$, намагниченность не будет равна нулю). При дальнейшем уменьшении H 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 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. 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. Вторым механизмом состоит в перестройке самой структуры энергетических барьеров за счет диффузии атомов, точечных дефектов в кристаллической решетке (диффузионное последствие). Эта перестройка способствует росту I_{rv} . 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 I_s отдельных доменов, не изменяя при этом магнитную структуру и намагниченность насыщения I_s . В антиферромагнетиках и ферриферромагнетиках 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 ферромагнитных 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, то поведение такой совокупности будет 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 флуктуации по экспоненциальному закону:

$$I_r(t) = I_r(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right), \text{ где } t - \text{ время, отсчитываемое после снятия } H, \tau_0 -$$

время релаксации. Магнитные свойства ансамбля малых частиц различаются в зависимости от времени релаксации τ_0 . Если считать, что время измерения намагниченности t_0 , то:

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

2. при $\tau_0 \leq t_0$ 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 $\tau_0 (> t_0)$ 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 псевдооднодоменными (PSD), или магнитовязкими.

Критические размеры частиц магнетита 0,01-0,1 мкм (SP-PSD) и 10-20 мкм (PSD-MD) [17, 22]. Таким образом, на кривых намагничивания вклад многодоменных частиц магнетита должен характеризоваться достаточно узкой петлей гистерезиса с почти горизонтальными участками в области технического насыщения (рис. 1, 2а) и очень малым положительным наклоном. При увеличении магнитного поля на фоне зависимости 2а должны проявиться вклады псевдооднодоменных (в виде затянутого перехода) и в сильных полях – однодоменных-суперпарамагнитных частиц в виде линейного участка с положительным наклоном (рис. 2б). Можно ожидать, что подобные кривые намагничивания должны быть характерны для загрязненных органогенных горизонтов. Теоретически, при уменьшении количества сильномагнитных примесных частиц можно ожидать проявления диамагнитного вклада “чистой” почвенной матрицы (рис. 2в). Вопрос же о том, наблюдаются ли подобные кривые в чистых фоновых районах, остается открытым.

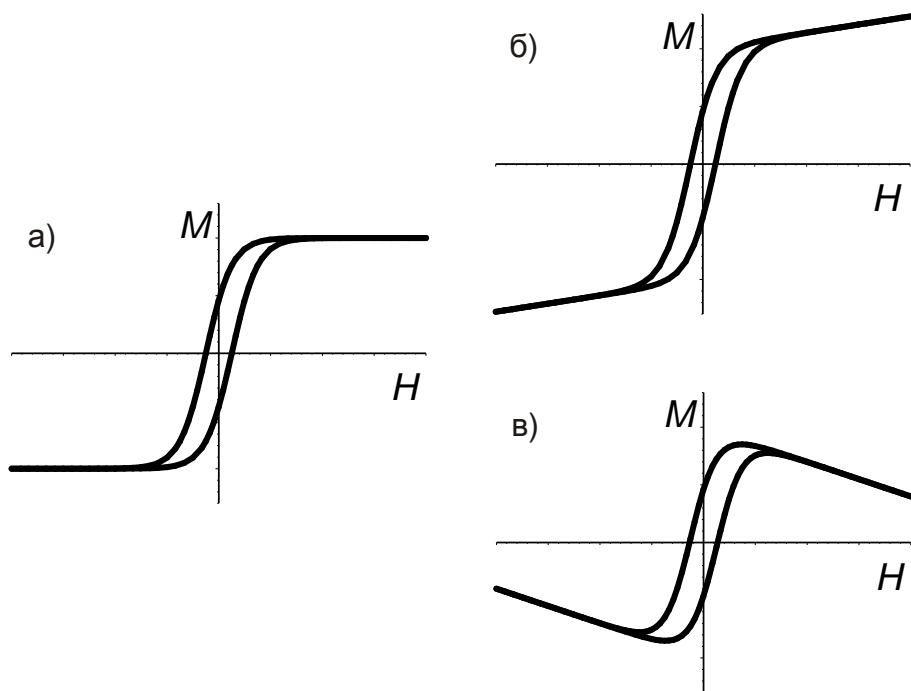


Рисунок 2. Ожидаемые кривые намагничивания лесных подстилок при различном соотношении вкладов многодоменных, псевдооднодоменных, однодоменных частиц и “чистой” почвенной матрицы, нормированные на намагниченность насыщения.

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 [4, 5, 7, 8, 9, 10, 12].

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 [18], 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 [26]. 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.

Таблица 2.

