

Профессору
Евгению Юрьевичу
с глубоким уважением
от автора

Маш

На правах рукописи

МАТАСОВА ГАЛИНА ГЕЛЬБЕНА

МАГНЕТИЗМ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ
ЛЕССОВО-ПОЧВЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
СИБИРСКОЙ СУБАЭРАЛЬНОЙ ФОРМАЦИИ

25.00.10 - геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Маш -

КАЗАНЬ
2006

Работа выполнена в Институте геологии и минералогии Сибирского отделения Российской Академии наук.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор Борис Владимирович Буров

доктор геолого-минералогических наук,
профессор Диамар Михайлович Печерский

доктор геолого-минералогических наук,
профессор Николай Олегович Кожевников

Ведущая организация: Геологический институт РАН (г. Москва)

Защита состоится «28» сентября 2006 г. в 14⁰⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д 212.081.04 при Казанском
государственном Университете им. В.И.Ленина, в ауд. 102 геологического
факультета по адресу: ул.Кремлевская 4/5, геологический факультет КГУ,
Казань, 420008

Заверенные отзывы на автореферат необходимо присылать по адресу:
ул. Кремлевская, 18, Казанский государственный университет, геологический
факультет, Казань, 420008

Факс: (843)-292-82-67

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГУ

Автореферат разослан «25» августа 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент, к.г.-м.н.



Д.И.Хасанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования настоящей работы являются магнитные свойства лессово-почвенных отложений Сибирской субазальной формации, хранящие информацию об изменениях природной среды и климата в геологическом прошлом.

Детальные реконструкции природной среды и климата по континентальным отложениям требуют комплексирования различных методов, одним из которых признан петромагнитный метод, успешно зарекомендовавший себя в отложениях Китайского лессового плато. В отложениях субазальной формации Сибири (Волков, 1971) петромагнитные исследования ограничивались в основном измерениями магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, поэтому картина изменения магнитных свойств лессово-почвенных отложений Сибири оказалась неполной и, соответственно, недостаточным основанием для реконструкций климата позднего плейстоцена (Chlachula, 1999). Дискуссионна интерпретация магнитной записи климата по «аласкинской» модели в отложениях Предалтайской равнины (Evans et al., 2003) и распространение этой модели на всю территорию Сибири (Evans, Heller, 2003). Для получения полной пространственно-временной картины изменения магнитных свойств отложений Сибирской субазальной формации требуются более совершенные подходы, основанные на изучении всей совокупности магнитных свойств лессово-почвенных серий по большому числу разрезов из разных провинций Сибирской субазальной формации, особенно в регионах со сложно интерпретируемым поведением магнитных характеристик. Таким образом, совершенствование и уточнение реконструкций изменений природной среды и климата по лессово-почвенным отложениям с использованием их магнитных свойств представляется **актуальной научной проблемой**, имеющей важное теоретическое и практическое значение.

Цель исследований: - построение петромагнитной модели Сибирской субазальной формации, использование ее для повышения достоверности и информативности реконструкций природной среды и климата Сибири и попытка создания концепции, объединяющей существующие модели формирования магнитных свойств лессово-почвенных последовательностей под воздействием природной среды и климата в различных регионах мира.

Научные задачи:

1. Выявить пространственно-временную взаимосвязь петромагнетизма отложений Сибирской субазальной формации с изменениями ландшафтных компонентов и климата Сибири в позднем-среднем плейстоцене.
2. Определить механизмы формирования магнитных свойств сибирских лессово-почвенных серий под влиянием природной среды и климатических условий, установить их сходство и отличие от известных механизмов.
3. Определить базовые петромагнитные параметры для построения общей модели формирования магнитных свойств лессово-почвенных отложений под влиянием природной среды и климата.

4. Обосновать связь магнитных характеристик отложений Сибирской субэвральской формации с изотопно-геохимическими и биологическими индикаторами климата, выявить магнитные параметры, наиболее чувствительные к изменениям климата в эпохи похолоданий и потеплений.

Фактический материал и методы исследования. Теоретической основой решения поставленной проблемы послужили физические принципы магнетизма горных пород, объясняющие магнитные явления в отдельных зернах минералов и в матрице горной породы в целом (Нагата, 1965; Трухин, 1973; Шолпо, 1977; Печерский, 1985; Dunlop, Ozdemir, 1997 и др.). Основным методом исследования являлся петромагнитный и, частично, палеомагнитный метод. Для экспериментального изучения магнитных характеристик осадков и экстрагированных магнитных фракций использовалась современная магнитометрическая аппаратура (в том числе криогенные магнитометры 2G Enterprise и HSM, спин-магнитометры JR-4, JR-5, измерители магнитной восприимчивости Bartington MS2, KLY3 и измеритель коэрцитивных параметров MicroMag Alternating Gradient Magnetometer 2900) лабораторий России, Чехии, Германии и Китая. Основной фактический материал получен при непосредственном участии автора в ходе полевых исследований сотрудников Лаборатории геодинимики и палеомагнетизма и других лабораторий Института Геологии СО РАН в содружестве с сотрудниками ИНГГ СО РАН, ГИС центра ОИГГМ СО РАН; ИПА СО РАН, ИГХ СО РАН, ИАЭ СО РАН, ИЗК СО РАН, КГУ (г.Красноярск), ИГУ (г.Иркутск), ФУП «Красноярскгеология». Полевые работы проводились в течение 9 сезонов (1997-2005 гг.). В работе также использованы коллекции образцов, собранные А.Ю.Казанским, С.К.Кривоноговым, И.Д.Зольниковым, А.А.Айриянцом, Д.Б.Бессоновым, Е.П.Бессоновой.

Изучены магнитные свойства 9670 ориентированных и 820 неориентированных образцов из 20 разрезов лессово-почвенных отложений южной части Восточной, Средней и Западной Сибири. Дополнительно привлекались геологические и геофизические материалы из публикаций Г.А.Поспеловой, И.А.Волкова, В.С.Зыкиной, И.Хлакулы, М.Эванса, Дж.Хуса и др. Полевые геологические описания лессово-почвенных разрезов выполнены В.С.Зыкиной, Д.Г.Козьминным, В.М.Колямкиным, Т.А.Шаталиной, С.К.Кривоноговым, И.Д.Зольниковым, А.И.Ждановой.

Большой прогресс в развитии представлений автора о возможностях петромагнитных исследований в контексте палеоклиматических реконструкций дали рабочие визиты в зарубежные лаборатории Геофизического Института в Праге, Чехия (1998-1999 гг.) и Института геологии и геофизики Китайской Академии Наук, Пекин (1999, 2001 гг.).

Защищаемые положения:

1) На основании установленных пространственно-временных закономерностей изменения магнитных характеристик лессово-почвенных отложений Сибирской субэвральской формации проведено районирование Сибирского региона на четыре провинции. Зависимости между магнетизмом отложений и изменениями ландшафтных компонентов и климата позднего плейстоцена, реконструированными

по палеоботаническим и палеогеографическим данным, свидетельствуют, что сильномагнитные субэвральские отложения сформировались под воздействием климата с перигляциально-тундровым типом растительности. Смягчение климата через бореальный к суббореальному со степным типом растительности сопровождалось ослаблением магнитных свойств лессово-почвенных отложений через среднемагнитные до очень слабомагнитных.

2) Формирование магнитных свойств пород Сибирской субэвральской формации определялось взаимодействием двух различных механизмов: поступлением магнитной фракции в отложения за счет ветровой деятельности («ветровой механизм», характерный для лессов Аляски) и (био)химическим образованием аутигенных тонкодисперсных магнитных минералов («педогенный» механизм, характерный для палеопочв Китая). В отличие от других лессовых формаций, где действует преимущественно либо тот, либо другой механизм, в Сибири наблюдается последовательный переход от «алаянской» модели к «китайской» через «сибирскую» модель. Последняя представляет собой суперпозицию (наложение) этих двух механизмов и обуславливает все своеобразие магнитных свойств сибирских лессово-почвенных серий.

3). Механизм, формирующий в лессах и палеопочвах ансамбль магнитных зерен по размерам, един для всех отложений этого типа на земном шаре, и его конкретное действие в конкретном месте обусловлено как глобальными климатическими колебаниями в масштабах планеты, так и местными локальными условиями, включающими флуктуации палеомикроклимата, местные палеогеографические условия лессонакопления и почвообразования. Совокупность действующих факторов определяет преобладающие размеры частиц магнитных минералов, которые уменьшаются в ископаемых почвах и увеличиваются в лессовых толщах независимо от географического положения лессово-почвенной формации. Эффективный размер магнитного зерна является базовым параметром для общей модели формирования магнитных свойств субэвральских отложений под влиянием природной среды и климата.

4). Петромагнитные характеристики пород Сибирской субэвральской формации являются чувствительными индикаторами изменений окружающей среды. Концентрационно-зависимые магнитные характеристики, связанные с крупнозернистыми фракциями отложений, отражают изменения климата в периоды похолоданий, а структурно-чувствительные, связанные с содержанием мелкозернистых фракций, - в периоды потеплений. Детальность петромагнитной записи в лессово-почвенных отложениях сравнима с высокоразрешающими климатическими записями в донных осадках оз.Байкал, что позволяет использовать магнитные свойства сибирских субэвральских отложений для реконструкций природной среды и климата плейстоцена.

Научная новизна и личный вклад.

1) На основе анализа экспериментальных данных по изменению петромагнитных характеристик в лессово-почвенных последовательностях Сибирской субэвральской формации с учетом возрастных оценок отдельных горизонтов по геологическим (Волков, 1971; Архипов и др., 1997; Зыкин и др.,

2000 и др.), палеонтологическим, радиоуглеродным (Орлова, 1995; Orlova et al., 1999), термолюминисцентным (Zander et al., 2003; Frechen et al., 2005) данным выявлены основные закономерности процессов формирования магнитных свойств субаэриальных отложений на территории Сибири. В позднем плейстоцене установлено, по крайней мере, 4 крупных провинции, различающиеся по магнитным свойствам лессово-почвенных последовательностей от сильномагнитных до очень слабомагнитных. Эти провинции в целом отвечают различным подзонам палеоклимата в регионе.

2) Опираясь на выявленные закономерности и с использованием современных представлений о механизмах формирования магнитных свойств лессово-почвенных последовательностей в различных регионах Земного шара (Heller, Liu, 1986; Beget et al., 1990; Heller, Evans, 1995; Lagroix, Banerjee 2002; Evans, 2001, Evans, Heller, 2003 и др.) разработан авторский вариант концепции, объясняющей формирование магнитных свойств лессово-почвенных последовательностей и основные закономерности поведения магнитных характеристик в лессово-почвенных сериях. Основой авторской концепции является наложение (суперпозиция) двух различных по характеру и проявлению механизмов формирования магнитных свойств субаэриальных отложений: ветрового привноса магнитного материала и образование новых магнитных минералов в результате био/геохимических процессов. Динамический баланс между этими процессами определяет многообразие магнитных характеристик лессово-почвенных серий.

3) Исходя из экспериментальных данных в рамках авторской концепции, с учетом характеристик современного климата (Климатический..., 1960) построена петромагнитная модель для каждой провинции. По петромагнитным данным составлены карты-схемы природной среды позднего плейстоцена, позволяющие уточнить и детализировать существующие реконструкции ландшафтных компонентов региона (Динамика..., 2002).

4) По результатам исследований магнитной анизотропии лессово-почвенных отложений Сибири, с учетом аналогичных данных по другим регионам (Thistelwood et al., 1991; Lagroix, Banerjee, 2002; Hus, 2003 и др.) и результатов лабораторного моделирования (Wu et al., 1998) реконструировано направление палеоветров для отдельных интервалов среднего-позднего плейстоцена в Западной и Средней Сибири.

Теоретическая и практическая ценность Разработанная автором концепция процессов формирования магнитных свойств отложений Сибирской субаэриальной формации является обобщением и дальнейшим развитием существующих представлений по этой проблеме и представляет собой основу для анализа и понимания общих закономерностей формирования лессово-почвенных последовательностей в зависимости от изменений окружающей среды и климата как в глобальном масштабе, так и с учетом региональных палеогеографических условий. Разработанные автором петромагнитные модели для отдельных регионов Сибирской субаэриальной формации позволяют с большой степенью детальности восстанавливать характер климатических

колебаний как в периоды ледниковый, так и во время межледниковий и межстадиалов. Результаты проведенных исследований дают возможности для построения пространственно-временных карт-схем, отражающих изменения окружающей среды и климата на принципиально новой методической основе.

Апробация работы. Научные результаты докладывались на международных и российских совещаниях: Международный симпозиум по палеоэкологии плейстоцена, (Новосибирск, 1998); Симпозиум IAGA (Бирмингем, 1999); Ассамблея EGU (Гаага, 1999, Вена, 2000, Ницца, 2001); Всероссийский семинар по палеомагнетизму и магнетизму горных пород, (Борок, 2002, Казань, 2004); Общественный семинар по палеомагнетизму и магнетизму горных пород (2002, 2005); конференция "Проблемы геологии и географии Сибири" (Томск, 2003); 6-й Международный симпозиум по геохимии окружающей среды (Эдинбург, 2003); Конференция РФФИ (Иркутск, 2003); Международный симпозиум по изменению окружающей среды в Центральной Азии (Берлин, 2003, Улан-Батор, 2005, 2006); Международный симпозиум «Закономерности строения и эволюции геосфер» (Владивосток, 2005).

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Она включает 276 страниц текста, 69 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 410 наименований.

По теме диссертации опубликовано 33 работы, из них 14 в ведущих научных отечественных и зарубежных журналах и изданиях.

Работа выполнена в Лаборатории геодинимики и палеомагнетизма Института геологии СО РАН (с 07.03.06 - ИГМ СО РАН) по плану НИР 4.7.1. «Динамика земли и эволюция геологических процессов» (№ гос. рег. 01980003032), междисциплинарной интеграционной программе СО РАН «Изменения климата и природной среды в голоцене и плейстоцене в контексте глобальных изменений», проектам РФФИ: 99-05-39077-ГФЕН, 01-05-65085, 01-05-65294, 04-06-80058, 04-05-64076, 06-05-65135.

Благодарности. Большую поддержку автору по применению петромагнитного метода для исследования изменений окружающей среды и климата, положившую основу данной работы, оказывали А.Ю.Казанский, Э.Петровский (Чехия), Н.Иорданова (Болгария), В.С.Зыкина, А.Капичка (Чехия), Р.Жу, Б.Гоу (Китай), С.К.Кривоногов, И.Д.Зольников, Т.Г.Рященко и В.А.Акулова, а для решения задач геоэкологии - С.Б.Бортникова и А.А.Айриянци. На всех этапах исследований автор пользовался советами и помощью российских и зарубежных специалистов: К.С.Буракова, А.Н.Василевского, Н.И.Дроздова, Т.С.Гендлер, С.А.Гуськова, А.Ю.Гужикова, А.Н.Диденко, В.С.Зыкина, Ш.З.Ибрагимова, Д.Г.Козьмина, Н.О.Кожевникова, Ю.П.Колмогорова, К.М.Константинова, В.А.Кравчинского, Л.В.Кунгурцева, А.В.Лавренчука, А.Ф.Летникова, Д.К.Нургадиева, Д.М.Печерского, Е.В.Склярова, Э.П.Солотчиной, С.А.Тычкова, М.А.Чемякиной, В.П.Чехи, Л.Е.Шолго, М.И.Эпова, С.Спасова, Ф.Лагро, У.Морриса, Р.Шолгера, М.Фрешена, Д.Суна, С.Ши, Ч.Вей, Д.Хоффмана. Всем им автор выражает свою искреннюю признательность. С особой теплотой хочется поблагодарить моего учителя Г.А.Поспелову. Успешному проведению исследований способствовала

постоянная поддержка со стороны С.А.Тычкова и В.А.Верниковского. Активное творческое содействие и всестороннюю поддержку на всех этапах работы оказывали сотрудники палеомагнитной группы Лаборатории геодинамики и палеомагнетизма: И.В.Белоносов, В.Ю.Брагин, А.И.Жданова, А.Ю.Казанский, А.С.Крамаров, Д.В.Метелкин, Н.Э.Михальцов, З.Л.Шмырева.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние решения проблемы

Лессово-почвенные отложения как континентальный палеоклиматический архив. Главной особенностью геологической истории четвертичного периода является смена в планетарном масштабе крупных похолоданий и потеплений, связанных с изменением орбитальных параметров Земли (Martinson et al, 1987; Berger, 1988; и др.). Вариации орбитальных параметров влияют на распределение солнечной инсоляции, которая определяет объемы ледниковых щитов. Палеоклиматические и палеогеографические реконструкции производятся на основе изучения кернов ледниковых щитов (Johnsen et al, 1992 и др., Petit et al, 1990 и др.), океанических (Shackleton, Opdyke, 1973; Bloemendal et al, 1993 и др.), озерных (Peck et al, 1994; Nourgaliev et al, 2005 и др.) и ледниковых (Астахов, 1999 и др.) отложений. Среди континентальных отложений наиболее полную климатическую информацию хранят лессово-почвенные последовательности Китайского лессового плато (КЛП) (Liu, 1985; Kukla, 1987 и др.), Центральной Азии, (Dodonov, 1991 и др.), Аляски (Westgate et al., 1990 и др.), Северной Америки (Muhs et al., 1999 и др.), Европы (Jordanova, Petersen, 1999 и др.) и Сибири (Волков, 1971; Chlachula et al, 1997). Принципиальные положения палеоклиматической модели лессонакопления/почвообразования заключаются в: 1) интенсивном лессонакоплении с высокой скоростью аккумуляции в холодные и сухие периоды ледниковый и 2) развитии почв на лессовом субстрате в результате педогенных процессов в теплые и влажные периоды межледниковий и межстадиалов (Evans, Heller, 2003). В умеренных широтах при переходе от потепления к ледниковью (этап холодного и влажного климата) формируется криогенный горизонт, представляющий собой верхний слой почвы, нарушенный мерзлотно-солифлюкционными деформациями (Кригер, 1965; Волков, 1971). Для палеоклиматических реконструкций в ископаемых почвах изучаются цвет, микро- и макроморфологическое строение, минералогический и гранулометрический состав, состав гумуса и т.п. (Проблемы..., 1984; Kemp, 2001); в лессовых толщах исследуются текстурные, минералогические, геохимические, гранулометрические особенности, используются палеоботанические, палеонтологические и археологические свидетельства изменения климата и природной среды (Кригер, 1965; Лессовый..., 2001 и др.).

Магнитные свойства лессов и палеопочв как источник палеоклиматической информации. При палеоклиматических реконструкциях широко используются магнитные свойства лессово-почвенных отложений, поскольку первые же измерения магнитной восприимчивости (χ) в отложениях КЛП показали четкую дифференциацию магнитных свойств лессов и палеопочв

(Heller, Liu, 1986; Kukla et al, 1988). Корреляция между вариациями χ в лессово-почвенных сериях и отношения изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в биогенном CaCO_3 океанических донных осадков соответствующих временных интервалов дала развитие новому направлению в палеоклиматологии – реконструкции природной среды и климата по магнитным свойствам лессово-почвенных отложений (Maher, Taylor, 1988; An et al., 1991; Liu et al, 1993 и др.). Повышенные значения χ в ископаемых почвах по сравнению с лессовыми толщами в отложениях КЛП объясняются образованием аутигенных суперпарамагнитных (СПМ) и однодоменных (ОД) зерен магнетита и маггемита в результате интенсивного педогенеза в эпохи потепления (Maher, Thompson, 1991; Hus, Han, 1992; Banerjee et al, 1993; Evans, Heller, 1994 и др.). Новообразование тонкозернистых (<0.03 мк) СПМ минералов фиксируется и повышенными значениями частотно-зависимой магнитной восприимчивости χ_{fd} и FD-фактора (Maher, 1988 и др.). Повышенные значения χ и FD в палеопочвах являются отражением «*китайского*» или *педогенного механизма* записи палеоклиматического сигнала в магнитных свойствах лессов и палеопочв (Evans, Heller, 2003). Педогенный механизм характерен для лессово-почвенных отложений Европы (Forster et al., 1996), Африки (Dearing et al., 1996), Средней Азии (Dodonov, 1991).

В лессово-почвенных сериях Аляски повышенные значения χ приурочены к лессовым толщам, пониженные – к палеопочвам (Beget et al, 1990), что объясняется интенсивной деятельностью ветра в холодные и сухие периоды, приносящего большое количество терригенных магнитных минералов, и уменьшением поступления их в периоды потеплений при ослаблении ветра. Неблагоприятный для педогенеза баланс температуры и влажности не способствовали образованию аутигенных магнитных минералов, что отмечается низкими значениями FD ($<3\%$) (Vlag et al, 1999). Такой тип палеоклиматической записи назван «*аляскинским*» или *ветровым механизмом* (Evans, Heller, 2003) и встречается во внутриконтинентальных лессах Северной Америки (Hayward, Lowell, 1993) и Средней Сибири (Chlachula et al., 1997; Matasova et al., 2001). Кроме регионов с ярко выраженным «китайским» или «аляскинским» механизмом известны отложения, где поведение петромагнитных характеристик не укладывается в рамки предложенных моделей (Nawrocki et al., 1996; Akram, Yoshida, 1997; Казанский и др., 1998; Bidegain et al., 2005). Палеоклиматические реконструкции здесь проблематичны и в каждом случае требуется выяснение конкретного механизма формирования магнитного сигнала (Большаков, 2001).

Магнитная минералогия лессово-почвенных отложений. В основе палеоклиматических реконструкций по магнитным свойствам лессово-почвенных серий лежит информация, которая хранится в содержащихся в них магнитных минералах. Несмотря на сходный минералогический состав магнитных фракций по всему миру (магнетит, маггемит, гематит, реже титаномагнетит, гетит), магнитные свойства лессово-почвенных серий сильно различаются по двум основным причинам: 1) различия в концентрациях и соотношениях магнитных минералов разного генезиса; 2) вариаций в размерах и доменном состоянии (ДС) магнитных зерен. В лессово-почвенных сериях присутствуют терригенные и

аутигенные магнитные минералы (Heller, Evans, 1995). Терригенные минералы могут иметь местное происхождение за счет перевесания близких источников или приноситься в виде золовой пыли из удаленных источников. Их количество и состав зависят от источников сноса, дальности и способах транспортировки обломочного материала. Количество и состав аутигенных минералов определяется физико-химическими, биохимическими условиями осадконакопления, почвообразования и постседиментационных процессов (Maher et al., 2003). Вклад терригенных и аутигенных магнитных минералов в общие магнитные свойства оценивается по изменению магнитных характеристик после химической обработки образцов, растворяющей мелкие аутигенные зерна окислов железа ($<1\text{ мк}$) (Mehra, Jackson, 1960). Уменьшение χ после химического травления китайских лессов составило 59-75%, палеопочв - 83-89% (Verosub et al., 1992), европейских палеопочв - 80% (Фаустов и др., 1986), американских лессов - 20-47% (Vidic et al., 2000), аляскинских - $<10\%$ (Lagroix, 2005).

Размеры магнитных зерен определяют поведение безгистерезисной остаточной намагниченности (ARM), FD и различных соотношений магнитных параметров. Аляскинские лессово-почвенные отложения крупнозернисты по магнитному зерну, их ДС определяется, как псевдооднодоменное (ПОД) и многодоменное (МД) (Lagroix, Banerjee, 2002). Магнитные свойства лессов аляскинского типа зависят от содержания крупноалевритовой и песчаной фракций, что подчеркивает главную роль ветровой деятельности в формировании этих отложений. Лессово-почвенные образования китайского типа относятся к мелкозернистым, магнитная фракция состоит, в основном, из мелких ПОД-зерен (Florindo et al., 1999; Deng et al., 2004). Магнитный сигнал в таких отложениях несет глинистая фракция, подтверждая «педогенный» механизм образования их магнитных свойств (Фаустов и др., 1986; Sun et al., 1999 и др.).

Палеоклиматические и палеогеографические реконструкции на основе магнитных записей в лессово-почвенных последовательностях делятся на 3 группы: количественные, полуколичественные и качественные. К *первой группе* относятся реконструкции палеовлажности по магнитным свойствам отложений КЛП (Heller et al., 1993; Maher et al., 1994; Han et al., 1996; Florindo et al., 1999 и др.), преобладающего направления палеоветров по среднему направлению максимальной оси эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости (AMS) аляскинских лессов и восстановления элементов палеосклона по магнитной текстуре (Lagroix, Banerjee, 2004). Ко *второй и третьей группам* относятся реконструкции, основанные на корреляции магнитных характеристик лессово-почвенных отложений и изменений $\delta^{18}\text{O}$ в донных океанических осадках (Hovan et al., 1989; Thompson, Maher, 1995; Florindo et al., 1999 и др.), содержанием дейтерия и $\delta^{18}\text{O}$ в ледовых кернах (Li et al., 1997; Fang et al., 1999), Хейнриковскими событиями (Evans et al., 2003) и т.п. Другой подход заключается в выявлении зависимостей между магнитными свойствами и физико-химическими характеристиками отложений: гранулометрическим составом (Feng, Khosbayan, 2004), минеральным и элементным составом (Grimley et al., 2003; Liu et al., 2003), вариациями цвета (Liu et al., 1993; Chen et al., 2002),

другими характеристиками почв (Li et al., 1999). Еще одним направлением является выявление основных циклов изменений магнитных характеристик лессово-почвенных серий с помощью спектрального анализа и сопоставление их с циклами Миланковича (Florindo et al., 1999 и др.). А также вариации χ используются для приближенной оценки абсолютного возраста отложений КЛП - возрастная магнитная модель (Records..., 2000).

Исследования магнитных свойств отложений Сибирской субэвразальной формации ведутся с 60-х годов XX века, но до 90-х годов были ориентированы на решение палеомагнитных задач (Поспелова, Зудин, 1967; Поспелова, Гнибиденко, 1971, Разрез..., 1978; Фаустов и др., 1986; Большаков, Свиточ, 1988; Сидорас, 1990; Зыкина и др., 2000). Измерения некоторых петромагнитных параметров проводились для общей характеристики магнитных свойств отложений и доказательства геофизической природы естественной остаточной намагниченности. С середины 90-х годов изучением магнитных свойств лессово-почвенных серий Сибири, но уже с целью палеоклиматических реконструкций, занялись зарубежные ученые (Chlachula et al., 1997, 1998; Chlachula, 1999; Frechen, Yamskikh, 1999; Evans et al., 2003; Hus, 2003). И.Хлакула с соавторами по петромагнитному изучению отложений Средней Сибири установили «аляскинскую» модель формирования магнитных свойств и, проведя корреляцию вариаций χ с изменениями $\delta^{18}\text{O}$, показали возможность палеоклиматических реконструкций. На основании изучения одного разреза они распространили «аляскинскую» модель на всю Сибирь. Однако, из более ранних работ сибирских ученых (Поспелова, Зудин, 1967; Поспелова, 1971 и др.) следует, что во многих частях Сибирской формации изменения магнитных параметров слабо зависят от литологии отложений и прямые палеоклиматические реконструкции по ним невозможны. Таким образом, отражают ли магнитные свойства сибирских субэвразальных отложений условия осадконакопления и палеоклимат, а если да, то какой механизм контролировал формирование этих свойств - вопросы, требующие своего разрешения.