Объекты исследования. Экосистемы еловых лесов в зоне влияния комбината «Североникель»

Тип экосистемы	Почва	Почвообразующая порода	Нарушения древесного яруса*				Нарушения напочвенного покрова	Расстояние (обозначение)	Стадия техногенной сукцессии
			Вид	Живые деревья	Сухостой	Валеж			
								шт./400 м ²	
Ельник кустарничково-зеленомошный	Подзол иллювиально-гумусовый	Моренные отложения	Ель	20	0	2	Нет	200 (K200)	Фоновый тип состояния
			Береза	15	6	0			
Ельник злаково-кустарничковый	Подзол иллювиально-гумусовый	Моренные отложения	Ель	13	1	10	Угнетение лишайников, появление злаков	28 (K28)	Стадия интенсивной дефолиации
			Береза	4	0	2			
Пустошь	Абразём альфегумусовый	Моренные отложения	-	0	0	0	Полное разрушение напочвенного покрова	2.5 (MP2006)	Техногенная пустошь
Сосняк мохово-лишайный	Подзол иллювиально-гумусовый	Моренные отложения	-	-	-	-	Нет	-	Фоновый тип состояния

* по данным А.Д. Кудрявцевой [11].

2.3. Исследуемые участки

Исследования проводили на 3 постоянных участках мониторинга на расстоянии 2,5, 28 и 64 км в южном направлении от комбината вдоль шоссе Мурманск – С.-Петербург (табл. 2), а также на территории заповедника Пасвик. 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 характеризовался смешанным образцом, взятом в центре подучастка и также систематически отобранным (с помощью бура). На каждом из участков брались пробы из разных подгоризонтов подстилки: верхнего листового подгоризонта (OL), нижележащего ферментативного и гумусового подгоризонтов (OFH), подстилки в целом (O). Образцы высушивали и хранили в воздушно-сухом состоянии до проведения анализов.

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.

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 штوك и в процессе измерений находилась равноудаленно между полюсными наконечниками для получения достоверных результатов.

Генератором механических колебаний с частотой 80Гц шток приводился в движение, вследствие чего изменялся магнитный поток, пронизывающий измерительные катушки. Вызванное ЭДС индукции, пропорциональное магнитному моменту образца, конвертируется 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 ЦАП, таким образом для проведения измерений достаточно обращаться только к программе управления.

Основные характеристики:

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



Рисунок 3. Общий вид экспериментальной установки.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

3.1. Образцы фонового состояния

Исходные кривые для определения магнитного момента, полученные при анализе фонового образца почвы представлены на рисунке 4. Максимальный магнитный момент образца довольно мал и сравним с парамагнитным вкладом капсулы.

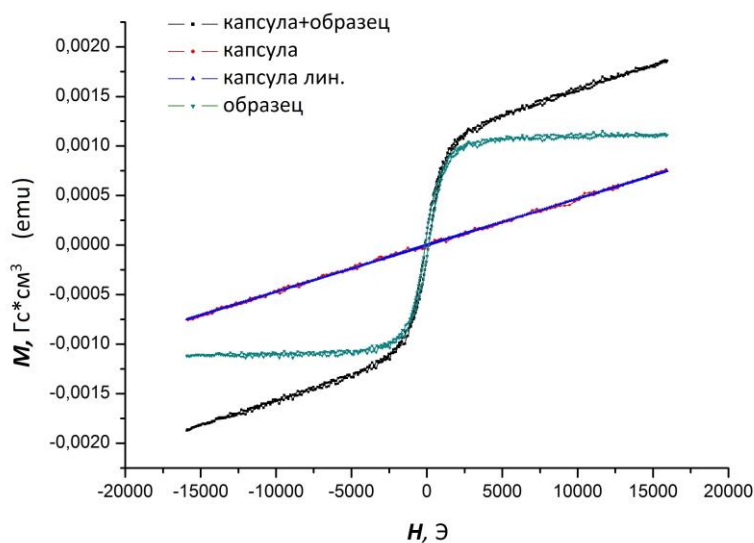


Рисунок 4. Кривая намагничивания для образца почв фонового состояния.