Глава 2. Геолого-стратиграфическая характеристика Сибирской субэвразальной формации и петромагнитные методы ее исследования

В южной внеледниковой части Сибири покровные лессовидные отложения слагают верхнюю часть разреза четвертичных отложений от Урала до оз. Байкал (Ломтадзе, 1968; Волков, 1971 и др.). Их состав и мощность зависят от условий седиментации на различных морфологических элементах. Отложения имеют закономерное циклическое строение, сформировались в преимущественно субэвразальных условиях, представлены лессовидными породами с погребенными в них почвенными горизонтами, измененными мерзотно-солифлюкционными процессами (Логачев и др., 1964; Кригер, 1965; Волков, 1971; Архипов, 1971; Волков, Зыкина, 1982; Рященко, 1984; Дроздов и др., 1990; Архипов и др., 1997; Chlachula, 1999; Зыкина и др., 2000; Зыкин и др., 2000; Chlachula, 2001 и др.). Циклиты наиболее детально изучены для отложений среднего и позднего плейстоцена, их расчленение произведено на основании ^{14}C и TL датировок и по

биостратиграфическим данным. По степени детальности геологическая летопись сибирской субэвразийской формации сопоставима с изотопно-кислородной шкалой океанических осадков (Архипов и др., 1997; Kazansky et al., 2003 и др.). В работе использована Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины (2000), к которой привязана сибирская лессово-почвенная стратиграфия (Архипов и др., 1997; Добрецов и др., 2003 и др.). Согласно этой схеме лессовые толщи отвечают ледниковым горизонтам, ископаемые почвы – межледниковым. Обычно палеопочвы представляют собой педокомплексы, состоящие из нескольких почвенных горизонтов, разделенных прослоями лессовидного суглинка, что свидетельствует о сложном процессе их формирования, включающем несколько эпох почвообразования (Зыкина, 1980; Зыкина и др., 1981 и др.). Поскольку в разных частях Сибири лессовые и почвенные горизонты имеют местные названия, для упрощения изложения результатов в данной работе, на основе соответствия лессовых и почвенных горизонтов определенным стадиям океанической кислородно-изотопной шкалы (ОИС) (Архипов и др., 1997), использованы единые обозначения, не являющиеся общепринятыми. Для лессовых горизонтов, образовавшихся в холодные четные ОИС (ОИС2, ОИС4, ОИС6, ОИС8, ОИС10...) – Л1, Л2, Л3, Л4, Л5... Для ископаемых почв, формировавшихся в теплые нечетные ОИС (ОИС1 (голоцен), ОИС3, ОИС5, ОИС7, ОИС9...) – П0, П1, П2, П3, П4...

Основу работы составили результаты петромагнитного изучения отложений позднего-среднего плейстоцена в 20 разрезах Сибирской субэвразийской формации, часть из которых являются опорными. В Восточной Сибири (Иркутско-Черемховская равнина) изучено 2 разреза; в Средней Сибири (Минусинская котловина, Приенисейская равнина) – 4 разреза; в Западной Сибири – 14 разрезов, в том числе 2 разреза в Кузнецкой котловине, 2 – в Новосибирском Приобье, 1 – на Северо-Кузнецкой равнине, 2 – на Заобской равнине; 1 – на Приобской равнине, 2 – в предгорном Алтае, 4 – в Барабинской низменности.

Методика исследований. Для решения поставленных задач применялся комплекс методов, включающий магнитные, гранулометрические, рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования. Магнитные измерения проводились по общепринятым методикам (Методические, 1992; Печерский, Диденко, 1995; Evans, Heller, 2003 и др.) на стандартной аппаратуре. Измерения выполнены, кроме Новосибирского Палеомагнитного Центра (ИГМ СО РАН), в лабораториях Аналитического центра ИГМ СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИФЗ РАН (г. Москва), АмГРЭ (Республика Саха-Якутия), Чехии (Геофизический институт НАН, г. Прага), Китая (Институт геологии и геофизики КАН, г. Пекин). Магнитные измерения на образцах-дублях в разных лабораториях показали высокую сходимость результатов.

Все магнитные параметры были условно разделены на 5 групп:

Группа 1. Концентрационно-зависимые: χ ; намагниченность насыщения $M_s(J_s)$; остаточная намагниченность насыщения SIRM; безгистерезисная остаточная намагниченность ARM (при условии незначительного количества

ОД-зерен); NRM (при условии единой природы намагниченности и постоянного состава магнитной фракции).

Группа 2. Характеризующие состав магнитной фракции: температуры Кюри и деблокирующие температуры при нагреве образцов до 700°C, $\chi(T)$, $M_s(T)$, SIRM(T), NRM(T); показатель соотношения магнитомягких и магнито жестких минералов – S; медианные разрушающие поля (MDF) при размагничивании NRM, SIRM, ARM переменным полем; поле насыщения H_s ; гистерезисные характеристики H_c , H_{cr} .

Группа 3. Структурно-чувствительные, характеризующие относительный размер магнитного зерна и доменное состояние ферромагнетиков: χ_{fd} , FD-фактор; ARM (при условии значительного количества ОД-зерен); соотношения $\chi/SIRM$, χ/ARM , SIRM/ARM; гистерезисные соотношения M_{rs}/M_s , H_{cr}/H_c .

Группа 4. Параметры, характеризующие *анизотропию магнитной восприимчивости*: степень анизотропии P' ; направления главных осей эллипсоида AMS: K_{max} , K_{min} , K_{int} ; плоскостная текстура F; линейная текстура L; параметр формы T.

Группа 5. Парамагнитные параметры: парамагнитная восприимчивость χ_{PAR} , намагниченность парамагнетиков (M_{PAR}).

Глава 3. Петромагнитные характеристики лессово-почвенных отложений Сибирской субэвразийской формации

Концентрационно-зависимые параметры. Средняя величина χ лессово-почвенных отложений Сибирской субэвразийской формации меняется почти на 2 порядка (рис.1). На большей части территории $\chi_{лесс}$ превышает $\chi_{почв}$, в среднем, в 3-4 раза, за исключением западной части формации (Барабинской низменности), где наблюдается обратное соотношение: средние значения $\chi_{почв}$ составляют 1.2-1.5 от $\chi_{лесс}$. В большинстве случаев интерстадиальная палеопочва П1 (ОИС3) более магнитна, чем интергляциальная П2 (ОИС5). Поведение, аналогичное χ , демонстрирует SIRM. В одном разрезе средние значения SIRM_{лесс} могут превышать SIRM_{почв} в 3 раза. Изменения ARM в целом сходны с χ и SIRM, особенно для лессовых толщ. Отличия заключаются в том, что: 1) средние значения ARM_{лесс} ненамного превышают таковые в палеопочвах (максимум в 1.8 раза); 2) в части разрезов ARM ведет себя не синхронно с χ и SIRM, в некоторых палеопочвах, наоборот, имеет более высокие средние значения, чем в лессовых толщах. Анализ изменения концентрационных магнитных параметров в лессово-почвенных сериях Сибирской субэвразийской формации по площади и по глубине показал возможность районирования отложений по магнитным свойствам, позволяющего выделить четыре основных провинции со своими диапазонами изменения магнитных характеристик (рис.2) (Matasova, Kazansky, 2004; Матасова, 2004; Kazansky et al., 2005).

Провинция 1. Охватывает южную часть Средней Сибири. Здесь наиболее магнитные отложения и самые высокие значения концентрационных магнитных параметров, четкая дифференциация магнитных свойств, средние значения $\chi_{лесс}$ превышают $\chi_{почв}$ в 3-4 раза.

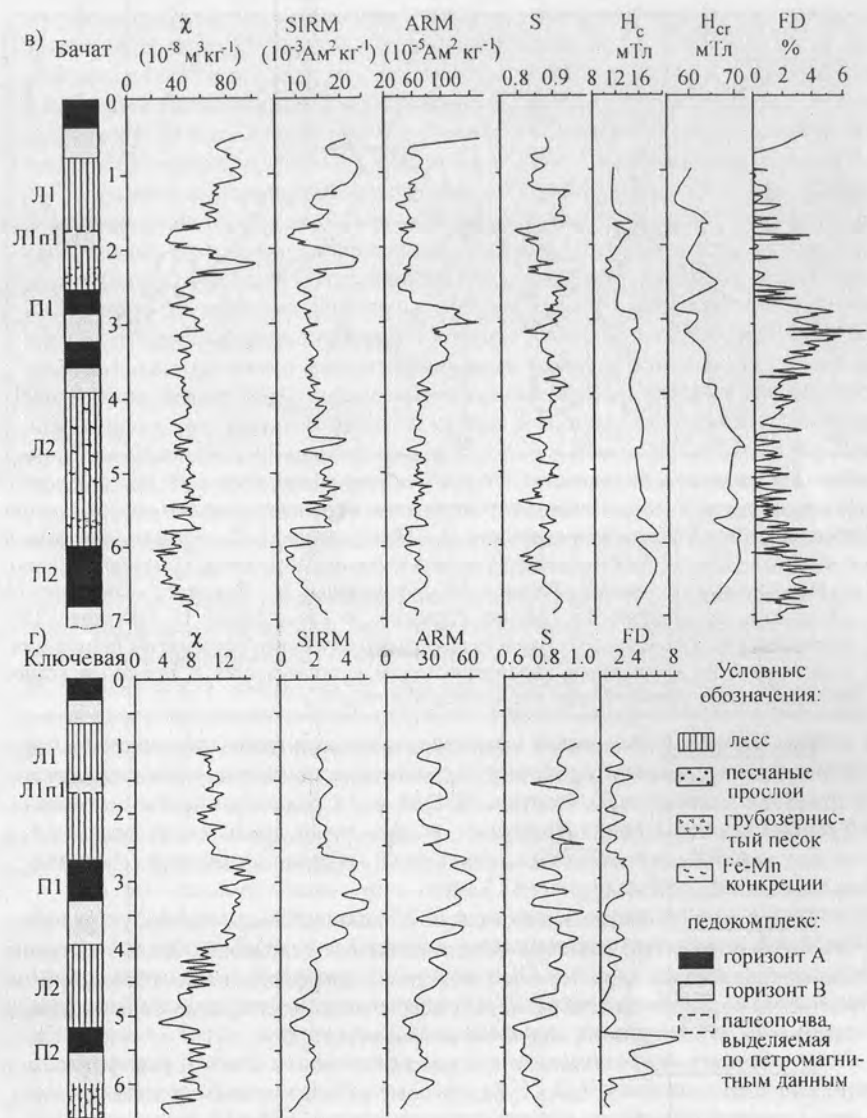
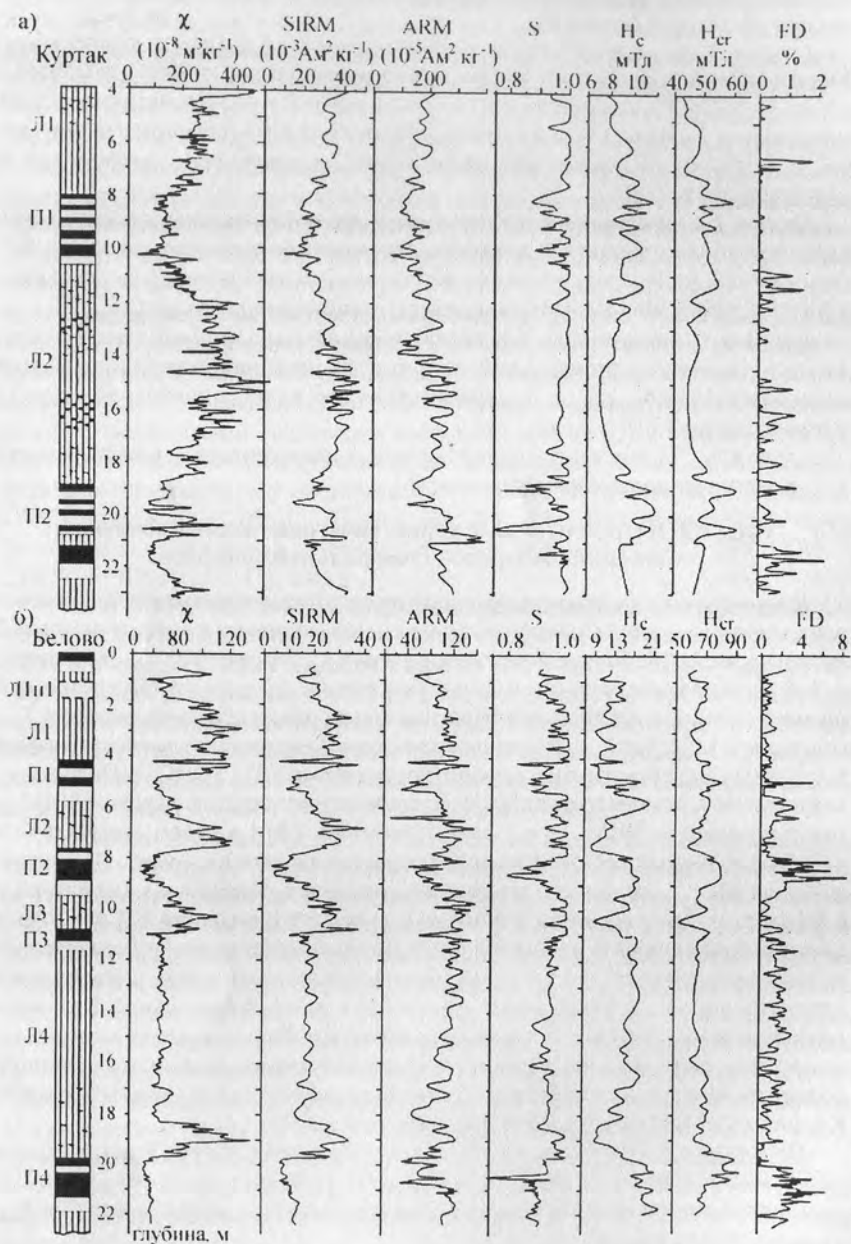


Рис. 1. Петромагнитные характеристики лессово-почвенных отложений Сибирской субаральной формации, а - г - провинции 1 - 4, соответственно.