Кривая намагничивания фонового образца почвы представлены на рисунке 5. Намагниченность насыщения $I_s = 0,018$ emu/g, коэрцитивная сила

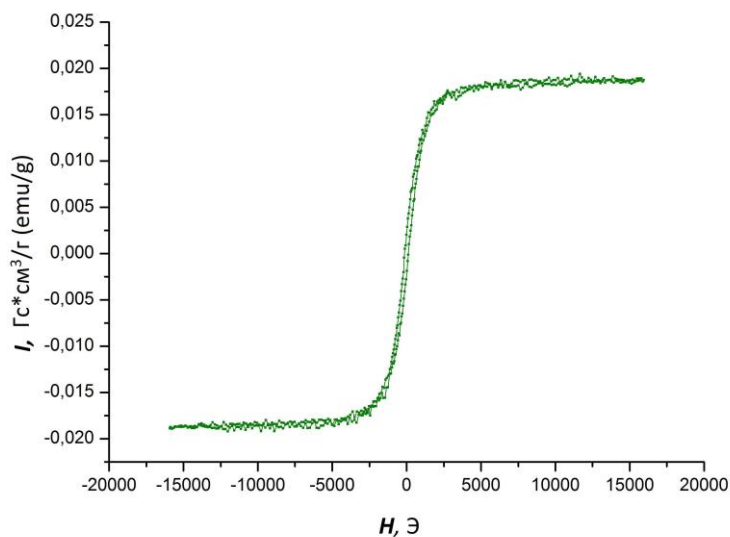


Рисунок 5. Приведенная на массу кривая намагничивания фоновый образец почвы.

$H_C = 120$ Э, начальная восприимчивость $\chi_0 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ см³/Г, дифференциальная восприимчивость в сильных полях $\chi_{SP} = 0,06 \cdot 10^{-6}$ см³/Г. Низкая величина восприимчивости линейного участка говорит о том, что содержание однодоменные частиц минимально.

3.2. Образцы заповедника Пасвик

Кривая намагничивания, полученная при анализе образца почв заповедника Пасвик представлены на рисунке 6а. Максимальный магнитный момент образца мал и сравним с парамагнитным вкладом капсулы. Намагни-

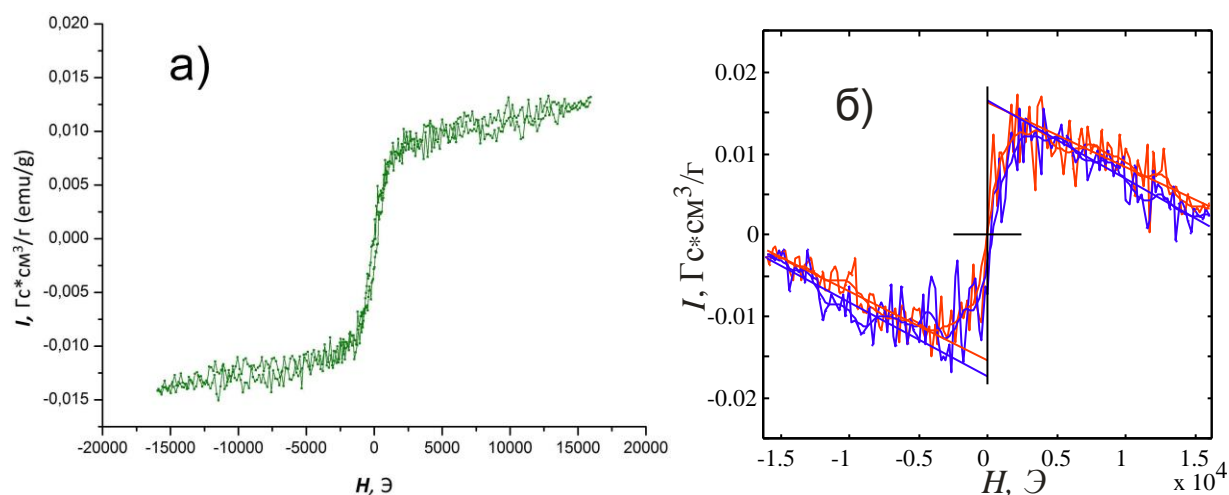


Рисунок 6. Кривые намагничивания образца почв заповедника Пасвик, образец 772 по нашим данным (а) и по данным Карпенко О. И. [6] (б).

ченность насыщения $I_S = 0,0086$ emu/g, коэрцитивная сила $H_C = 150$ Э, начальная восприимчивость $\chi_0 = 0,95 \cdot 10^{-5}$ см³/Г. Дифференциальная восприимчивость в сильных полях $\chi_{SP} = 0,03 \cdot 10^{-6}$ см³/Г. Низкая восприимчивость линейного участка говорит о низком содержании однодоменных частиц.

Отметим, что кривые намагничивания данного образца качественно отличается от ранее измеренных Карпенко [6], которым были отмечены отрицательные дифференциальные восприимчивости. Отрицательные

восприимчивости изредка отмечались и ранее [14]. Нами также в первых измерениях были замечены отрицательные наклоны, но было установлено, что это было связано с неточной юстировкой образцов. Эти различия мы связываем с возможной экспериментальной погрешностью.