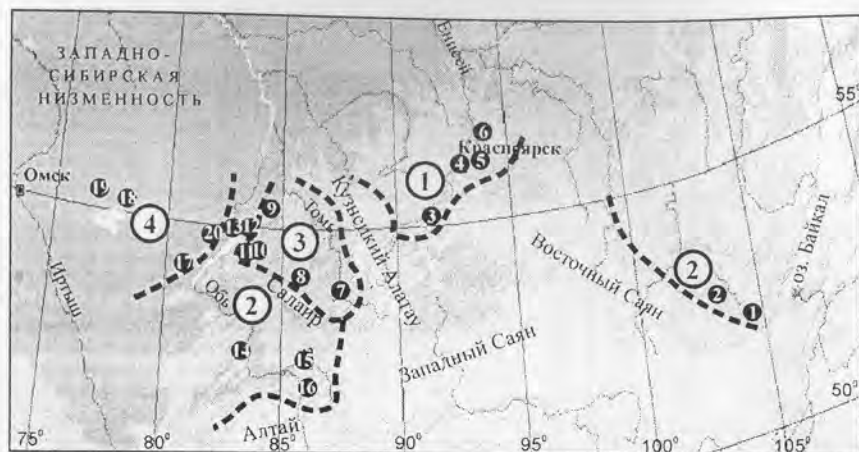


Рис. 2. Карта-схема разделения Сибирской субарктической формации на провинции. Черными кружками обозначено местоположение изученных разрезов, цифры внутри соответствуют следующим разрезам: 1 - Новоразводная, 2 - Мальта (Восточная Сибирь); 3 - Куртак, 4 - Татышев, 5 - Государев Лог, 6 - Хлоптуново (Средняя Сибирь); 7 - Новокузнецк, 8 - Бачат, 9 - Тогучин, 10 - Мраморный, 11 - Ложок, 12 - Кольцово, 13 - Огурцово, 14 - Белово, 15 - Малое Угренево, 16 - Быстринка, 17 - Жуланка, 18 - Абрамово, 19 - Ключевая, 20 - Верх-Тула. Белыми кружками обозначены провинции, выделенные по магнитным характеристикам лессовых пород, предполагаемые границы между провинциями проведены пунктиром.

Провинция 2. Включает территорию южной части Западной Сибири (Приобскую увалистую равнину, Предалтайскую равнину, Новосибирское Приобье), южную часть Восточной Сибири. Среднемагнитные отложения. Средние значения концентрационных параметров здесь ниже, сохраняется четкое различие по магнитным свойствам: средние значения $\chi_{\text{лесс}}$, $\text{SIRM}_{\text{лесс}}$ превышают $\chi_{\text{почв}}$, $\text{SIRM}_{\text{почв}}$ в 1.5-3 раза.

Провинция 3. Объединяет Кузнецкую котловину, Северо-Кузнецкую равнину, Заобскую холмистую равнину. Слабомагнитные отложения. Здесь величины концентрационных характеристик еще ниже, дифференциация отложений по магнитным свойствам слабая, хотя в целом тенденция превышения лессовых магнитных характеристик над почвенными остается.

Провинция 4. Расположена в западной части Сибирской формации (Барабинская равнина), здесь субарктические отложения очень слабомагнитны, наблюдается обратный характер изменения магнитных характеристик: в палеопочвах их значения чуть выше, чем в лессовых горизонтах.

В провинциях 1, 2, и 3 изменения концентрационных магнитных параметров соответствуют «аласкинскому» климатически-обусловленному механизму формирования магнитных свойств субарктических осадков (Heller, Evans, 1995, Chlachula et al., 1997). Предпосылки для его работы следующие: 1) интенсивная

ветровая деятельность в периоды лессонакопления и ее снижение в периоды почвообразования; 2) наличие близко расположенных (до первых сотен км) источников эолового материала; 3) невысокая активность педогенных процессов в периоды потеплений, не способствующая образованию аутигенных магнитных минералов; 4) повышенная влажность и низкие температуры в конце периодов почвообразования, ведущие к криогенным изменениям почвенных горизонтов.

С позиций «аласкинской» модели наиболее суровые климатические условия в позднем плейстоцене имели место на территории провинции 1 как в периоды похолоданий, так и в периоды потеплений, поскольку: 1) в субарктических отложениях этого региона наблюдается наиболее высокая концентрация магнитных минералов, что, вероятно, свидетельствует о самых сильных ветрах (в изученной части Сибирской формации) и сухом климате в ледниковья; 2) поведение ARM, полностью синхронное с концентрационными характеристиками, указывает на отсутствие мелких (ОД) частиц магнитных минералов, которые для лессово-почвенных серий являются большей частью аутигенными и служат косвенным признаком интенсивного педогенеза при теплых и влажных условиях в периоды потеплений. При господстве ветров 3 и Ю-З направлений в регионе, по крайней мере, с плейстоцена до современности (Москвитин, 1940), естественным барьером для транспортировки обломочного материала лессовой размерности является горная система Кузнецкого Алатау (высоты до 2000 м), ориентированная СЗ-ЮВ. Этот барьер ограничивает поступление пыли из дальних источников в виде воздушных аэрозолей, при этом поступающий материал должен быть довольно мелкозернистым (<5 мк), чтобы быть поднятым на высоту 1000-1500 м (Седиментология, 1980). Таким образом, высокие концентрации магнитного материала в лессово-почвенных разрезах Средней Сибири не могут объясняться поступлением из источника, находящегося к западу от Кузнецкого Алатау. В качестве основных источников эолового материала на первый план здесь выходят местные области сноса: сама горная система Кузнецкого Алатау и ее делювиально-пролювиальные конусы выноса, аллювиальные отложения рек (главным образом, р. Енисей) (Chlachula et al., 1997; Zhu et al., 2001).

Для субарктических осадков провинции 2 с меньшим содержанием магнитной фракции (Matasova, Kazansky, 2004) возможными источниками лессового материала могут быть: для Приобья - навесные отложения с Казахского мелкосопочника и Кулундинской степи с Ю и Ю-З (по преобладающему направлению современных и палеоветров) (Матасова и др. 2003), для отложений предгорного Алтая - перевесные аллювиальные отложения рек Оби, Катунь, содержащие большое количество магнитного материала, поступающего с Алтайских гор (Поспелова, Гнибиденко, 1971). В Прибайкалье естественным барьером для 3, Ю и Ю-З ветров являются горные хребты Восточного Саяна с абсолютными высотами более 3000 м. Преобладающие здесь ветра С-З направления (Иркутск, ..., 1997) могут приносить эоловый материал с ближайшего Лено-Ангарского плато. Дополнительным источником, вероятно, является аллювий левых притоков р. Ангара (рр. Китой, Белая, Ока, и др.), размывающих относительно высокомагнитные комплексы Восточного Саяна.

Все палеопочвы в отложениях *провинции 3* характеризуются небольшим содержанием магнитных минералов и низкими значениями χ , SIRM, но с такими же значениями встречаются и лессовые горизонты (Казанский и др., 1998; Matasova et al., 2000; Матасова и др. 2002). Низкие концентрации магнитной фракции в лессах можно объяснить большой удаленностью от источников золотого материала, а местные источники, вероятно, не играли существенной роли. Со стороны преобладающих ветров (З, Ю-З) удаленным источником золотого материала могут быть Кулундинские степи и полупустынные пространства Северо-Восточного и Восточного Казахстана. В отличие от магнитных фракций субаэральных осадков *провинций 1 и 2*, здесь в значительном количестве появляются мелкие аутигенные (педогенные) ОД магнитные частицы, судя по величине и поведению ARM.

В *провинции 4* зафиксированы самые низкие концентрации магнитного материала поведение концентрационных характеристик, тяготеющее к «китайскому» механизму формирования магнитных свойств субаэральных осадков (Матасова, 2004). По величине и степени изменения χ эти отложения ближе к самым слабомагнитным европейским (Forster et al., 1996; Пилипенко и др., 2004). Для Западно-Сибирской низменности в отсутствие близких горных систем и при общем преобладании палеоветров западных румбов дальним источником золотого материала могут быть степи и полупустынные области Северо-Восточного Казахстана, более близким источником может быть аллювий рр. Иртыш и Омь. Однако, неогеновые отложения, за счет перемыва которых формировались русловые и пойменные отложения этих водотоков слабомагнитны (Казанский, 1989; Зыкин и др., 1991) и не могут рассматриваться, как основной источник магнитного материала.

Состав магнитной фракции. На всех без исключения диаграммах $\chi(T)$, $J_s(T)$ лессов и палеопочв Сибирской формации фиксируется точка Кюри магнетита (575-578°C). На диаграммах $\chi(T)$ с разной интенсивностью проявляется пик в районе 250-350°C, который можно рассматривать как свидетельство присутствия маггемита. Деблокирующие температуры, близкие к температурам Кюри магнетита и гематита, проявлены на диаграммах NRM(T), SIRM₁(T). Здесь же в диапазоне 250-350°C наблюдается перегиб кривых NRM(T), SIRM(T), который исчезает при повторном нагреве на кривой SIRM₂(T), что также свидетельствует в пользу присутствия маггемита. На большинстве кривых SIRM₁(T) наблюдаются быстрый спад и перегиб в районе температур 150-200°C, отсутствующие на вторичных кривых SIRM₂(T). Вероятно, он обусловлен релаксацией напряженного состояния, связанного с маггемитизацией мелких магнетитовых зерен (Большаков и др., 1987). Для контроля состава магнитной фракции лессово-почвенных отложений проведены рентгеноструктурные исследования, которые подтвердили наличие магнетита, маггемита и гематита (Zhu et al., 2003; Matasova, Kazansky, 2004). Других магнитных минералов обнаружено не было.

Одинаковый (по набору минералов) состав магнитной фракции установлен для всех частей Сибирской субаэральной формации (Matasova, Kazansky, 2004). Различие магнитных свойств связано, кроме концентрации, с соотношением

различных минералов внутри магнитной фракции. Параметр S, оценивающий соотношение магнито жестких и магнитомягких минералов, во всех частях формации показывает большее относительное содержание гематита в палеопочвах, чем в лессовых толщах (рис.1). Древние позднелайстотенные почвы П2 (ОИС5) более магнито жесткие, чем П1(ОИС3). Тот же вывод следует из экспериментов по разрушению NRM переменным полем 100 мТл, и приобретению-разрушению SIRM в постоянном поле до 2.7 Тл. О большой магнитной жесткости палеопочв со сравнением с лессами свидетельствуют и изменения гистерезисных характеристик (Hc, Hcr) по глубине и по площади распространения субаэральных отложений (рис.1). В целом, районирование Сибирской субаэральной формации по характеристикам магнитной жесткости совпадает с районированием по концентрационно-зависимым характеристикам: относительное содержание гематита, по сравнению с магнетитом и маггемитом, возрастает от *провинции 1* к *провинции 4*. В этом же направлении во всех отложениях растет фактор Q.

Относительные размеры магнитных частиц оценивались графически по соотношениям гистерезисных параметров (Hcr/Hc, Jrs/J_s), характеризующим ДС магнитных зерен (Day et al., 1977). ДС магнитных минералов в сибирских отложениях определяется, как ПОД (преимущественно, палеопочвы) и МД (в основном, лессы) (рис. 3). Если ПОД состояние зерен рассматривать как смесь ОД и МД зерен (Dunlop, 2002), то доля ОД зерен в сибирских отложениях составляет 0-30%, а МД - 70-100%. Сибирские отложения более крупнозернисты по магнитному зерну, чем аналогичные на КЛП (Zhu et al., 1995; Florindo et al., 1999; Deng et al., 2004) и схожи с аляскинскими (Lagroix, Banerjee, 2002). Интересно, что в ту же область ДС на графике Дз, где концентрируются магнитные зерна сибирских отложений, смещаются магнитные зерна китайских лессов и палеопочв после химической обработки, уничтожающей аутигенные магнитные частицы (Deng et al, 2005).

В область МД зерен на графике Дз могут попадать СПМ зерна, дополнительную информацию о которых дает FD-фактор. Его значения в сибирских палеопочвах варьируют от 0 до 9.5% (рис. 1). Значения FD выше 4-5% характерны для «китайского» педогенного механизма формирования магнитных свойств, поскольку большинство тонкозернистых магнитных минералов имеют аутигенное происхождение. В отложениях *провинции 1* FD имеет низкие значения (<3%), тем самым, подтверждая здесь «*алаяскинский*» механизм формирования магнитных свойств (Матасова и др., 2000). В отложениях *провинции 4* высокие значения FD (>6%) в палеопочвах подтверждают «*китайский*» механизм записи климатического сигнала (Матасова, 2004). На всей остальной территории Сибирской формации (*провинции 2 и 3*) наблюдается суперпозиция двух механизмов: χ (и другие концентрационные параметры) ведет себя по «*алаяскинской*» модели, а FD - по «*китайской*». Такое наложение двух известных механизмов в лессово-почвенных сериях обнаружено впервые (Matasova et al., 2001), его предлагается назвать «*сибирским*» механизмом. *Провинцию 3*, где величины концентрационных

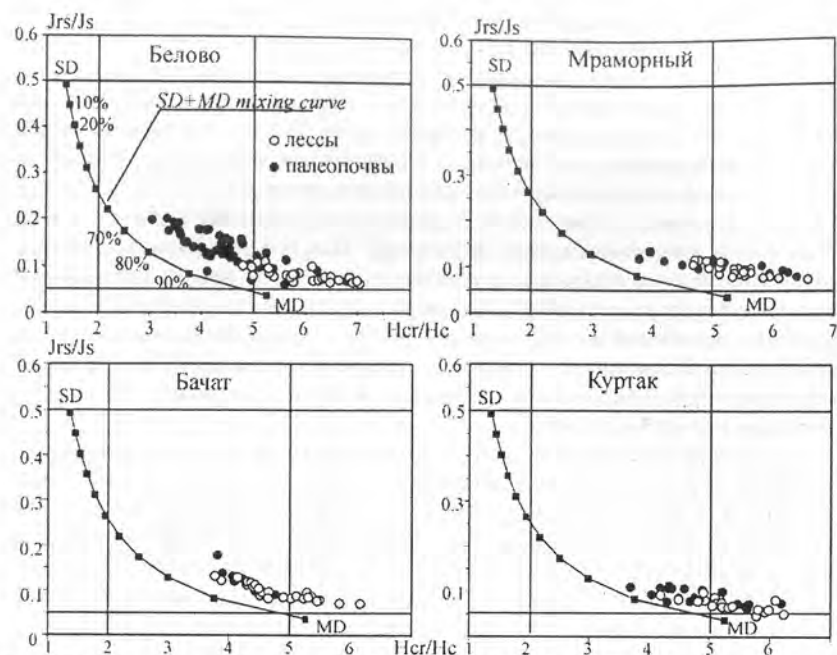


Рис. 3. Графики Дея (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) доменного состояния магнитных частиц в лессово-почвенных отложениях Сибири.

параметров невысоки, различие между лессами и палеопочвами слабое и средние значения FD-фактора (4-8%), можно считать территорией со слабым «сибирским» типом записи климатического сигнала. **Провинция 2** по значениям χ относится к сильной «сибирской» модели, а по FD-фактору разделяется на 2 подпровинции: с низким вкладом (FD~3-6%) и с высоким вкладом (FD>6%) педогенного фактора.

Кроме гистерезисных соотношений и FD-фактора, размер магнитного зерна оценивается по соотношениям χ/SIRM , χ/ARM и SIRM/ARM (Thompson, Oldfield, 1986; Dunlop, Ozdemir, 1997; Peters, Dekkers, 2003 и др.). Наиболее точные оценки размеров магнитных зерен они дают в случае мономинеральной магнитной фракции (Hilton, 1986; Большаков, 1996). В случае двух или более магнитных минералов можно получить приближенную оценку. Единообразный подход в измерениях дает возможность сравнивать эффективный размер магнитного зерна в отложениях различных частей формации. Повсеместно эти соотношения показывают уменьшение магнитного зерна в палеопочвах и увеличение его в лессовых толщах, а также тенденцию укрупнения магнитных зерен в более молодых отложениях (рис.4). Несмотря на сходный характер поведения χ/SIRM , χ/ARM и SIRM/ARM в отложениях одного и того же разреза, в деталях оно заметно

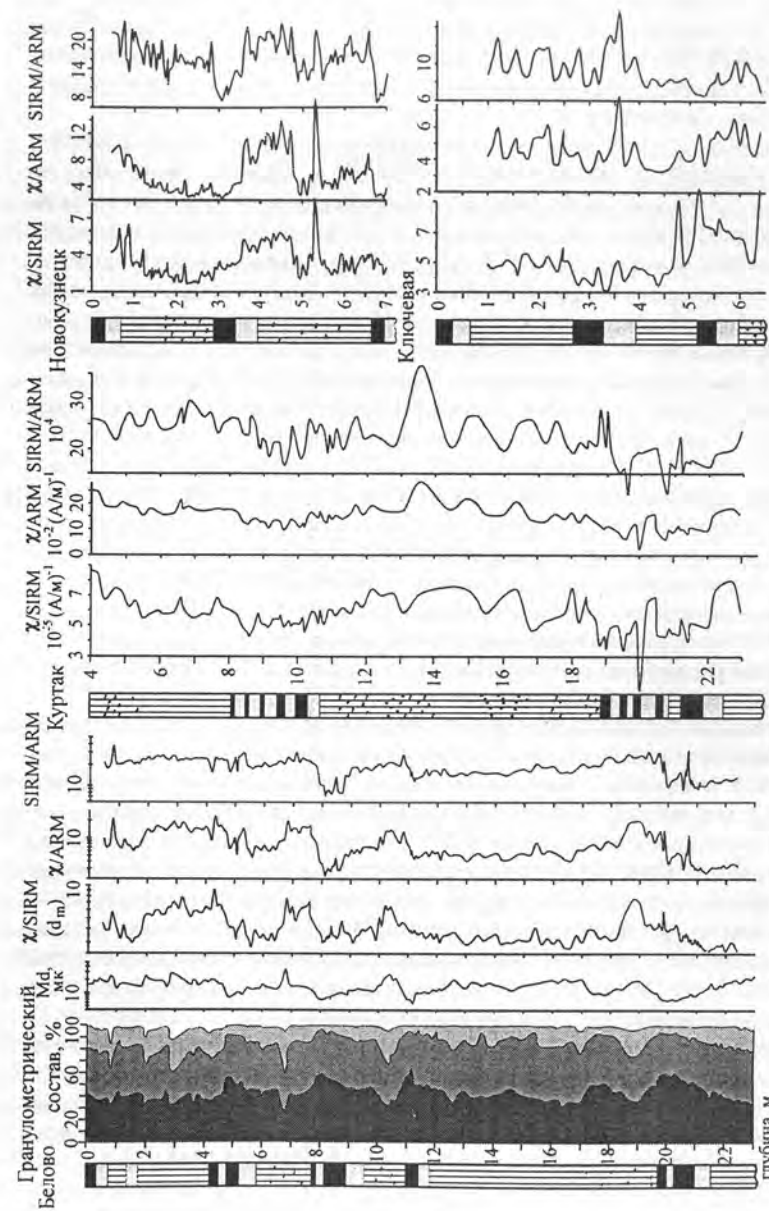


Рис. 4. Гранулометрический состав и магнитные структурно-чувствительные характеристики сибирских лессово-почвенных отложений.

различается, что объясняется различной чувствительностью используемых параметров к разным ансамблям магнитных зерен. Если преобладают крупные (МД) зерна, наиболее показательным является $\chi/SIRM$. При значительном количестве ОД-зерен лучше работает χ/ARM , существенная концентрация мелких ОД-зерен с размером, близким к области перехода ОД-СПМ, делает чувствительнее $SIRM/ARM$.

По величине структурно-чувствительных отношений $\chi/SIRM$, χ/ARM в лессовых горизонтах изученная часть Сибирской формации подразделяется на две области. Первая, относительно крупнозернистая, объединяет отложения *провинций* 1 и 2; вторая область отложений, с меньшими размерами магнитных зерен, включает *провинции* 3 и 4. В палеопочвах районирование по χ/ARM , $SIRM/ARM$ совпадает с лессовым. Анализ корреляционной связи между всеми соотношениями показал, что в большинстве разрезов (17 из 20) χ/ARM тесно связано с двумя другими отношениями, а $\chi/SIRM$ и $SIRM/ARM$ практически не связаны. Таким образом, в качестве универсального параметра для оценки эффективного размера магнитного зерна рекомендуется использовать отношение χ/ARM , для более детального изучения магнитной гранулометрии в лессовых толщах - $\chi/SIRM$, в палеопочвах - $SIRM/ARM$. Совместный анализ данных о ДС и размерах магнитных зерен приводит к выводу: в первой области в магнитной фракции лессов преобладают МД-зерна, скорее всего, терригенного происхождения, во второй - появляются ОД-частицы, свидетельствующие о слабой педогенной переработке лессовых отложений. В магнитной фракции палеопочв первой области имеется небольшое количество ОД-зерен, их больше в П2 (ОИС5); во второй области - средний размер ОД-зерен уменьшается, а их количество увеличивается, что указывает на интенсивный педогенез в этой части Сибирской субэвразийской формации.

Для выяснения связи между гранулометрическим составом, относительными размерами магнитных зерен и магнитными свойствами лессово-почвенных отложений проведены гранулометрические исследования с использованием лазерной дифракции. Связь большинства показателей гранулометрического состава сильнее с χ/ARM , чем с $\chi/SIRM$. Установлена сильная отрицательная корреляция $SIRM/ARM$ с содержанием глинистой фракции. Тесная положительная связь наблюдается у концентрационных магнитных параметров (χ , $SIRM$) с содержанием крупнозернистых фракций ($>50\mu\text{м}$), со средним размером обломочного зерна. У структурно-зависимых (FD , ARM) и связанных с составом параметров (S , Q) наблюдается менее сильная, но значимая корреляция с содержанием мелкозернистых фракций ($<10\mu\text{м}$, $<2\mu\text{м}$).

Анизотропия магнитной восприимчивости. Степень AMS в лессово-почвенных сериях Сибирской формации варьирует в широких пределах ($P' \sim 1.0 \div 1.13$). Лессовые горизонты отличаются от почвенных более высокими значениями P' и в большинстве своем имеют типичную осадочную плоскостную либо линейно-плоскостную текстуру (рис.5а). Палеопочвы делятся на две группы: 1) анизотропные, подобные лессам, это слаборазвитые, маломощные почвы; 2) изотропные, с хаотическим распределением осей эллипсоида AMS,

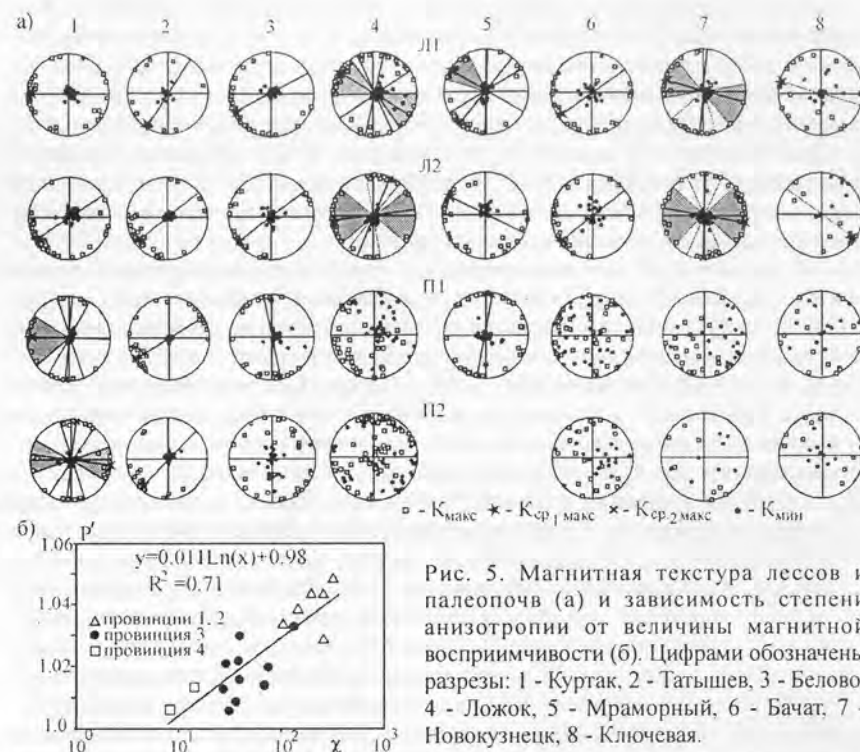


Рис. 5. Магнитная текстура лессов и палеопочв (а) и зависимость степени анизотропии от величины магнитной восприимчивости (б). Цифрами обозначены разрезы: 1 - Куртак, 2 - Татышев, 3 - Белово, 4 - Ложок, 5 - Мраморный, 6 - Бачат, 7 - Новокузнецк, 8 - Ключевая.

это развитые, хорошо дифференцированные, мощные почвы, образовавшиеся в процессе интенсивного педогенеза (Matasova et al. 2001). По AMS, как и по всем магнитным параметрам, в Сибирской формации выделяются отложения *провинции* 1: здесь как лессы, так и почвы сильноанизотропны, с ярко выраженной плоскостной текстурой. Меньшей степенью AMS обладают отложения *провинции* 2, лессы и палеопочва П1 среднеанизотропны, но палеопочва П2 магнитно изотропна, ее первичная магнитная текстура полностью разрушена. Лессы *провинции* 3 слабоанизотропны при сохранении осадочной текстуры. Все палеопочвы здесь магнитно изотропны. В *провинции* 4 лессовые толщи еще более слабоанизотропны, почти изотропны, все палеопочвы магнитно изотропны с нарушенной магнитной текстурой. Таким образом, в сибирских лессово-почвенных сериях степень AMS падает, а нарушения магнитной текстуры отложений нарастают от *провинции* 1 к *провинции* 4, и связаны с концентрацией магнитного материала в осадках (рис.5б). В большинстве лессовых толщ позднего плейстоцена прослеживается группирование максимальной оси эллипсоида AMS в 3 либо Ю-З направлении (Matasova, Kazansky, 2004).