3.3. Образцы на стадии интенсивной дефолиации

Кривая намагничивания, полученная при анализе образца почвы на расстоянии 28 км представлена на рисунке 7. Максимальный магнитный момент образца много больше парамагнитного вклада капсулы.

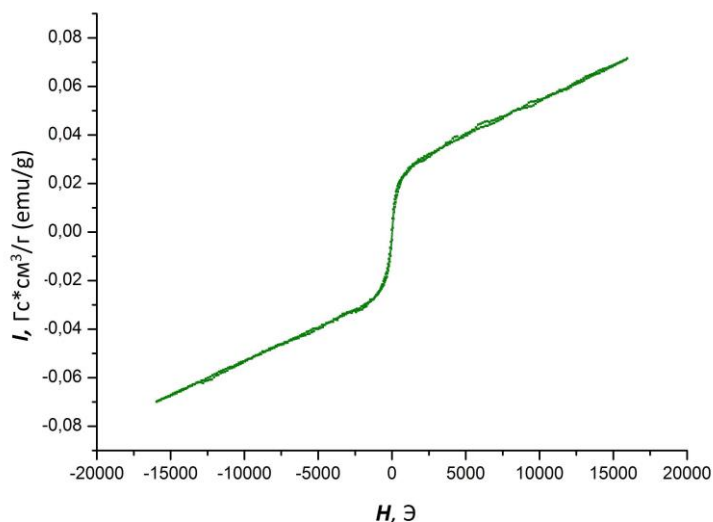


Рисунок 7. Приведенная на массу кривая намагничивания образца почв, подвергающихся угнетению.

Намагниченность насыщения $I_s = 0,025 \text{ emu/g}$, коэрцитивная сила $H_c = 50 \text{ Э}$, начальная восприимчивость $\chi_0 = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$, дифференциальная восприимчивость в сильных полях $\chi_{SP} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$. Отсюда следует заметная концентрация мелкодисперсных частиц.

3.4. Образцы техногенной пустоши

Кривые намагничивания, полученные при анализе образца почв техногенной пустоши представлены на рисунке 8. Максимальный магнитный момент образца много больше парамагнитного вклада капсулы. Намагниченность насыщения $I_S = 0,15 \text{ emu/g}$, коэрцитивная сила $H_C = 80 \text{ Э}$, начальная восприимчивость $\chi_0 = 13 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{Г}$, дифференциальная восприимчивость в сильных полях $\chi_{SP} = 9,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{Г}$. Высокая восприимчивость в сильных полях свидетельствует о значимой концентрации однодоменных частиц.

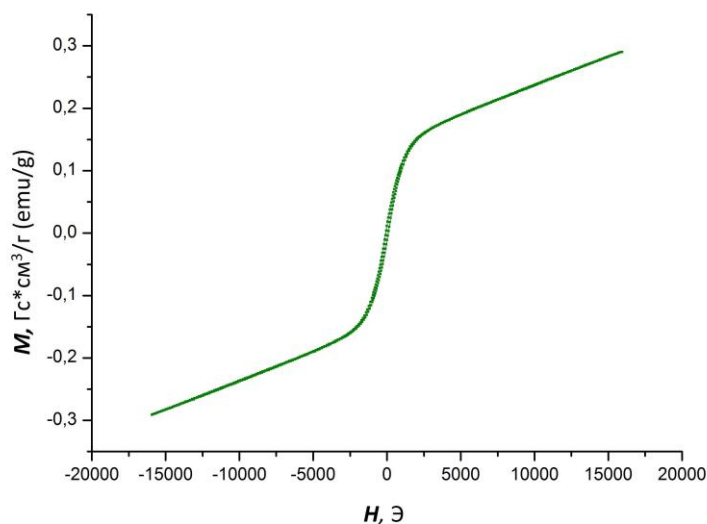


Рисунок 8. Приведенная на массу кривая намагничивания образца почв техногенной пустоши.

3.5. Обсуждение результатов

Сводные результаты по всем образцам сведены в таблице 3а – 3б и на рисунке 9.