Парамагнитные характеристики. При небольших концентрациях ферромагнетиков в породах существенный вклад в общие магнитные свойства могут вносить и парамагнетики (Rochette, 1987; Hroudá, Jelinek, 1990). В лессово-почвенных образованиях вклад парамагнитных минералов, а это, в основном, глинистые минералы, в начальную магнитную восприимчивость (χ_0), в общую намагниченность M_{MAX} , может достигать 80-90%, особенно в отложениях китайского типа (Florindo et al., 1999; Вирина и др., 2001), поэтому недоучет парамагнитного компонента может приводить к неверным оценкам ДС состояния магнитных зерен и их относительных размеров.

В **провинции 1** лессово-почвенные отложения характеризуются очень низкими значениями χ_{PAR} , в гумусовых горизонтах погребенных почв отношение $\chi_{\text{PAR}}/\chi_0 \sim 0.03 \div 0.06$, в лессовых толщах < 0.03 . Вклад парамагнитного компонента в полную намагниченность M_{MAX} в гумусовых горизонтах - до 30%, в лессовых - до 15% (Матасова, Казанский, 2005). Учитывая, что магнитными методами здесь установлено минимальное количество гематита, можно считать, что величина M_{PAR} главным образом обусловлена парамагнитными минералами. В **провинции 2** χ_{PAR}/χ_0 в гумусовых горизонтах палеопочв возрастает до 0.35-0.4, а в лессовых толщах не превышает 0.05, в редких случаях достигая 0.1. Вклад парамагнитной составляющей в полную намагниченность в палеопочвах может достигать 80-85%, в лессах до 40%. Поскольку здесь по магнитным параметрам фиксируется значительное количество гематита, особенно, в погребенных почвах, то, вероятно, величина M_{PAR} обусловлена намагниченностью гематита и парамагнитных минералов. Отложения **провинции 3** характеризуются значениями χ_{PAR}/χ_0 до 0.25 в почвах и до 0.1 в лессах. Вклад парамагнитной составляющей в величину M_{MAX} в палеопочвах до 70%, в лессах до 45%. Вероятно, здесь часть намагниченности M_{MAX} также обусловлена присутствием гематита. Вклад парамагнитных минералов (и гематита) в общие магнитные свойства отложений Сибирской формации меняется в соответствии с изменениями FD: чем выше FD и интенсивность педогенеза, тем выше вклад парамагнитных глинистых минералов.

Глава 4. Отражение смены условий осадконакопления в петромагнитных характеристиках лессово-почвенных отложений

Изменение магнитных свойств лессово-почвенных отложений в условиях переувлажнения. Постоянное или периодическое переувлажнение почв оказывает существенное влияние на ее магнитные свойства за счет химических превращений, обусловленных смещением окислительно-восстановительного потенциала в сторону восстановительных условий (Кауричев, Орлов, 1982). В результате происходит превращение магнитных минералов в слабомагнитные (немагнитные) и уменьшение χ , это явление характерно для современных гидроморфных почв (Бабанин и др., 1995; Maher, 1998; Hanesch, Scholger, 2005), а также установлено в оглееных погребенных почвах различных регионов (Rossenau, Kukla, 1994; Nawrocki et al, 1996, 1999; Evans, Heller, 2003).

Петромагнитные исследования автоморфной почвы, подвергавшейся длительному вторичному переувлажнению (Казанский и др., 2005), показали, что в этом случае идут те же процессы, что и при формировании гидроморфных почв, приводящие к уменьшению величин концентрационных магнитных характеристик во всех горизонтах оглеенной автоморфной почвы. В первую очередь уничтожаются мелкие СПМ и ОД зерна магнетита/маггемита педогенного происхождения, что выражается в уменьшении величин параметров FD и ARM, в увеличении магнитной жесткости. Параметры, характеризующие эффективный размер магнитного зерна, сохраняют распределение по профилю, близкое к распределению в ненарушенной почве, что позволяет по-прежнему дифференцировать генетические горизонты почвы. Таким образом, объяснение поведения петромагнитных параметров в лессово-почвенных сериях Сибири с помощью вторичных изменений ископаемых почв в результате процессов оглеения и вымывания (Разрез..., 1978; Evans, Heller, 2003) противоречит экспериментальным данным.

Смена механизма формирования магнитных свойств лессово-почвенных отложений при изменении климата. Ярким примером чувствительности магнитных характеристик к изменению условий осадконакопления является факт смены механизма формирования магнитных свойств лессово-почвенных отложений на территории одной провинции в течение четвертичного периода. В Средней Сибири в разрезе Государев Лог обнаружены лессово-почвенные отложения обратной полярности, возрастом древнее, по крайней мере, чем 800 тыс. л. (Казанский и др., 2006а). С учетом палеонтологических данных (Колямкин, Прошина, 2001), возраст этой толщи оценивается как плиоцен-эоплейстоценовый. Естественные магнитные свойства древних отложений значительно слабее, чем у средне-позднеплейстоценовых отложений Средней Сибири: χ древних лессовых толщ и палеопочв в 2.5-3 раза ниже, чем позднеплейстоценовых, NRM ниже в 4-6 раз. Величина ARM, наоборот, у древних отложений выше в 2 раза, чем у молодых. Параметр S указывает на большее относительное количество магнитожестких минералов в древних отложениях по сравнению с молодыми. Увеличение ARM при существенном уменьшении χ свидетельствует о значительном количестве аутигенных ОД зерен, а повышение значений FD до 5.5% фиксирует появление еще более мелких СПМ зерен. Терромагнитные исследования выявили по характерным деблокирующим температурам магнетит, маггемит и, в отличие от более молодых отложений, гематит. По соотношениям χ/SIRM , χ/ARM , SIRM/ARM древние отложения более мелкозернисты. Сравнительный анализ всех магнитных параметров приводит к выводу, что на территории Средней Сибири в эоплейстоцене магнитные свойства субаэральных отложений формировались по типу сильной «сибирской» модели со слабым вкладом «китайского» педогенного фактора. К позднему плейстоцену под влиянием более сурового климата механизм формирования магнитных свойств сменился на чистый «алаянский». Этот вывод согласуется с общей тенденцией похолодания климата в регионе к позднему плейстоцену (Кузьмин и др., 2001; Fedotov et al., 2004).

Суперпозиция ветрового и химического механизмов формирования магнитных свойств субэвралных отложений под воздействием техногенного загрязнения окружающей среды установлена по результатам изучения магнитных свойств современного почвенного покрова (Матасова и др., 2003). В качестве объекта была выбрана территория вокруг действующего хранилища отходов переработки первично немагнитных свинцово-цинковых руд Салаирского ГОКа (Кемеровская обл.). Верхний почвенный слой подвергается запылению немагнитными (слабомагнитными) «хвостами» ветровым путем (*ветровой механизм*), что приводит к ослаблению его природных магнитных свойств в результате магнитного разубоживания. С другой стороны, происходит смена основного минерала-носителя магнитных свойств с сильномагнитного ПОД магнетита, являющегося основным магнитным минералом гумусового слоя современной почвы природной среды, на слабомагнитный ОД и СПМ гематит (*химический механизм*), образующийся в результате окисления Fe_3O_4 до $\alpha-Fe_2O_3$ за счет H_2SO_4 , возникающей при разложении пирита, содержащегося в хвостах (Matasova et al., 2005). Это позволяет утверждать, что формирование магнитных свойств верхнего почвенного слоя при его загрязнении немагнитными отходами горнорудного производства происходит под действием тех же двух механизмов, что и при формировании лессово-почвенных серий.

Глава 5. Реконструкции природной среды и климата по петромагнитным данным

Уникальность объекта - два известных механизма формирования магнитных свойств отложений на территории Сибирской субэвралной формации и самостоятельный «сибирский» механизм. Петромагнитными исследованиями выявлена уникальность отложений Сибирской субэвралной формации по механизму фиксации палеоклиматического сигнала и изменений обстановок осадконакопления в магнитных свойствах лессово-почвенных серий, обусловленная двумя фактами.

1) На территории Сибири зафиксированы два известных и противоположных друг другу механизма магнитной записи изменений палеоклимата - «алаянский» и «китайский». Вероятно, такая большая амплитуда колебаний магнитных свойств лессово-почвенных серий объясняется следующими причинами: а) положением Сибирской формации в центре Азиатского континента; б) сильным влиянием Монголо-Сибирской ячейки высокого давления, находящейся в непосредственной близости к изучаемой территории Сибири (~50°с.ш., ~100°в.д.); в) расположением формации во внеледниковой зоне Сибири, но между двумя ледниковыми покровами: Новоземельско-Полярно-Уральским (северным), полупокровного, сетчатого и, чаще, горно-долинного характера (Зубаков, 1986; Mangerud et al., 1999; Астахов и др., 2000; Динамика..., 2002; Svendsen et al., 2004) и южными горно-долинными (Алтайскими, Саянскими) (Зубаков, 1986; Динамика..., 2002); г) существованием, в силу особенностей рельефа, замкнутых межгорных котловин со своим микроклиматом. «Аляскинская» модель в сибирских отложениях выражена гораздо сильнее «китайской», и по

величинам и поведению магнитных характеристик близка к существующей на Аляске в аналогичных отложениях. Распространение «чистой» ветровой модели в Сибири ограничено южной частью Средней Сибири. Слабая, но явная «китайская» модель обнаружена на западной окраине Сибирской формации в Барабинской низменности. Здесь, хотя осадки и слабомагнитны, но основные элементы «китайского» механизма (превышение χ палеопочв над χ лессов и высокие значения FD - до 8-9%) установлены.

2) В Сибири, на большей части изученной территории наблюдается суперпозиция двух известных механизмов, заключающаяся в изменении χ по «алаянскому» типу, а FD - по «китайскому» - «сибирский» механизм. Почему «сибирский тип» магнитной записи климатического сигнала предлагается считать самостоятельным механизмом?

Во-первых, такое наложение моделей не является принадлежностью только Сибирского региона, подобный «гибридный» сигнал зафиксирован в нижнеплейстоценовых-эоплейстоценовых лессово-почвенных отложениях Аргентины (Bidegain et al., 2005) и Северной Америки (Grimley et al., 2003). Авторы этих исследований считают, что назрела необходимость разработки новой магнитоклиматической модели, объясняющей сложную магнитную запись климатических событий. В качестве такой модели и предлагается «сибирская».

Во-вторых, области существования «чистых» моделей в Сибири имеют ограниченное распространение, гораздо большую территорию занимают лессово-почвенные образования, в которых зафиксирован смешанный тип магнитной фиксации палеоклиматических колебаний. Внутри этой территории возможно подразделение на сильную «сибирскую» с высоким вкладом «китайского» компонента, сильную «сибирскую» с низким вкладом «китайского» компонента и слабую «сибирскую» модели. Каждая из них характеризуется своим диапазоном изменения магнитных параметров, что позволило провести детальные палеоклиматические реконструкции, на качественном уровне совпадающие с палеоботаническими (реконструкции растительности) и палеопедологическими (реконструкциями почвенного покрова) (Динамика..., 2002) (рис. 6).

В-третьих, в основу «сибирской» модели предлагается поместить базовый параметр, отличный от двух известных механизмов. На основании сильной «сибирской» записи по параметрам χ и FD палеоклиматические реконструкции можно проводить с таким же успехом, как и в «китайской» или «алаянской» моделях, но в слабой «сибирской» модели использование χ и/или FD проблематично. Результаты наших исследований вместе с анализом литературных данных показали, что существует магнитный параметр, «работающий» в любых моделях (Матасова и др., 2002в). Независимо от палеоклиматических, ландшафтных, палеогеографических и других условий осадкообразования, независимо от постседиментационных преобразований в любых частях земного шара при всех известных механизмах формирования магнитных свойств (в том числе и слабой «сибирской» модели) в лессах размер магнитных частиц увеличивается, в палеопочвах уменьшается. Лессово-почвенные отложения китайского типа характеризуются самыми малыми размерами магнитных зерен, зерно укрупняется