Таблица 3а. Основные магнитные свойства образцов

	I_s	χ₀	χ_{SP}	H_c
	emu/g	см ³ /Г * 10 ⁻⁵	см ³ /Г * 10 ⁻⁶	Э
Фон (Пасвик)	0,0086	0,95	0.03	150
Фон (К200)	0,018	1,3	0,06	120
Повреждение леса	0,025	5,6	2,9	50
Техногенная пустошь	0,15	13	9,2	80

Таблица 3б. Нормированные магнитные свойства

	I_s	χ₀	χ_{SP}
	Нормированные значения		
Фон (Пасвик)	1	1	1
Фон (К200)	2	1	2
Повреждение леса	3	5	100
Техногенная пустошь	20	15	300

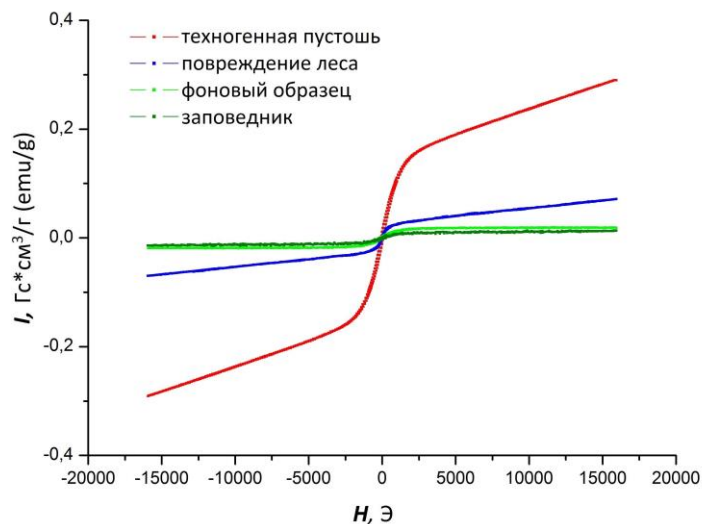


Рисунок 9. Кривые намагничивания образцов.

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. Этот результат несколько неожидан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен анализ магнитных свойств почвы в соответствии со сложившимися в настоящее время подходами к их изучению. На этой основе было проведено методическое исследование, направленное на изучение реальных предельных возможностей установки при изучении слабомагнитных магнитных свойств таежных почв.

После проведения исследования можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что кривые намагничивания слабомагнитных образцов весьма чувствительны к тонкой механической юстировке установки
2. Подтверждено, что увеличение массы образцов увеличивает точность измерений.
3. В целом содержание сильномагнитных частиц в подстилках возрастает по мере приближения к металлургическому комбинату
4. Наиболее сильные магнитные свойства были выявлены у образца почвы техногенной пустоши, расположенной вблизи комбината.
5. Полученные результаты предполагают, что относительное содержание мелкодисперсных частиц вблизи комбината заметно выше, чем крупнодисперсных.
6. Дифференциальная восприимчивость в сильных полях в «чистых» образцах много меньше, чем в загрязненных.

Конечно, данная работа далеко не исчерпывает заявленную тему. Поэтому хотелось бы отметить на возможных перспективах развития данного вопроса.

1. Изучение магнитных свойств различных почвенных горизонтов.
2. Расширение базы данных образцов почв.
3. Выявление корреляций магнитных свойств почв с различными характеристиками их загрязненности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль, ЯГТУ, 1995, 222с.
2. Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Ковач Р.Г. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса // Почвоведение. 2004. № 5. С. 566-580.
3. 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.
4. Дончева А.В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности. М.: Лесная промышленность, 1978. 96 с.
5. Евдокимова Г.А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 272 с.
6. Карпенко О.И., 2014, private communication.
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. Крючков В.В., Макарова Т.Д. Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1989. 96 с.

11. Кудрявцева А.Д. Реакция древесного яруса экосистем еловых лесов Кольской субарктики на атмосферное загрязнение. Дипломная работа. М., МГУ, 2012.
12. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
13. Орлов Д.С. Гуминовые кислоты почв.- М.: Из-во МГУ, 1974, 333с.
14. Розанов Б.Г. Морфология почв. М., Из-во МГУ, 1983, 320.
15. Самсонова В.В., Карпенко О.И., Копчик 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.
16. Сандиминова Е.И., Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Магнитные сферулы из вулканогенных пород Курильских островов и южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 135-140.
17. Трухин В.И., Гаранян В.К., Жилиева В.А., Кудрявцева Г.П. Ферримагнетизм минералов. М., МГУ, 1983, 96с.
18. 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.
19. Blakemore P.R. Magnetotactic bacteria. Science. 1975. V. 190. №4212. P. 377-379.
20. 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.
21. 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.

22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Maher B.A. Comments on «Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess» // *Quaternary Science Reviews.* 1999. № 18. P. 865-869.
29. 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.
30. 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.