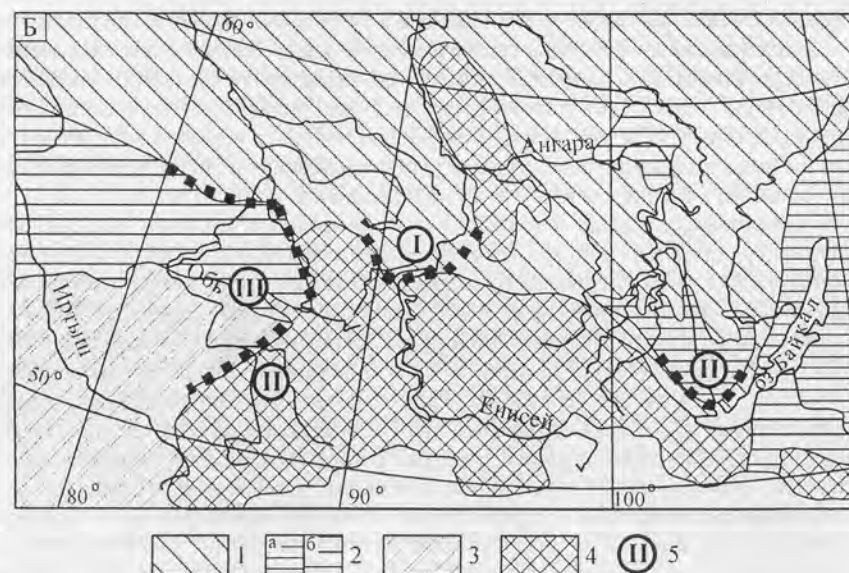
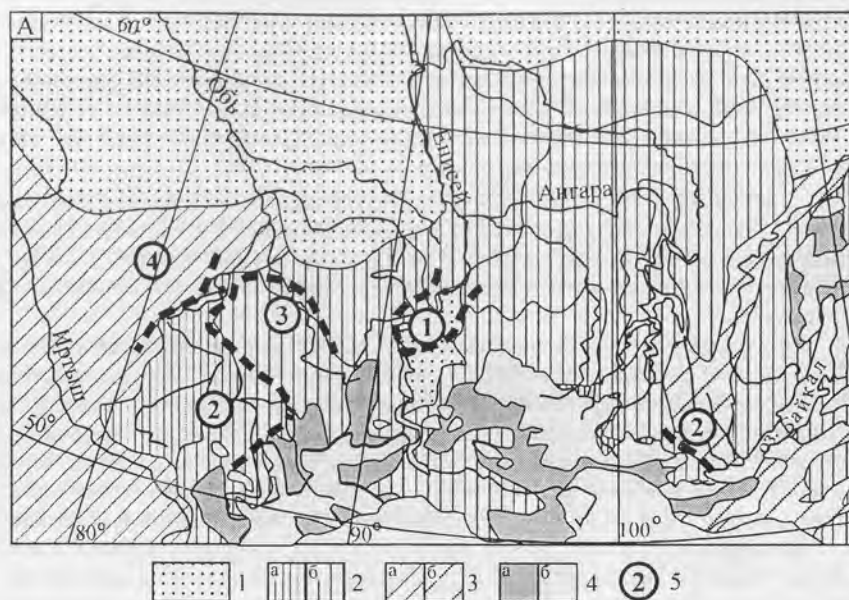


Рис. 6. Карты ландшафтных компонентов Центральной и Южной Сибири:
 А - карта растительности сартанской ледниковой эпохи (по Гричуку В.П. (Динамика..., 2002)). Условные обозначения: 1 - перигляционно-тундровый тип растительности: луговые степи в сочетании с кедрово-сосновыми лесами; 2 - бореальный тип растительности: а) сосново-березовые и сосновые остепненные леса, б) кедрово-еловые и еловые леса; 3 - степной тип растительности: а) полынно-разнотравные степи, б) разнотравно-злаковые степи в сочетании с березовыми и сосновыми лесами; 4 - высокогорная растительность: а) растительность тундрового характера, б) растительность при интенсивных горно-долинных оледенениях; 5 - провинции с различными типами магнитной записи палеоклиматического сигнала: 1 - «аляскинская» модель, 2 - сильная «сибирская», 3 - слабая «сибирская», 4 - «китайская» модель.

Б - карта почвенного покрова в климатический оптимум - подстадию 5е (по Величко А.А., Морозовой Т.Д., детализация для южной части Западной и Средней Сибири Зыкиной В.С., Воробьевой Г.А. (Динамика..., 2002)). Условные обозначения: 1 - бореальное почвообразование: дерновые (бурые) лесные в сочетании с другими лесными почвами: серыми лесными, дерново-подзолистыми; 2 - суббореальное почвообразование под лесостепной растительностью: а) черноземы в сочетании с серыми лесными и дерновыми (бурыми) лесными почвами, б) черноземы выщелочные; 3 - суббореальное почвообразование под степной растительностью: черноземы обыкновенные; 4 - горное почвообразование; 5 - провинции с различной интенсивностью почвообразования по магнитному показателю FD: I - $FD < 3\%$, II - $3 < FD < 6\%$, III - $FD > 6\%$.

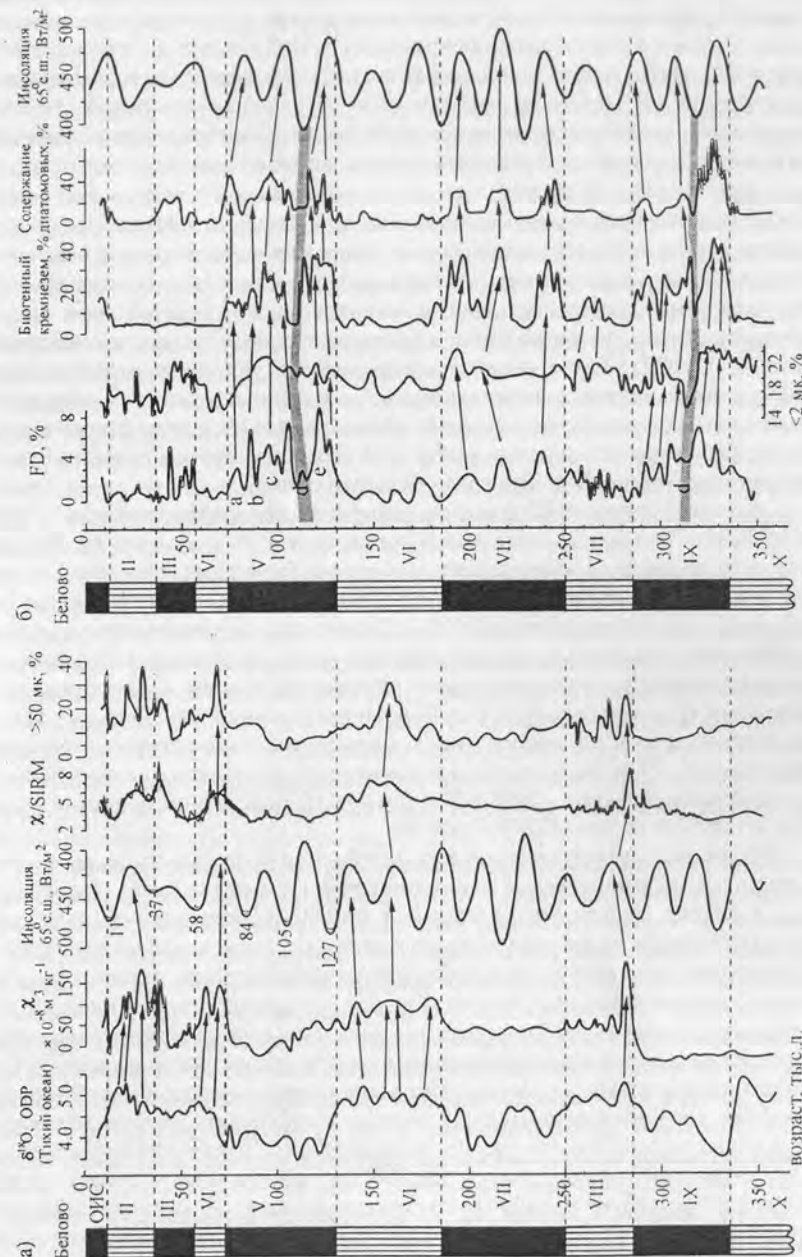
в отложениях, фиксирующих климатический сигнал по «сибирской», а затем по «аляскинской» моделям. Механизм, формирующий в лессах и палеопочвах ансамбль магнитных зерен по размерам, един для всех отложений этого типа на земном шаре, и его конкретное действие в конкретном месте обусловлено как глобальными климатическими колебаниями в масштабах планеты, так и местными локальными условиями, включающими палеогеографические, геоморфологические, геохимические и другие условия лессонакопления и почвообразования. Совокупность действующих факторов определяет преобладающие размеры частиц магнитных минералов, полуколичественные оценки которых могут быть получены из соотношений магнитных параметров $\chi/SIRM$, χ/ARM , $SIRM/ARM$. Отношение $\chi/SIRM$ адекватно отражает размеры магнитных зерен в «аляскинской» и сильных «сибирских» моделях, $SIRM/ARM$ - в слабой «сибирской» и «китайской» моделях. Отношение χ/ARM эффективно работает во всех отложениях с любыми размерами магнитных зерен, поскольку в крупнозернистых аляскинского типа осадках ARM изменяется как концентрационный параметр, а в мелкозернистых - как структурный. Эффективный размер магнитного зерна в лессово-почвенных отложениях, оцениваемый по χ/ARM , предлагается в качестве базового параметра для единой модели формирования магнитных свойств субэдральных отложений с целью реконструкции природной среды и палеоклиматических условий лессонакопления и почвообразования. Для построения единой модели требуется создание унифицированного банка данных магнитных свойств по всем лессово-

почвенным отложениям земного шара, поскольку на сегодняшний день литературные данные представляют собой разнородную, плохо поддающуюся систематизации информацию.

Сопоставление вариаций петромагнитных параметров с непрерывными климатическими летописями. Возможность палеоклиматических реконструкций по магнитным записям в лессово-почвенных последовательностях мира доказана корреляцией изменений χ с изменениями $\delta^{18}\text{O}$, инсоляции и другими индикаторами климатических колебаний (Heller, Evans, 1995; Chlachula et al., 1997; Fang et al., 1999; Lagroix, Banerjee, 2002 и др.). Используя дополнительно различные магнитные и гранулометрические параметры, можно существенно расширить возможности палеоклиматических реконструкций. Корреляционный анализ магнитных записей в континентальных лессово-почвенных отложениях, вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в океанических осадках и биогенных записей в донных отложениях оз. Байкал, признанных наиболее полными и высокоразрешающими записями изменения окружающей среды и климата для континентов Северного полушария (Кузьмин и др., 2001), показал, что магнитные и гранулометрические параметры распадаются на две группы, одна тесно связана с периодами похолоданий, другая с периодами потеплений (Казанский и др., 2006б). Первая группа - это концентрационно-зависимые магнитные параметры и показатели гранулометрического состава, связанные с крупнозернистыми фракциями; вторая - это структурно-чувствительные магнитные характеристики и показатели мелкозернистых фракций. Таким образом, если по магнитным записям в лессово-почвенных отложениях китайского типа можно детально реконструировать климат теплых эпох, а в отложениях аляскинского типа - климат ледниковый, то по изменениям магнитных характеристик сибирских отложений, сформировавшихся по «сибирскому» механизму, возможно и то и другое, и, кроме того, дополнительно фиксировать мелкие флуктуации климата (кратковременные похолодания на фоне общего потепления и наоборот) (рис. 7).

Изменение эффективных размеров магнитных зерен в лессах и почвах, как изменение интенсивности палеоветров и расстояния до источника сноса и как качественная оценка степени педогенеза. Установленные закономерности в изменениях относительных размеров магнитных зерен сводятся к: 1) уменьшению эффективного размера магнитного зерна в лессах и палеопочвах от провинции 1 к провинции 4 вместе с уменьшением

Рис. 7. Сравнение изменений магнитных и гранулометрических характеристик сибирских лессово-почвенных отложений с вариациями изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ в соответствующие возрастные интервалы (океанические стадии - ОИС) (Shackleton et al., 1990), кривой инсоляции (Laskar et al., 1993), с вариациями содержания биогенного кремнезема и диатомовых водорослей в донных осадках озера Байкал, скв. BDP 96-2 (Williams et al., 1997; Карабанов и др., 2001): а) магнитные и гранулометрические параметры, чутко реагирующие на изменение климата в периоды похолоданий; б) то же для периодов потеплений.



концентрации магнитных минералов и 2) уменьшению размера магнитного зерна в палеопочвах и увеличению в лессовых толщах. С учетом других данных (рельеф, обнаженность, сила и направление преобладающих ветров, сезонные водотоки, мощность отложений, состав магнитных минералов в горных породах, предполагаемых в качестве источника сноса) первая закономерность может использоваться для определения расстояния до областей сноса обломочного материала и изменения интенсивности ветров, приносящих продукты выветривания. С этой точки зрения, сильномагнитные отложения *провинции 1* и чуть менее магнитные отложения *провинции 2* сформировались при сильных ветрах и близких источниках сноса. Высокие концентрации магнитных минералов и близкие размеры магнитных зерен в лессовых отложениях Л1 и Л2 свидетельствуют о постоянстве ветрового режима, источников сноса и деятельности рек на протяжении холодных периодов позднего плейстоцена (ОИС4, ОИС2). Расстояние до источников эолового материала для слабомагнитных отложений *провинции 3* и, особенно, очень слабомагнитных *провинции 4* гораздо больше, чем для *провинций 1* и *2* и, судя по относительным размерам магнитных зерен и малой мощности отложений, дополнительные местные источники здесь не играли большой роли.

Сравнение значений FD-фактора, эффективного размера магнитных зерен в палеопочвах различных провинций показывает, что в позднем плейстоцене наибольшая интенсивность педогенных процессов в западной и юго-западной части формации отвечает теплой стадии ОИС5. Менее интенсивны были процессы почвообразования в ОИС3. Самым слабым педогенезом в позднем плейстоцене отличалась среднесибирская часть формации. Использование палеопедагогической реконструкции почвенного покрова в изученной части формации (Динамика..., 2002) дало возможность оценить значения FD для конкретных типов ископаемых почв: черноземы обыкновенные, черноземы выщелочные - $FD > 6\%$; черноземы выщелочные в сочетании с серыми лесными и дерновыми почвами - $3 < FD < 6\%$; дерновые, дерново-подзолистые, серые (бурые) лесные почвы - $FD < 3\%$ (рис. 6).

Отражение преимущественных направлений палеоветров, склоновых и педогенных процессов в магнитной текстуре отложений. Направления K_{max} в лессах группируются вокруг 3 или Ю-З направления, совпадая с преимущественным направлением палеоветров в регионе (Москвитин, 1940). В некоторых лессовых толщах наблюдается вторая группа, тяготеющая к С-З либо Ю направлению, указывая на вклад ветров других направлений (рис.5). В горизонтах палеопочв наблюдаются два вида магнитной текстуры: «лессовая» - плоскостная или линейно-плоскостная, унаследованная от материнских лессов, либо «педогенная» - хаотичная, без выраженной анизотропии. Последняя представляет собой результат педогенеза, в процессе которого образуются аутигенные мелкозернистые магнитные минералы с различной формой частиц и с хаотичным их расположением. Образование таких частиц нарушает первичную лессовую (материнскую) магнитную текстуру, чем интенсивнее этот процесс, тем более разрушена первичная текстура. Поэтому в палеопочвах

провинции 1 наблюдается лессовая, ненарушенная осадочная магнитная текстура с довольно высокой степенью анизотропии. В *провинции 2* магнитная текстура нарушается только в П2. В *провинции 3* все палеопочвы имеют педогенную изотропную текстуру, а в *провинции 4*, кроме того, даже лессовая текстура изменяется под воздействием педогенных процессов. Таким образом, степень нарушения магнитной текстуры лессово-почвенных отложений может служить качественной оценкой их педогенной переработки, и таким образом, фиксировать главный элемент «китайского» механизма формирования магнитных свойств отложений - интенсивность педогенеза. И наоборот, чем ярче проявлен «алаяский» механизм в магнитных свойствах лессов (чистая «алаянская», либо сильная «сибирская» модели), тем выше степень AMS, тем более явно выражена плоскостная магнитная текстура лессовых толщ, характерная для осадочных образований, тем определеннее группируются средние направления K_{max} вдоль направления палеоветров.

Направления K_{min} используются для оценки интенсивности склоновых процессов (Lagroix, Banerjee, 2004). В изученных сибирских отложениях отклонения среднего значения K_{min} не превышают 7° от вертикального направления, что свидетельствует о пологих углах склонов и незначительных деформациях отложений без нарушения осадочной текстуры в результате склоновых процессов. Поэтому смену среднего направления K_{max} при переходе от лессовых толщ к палеопочвам с лессовой текстурой (*провинции 1, 2*) следует рассматривать как изменение преобладающего направления ветра в регионе при переходе от похолодания к потеплению. Таким образом, определяющими причинами формирования магнитной осадочной плоскостной текстуры с преимущественными направлениями K_{max} являются: 1) стабильность и высокая интенсивность ветровой деятельности; 2) субгоризонтальная поверхность осадения обломочного и магнитного материала; 3) отсутствие интенсивных постседиментационных процессов, нарушающих первичную текстуру. Любые отклонения от типичной осадочной текстуры дают дополнительную палеогеографическую информацию.

Петромагнитная информация, дополняющая визуальные геологические наблюдения. Детальные магнитные записи палеоклиматических событий и изменения условий осадконакопления дают дополнительную к визуальным и геологическим данным информацию. С помощью петромагнитных исследований возможно выделение палеопочв, не обнаруженных при визуальном обследовании обнажений; подразделение на горизонты педокомплексов; идентификация лессовых горизонтов; выявление степени неоднородности лессовых толщ.

Выделение по магнитным свойствам позднелепистоценовой палеопочвы Л1п1 (14200 ± 150 л.н.), находящейся в лессовой толще Л1 (Алексеева, Волков, 1969, Фирсов, Орлова, 1971). Ее следы прослежены В.С.Зыкиной при геологическом описании разреза Заобской холмистой равнины (Зыкина и др., 1981). В остальных изученных разрезах Сибирской лессовой формации эта почва по геологическим данным на выявлена. Магнитные характеристики позволили проследить возможное присутствие Л1п1 почти на

всем протяжении Сибирской формации (рис.1). Выделение этой палеопочвы дает дополнительный маркирующий стратиграфический горизонт, уточняет скорости осадконакопления, разделяет вмещающую ее лессовую толщу на 2 горизонта и дополняет климатическую реконструкцию. Отсутствие же этой почвы свидетельствует о стратиграфическом перерыве.

Идентификация стратиграфических горизонтов по специфическим магнитным свойствам. В разрезе Белово верхняя часть лессовой толщи Л4 (ОИС8) обладает ярко выраженными переходными от лессов к палеопочвам магнитными характеристиками (рис.1), что свидетельствует об ее образовании в более мягких климатических условиях по сравнению с другими лессовыми горизонтами. Подобное поведение магнитных характеристик обнаружено в самых нижних горизонтах лессов на Заобской холмистой равнине, Северо-Кузнецкой равнине, в Новосибирском Приобье. Возможно, это явление обусловлено местными особенностями климата, но не исключено, что такое поведение магнитных характеристик связано с положительным пиком инсоляции во вторую половину ОИС8 и имеет общий характер для Северного полушария. Относительное потепление климата в это время отмечается, например, появлением биогенного кремнезема в осадках оз. Байкал. Одновозрастные лессовые горизонты КЛП и Аляски также характеризуются переходными значениями магнитных параметров. Таким образом, по величинам и специфическому поведению магнитных характеристик в лессовых толщах можно предположительно устанавливать их возраст. Кроме того, перспектива получения дополнительных маркирующих горизонтов очевидна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является авторская концепция, обобщающая, уточняющая и развивающая современные представления о процессах формирования магнитных свойств лессово-почвенных последовательностей Сибирской субэкральной формации, на основе которой предложена «сибирская» модель фиксации изменений природной среды и палеоклимата в магнитных свойствах субэкральных отложений, проявляющаяся на большей части изученной территории. Модель представляет собой суперпозицию двух известных типов магнитной записи палеоклиматического сигнала: а) «алаянского» - ветрового и б) «китайского» - педогенного. Магнитная восприимчивость изменяется в ней по «алаянскому» типу, а FD - по «китайскому». Такое поведение магнитных характеристик обнаружено впервые, т.е. впервые обнаружен переходный механизм формирования магнитных свойств лессово-почвенных серий, позволяющий связать два известных типа фиксации палеоклиматического сигнала в единую модель.

В качестве базового параметра в единой модели предложено использовать эффективный размер магнитного зерна, одинаковым образом изменяющийся при действии любого из механизмов формирования магнитных свойств лессово-почвенных отложений. Уменьшение эффективного размера магнитного зерна в

ископаемых почвах и его увеличение в лессовых толщах отражает глобальные изменения климата в Северном полушарии. Наложение двух механизмов объясняет все многообразие магнитных свойств лессово-почвенных отложений на территории Сибири, при этом «алаянский» и «китайский» механизмы оказываются крайними членами ряда. В случае «алаянского» механизма сводится практически к нулю действие «педогенного» фактора, в случае «китайского» - ветровой принос материала почти постоянен, а изменение магнитных свойств осадков определяется действием «педогенной» составляющей. Степень выраженности того или иного механизма в общей модели определяется местными палеоклиматическими и палеогеографическими условиями. На основе предложенной модели, с учетом выполненных автором петромагнитных исследований и анализа литературных данных, установлены следующие общие закономерности климатически обусловленного изменения магнитных свойств лессово-почвенных серий от «алаянского» механизма через «сибирский» к «китайскому»: 1) уменьшение размеров магнитных зерен, 2) увеличение количества аутигенных тонкодисперсных зерен педогенных магнитных минералов, 3) увеличение относительной концентрации высококоэрцитивных магнитных минералов, 4) возрастание роли парамагнитных (глинистых) минералов, 5) усиление химического выветривания по сравнению с физическим.

Закономерности изменения магнитных свойств в рамках одной модели от сильной до слабой обусловлены местными условиями осадконакопления и заключаются в 1) снижении концентрации магнитных минералов, 2) уменьшении различия в магнитных свойствах лессов и ископаемых почв, 3) уменьшении различий в составе магнитных минералов, 4) нарушении магнитной текстуры постседиментационными процессами.

Однако, многие вопросы еще требуют дальнейшего изучения. В первую очередь это касается получения петромагнитных данных в областях перехода между провинциями и регионами с различным типом записи климатического сигнала. В петромагнитном отношении эти области мало изучены, а такие данные чрезвычайно важны для усовершенствования и верификации авторской концепции. Не менее актуальным представляется комплексирование различных методов для повышения достоверности и разрешающей способности палеоклиматических реконструкций.

По мнению автора, Сибирский регион является ключевым для изучения изменений природной среды и климата внутриконтинентальной Азии по магнитным свойствам лессово-почвенных отложений, поскольку возможность «сибирской» модели шире и охватывают больший диапазон изменения магнитных свойств (а, значит, и диапазон климатических изменений), чем в двух других известных моделях. Одно из направлений развития палеоклиматических реконструкций на основе изучения магнитных характеристик лессово-почвенных серий автор видит в создании банка петромагнитных данных, полученных по единой методике, по всем регионам земного шара. Полученные в работе результаты иллюстрируют эффективность такого подхода для решения палеоклиматических и палеогеографических задач.

Публикации по теме диссертации

1. Поспелова Г.А., Куликова Л.С., **Матасова Г.Г.**, Геоманнитные вариации, зафиксированные в позднеголоценовых отложениях реки Бердь // Проблемы изучения палеогеографических вариаций магнитного поля Земли. - Владивосток, 1979. - С. 82-98.
2. Казанский А.Ю., Зыкина В.С., **Матасова Г.Г.**, Метелкин Д.В. Петромагнетизм лессово-почвенных разрезов позднего плейстоцена, как возможный метод реконструкции среды обитания древнего человека (на примере Бачатского разреза, Кузнецкая котловина) // Палеоэкология плейстоцена и культуры каменного века Северной Азии и сопредельных территорий. Т. 1. - Новосибирск: ИАЭ СО РАН, 1998 а. - С. 199-208.
3. Казанский А.Ю., Кравчинский В.А., Зыкина В.С., **Матасова Г.Г.**, Метелкин Д.В. Возможности магнитных методов для выявления климатического сигнала в лессово-почвенных разрезах Сибири // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. - Новосибирск: ИАЭ СО РАН, 1998 б. - С. 191-202.
4. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Петромагнитные характеристики опорного лессово-почвенного разреза Куртак (Средняя Сибирь) и их значение для палеоклиматических реконструкций // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. Вып. 2. - Новосибирск: ИАЭ СО РАН, 2000. - С. 313-331.
5. **Matasova G.**, Kazansky A., Jordanova N., Petrovsky E. Significance of magnetic anisotropy in studies of sedimentary environments of late Pleistocene loess/paleosol sequences in Siberia // Geophysical Research Abstracts, Vol. 2, Palaeo, Rock, Environmental Magnetism, 2000. - P. 216.
6. Zhu R.X., Guo B., Ding Z.L., Guo Z.T., Kazansky A., **Matasova G.** Gauss-Matuyama polarity transition obtained from a loess section at Weinan, North-Central China // Chinese J. of Geophysics (Acta Geophysica Sinica). - 2000 а. - Vol. 43, N 5. - P. 621-634.
7. Zhu Rixiang, Kazansky A., **Matasova G.**, Guo Bin, Zykina V., Petrovsky E., Jordanova N. Rock-magnetic investigation of Siberia loess and its implication // Chinese Science Bulletin. - 2000 б. - Vol. 45, N 23. - P. 2192-2197.
8. **Matasova G.**, Petrovsky E., Jordanova N., Zykina V., Kapicka A. Magnetic study of Late Pleistocene loess/paleosol sections from Siberia: palaeoenvironmental implications // Geophysical J. International, 2001.- Vol.147, N 2. - P. 367-380
9. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С., Чиркин К.С. Реконструкция древней природной среды и палеоклимата магнитными методами на археологических памятниках Средней Западной Сибири // Археология, этнография и антропология Евразии. - 2001. - № 3(7). - С. 2-16.
10. **Матасова Г.Г.** Магнитные свойства лессово-почвенных отложений Западной и Средней Сибири как индикатор палеоклиматических колебаний // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков: Материалы Всероссийской научной конф., посвященной 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований, 1-4 октября 2002 г. Иркутск: ИЗК СО РАН. - Иркутск, 2002. - С. 516-517.
11. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Бортникова С.Б. Петромагнитные исследования окружающей среды, загрязненной отходами горнорудного предприятия (г.Салаир, Западная Сибирь) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы семинара. Борок 19-22 октября 2002 г. - М: ГЕОС, 2002 а. - С. 56-58.

12. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Палеоклиматический сигнал в магнитных свойствах лессово-почвенных отложений Западной и Средней Сибири // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы семинара. Борок 19-22 октября 2002 г. - М: ГЕОС, 2002 б. - С. 55-56.
13. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Размер магнитного зерна в лессово-почвенных отложениях разреза Новокузнецкий (Кузнецкая котловина) как индикатор климатических колебаний // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Вып. 1. - Новосибирск: ИАЭ СО РАН, 2002 в. - С. 323-337.
14. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Бортникова С.Б. Оценка загрязнения окружающей среды отходами горнорудного производства по результатам петромагнитных исследований (Салаирский ГОК, Кемеровская область) // Вестник ТГУ. Сер. Науки о Земле (геология, география, метеорология, геодезия). Приложение: Мат. науч. конф., симп., школ, проводимых в ТГУ. - Томск, 2003 а. - № 3 (V). - С. 179-181.
15. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Гранулометрический состав и магнитные свойства позднелепесточных субаэриальных отложений Западной Сибири как отражение климатических колебаний (на примере опорного разреза Белово) // Вестник Томского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле (геология, география, метеорология, геодезия). Приложение: Мат. науч. конф., симп., школ, проводимых в ТГУ. - Томск, 2003 б. - № 3 (I). - С. 112-115.
16. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Наложение "аласкинской" и "китайской" моделей записи палеоклимата в магнитных свойствах отложений верхнего и среднего плейстоцена на юге Западной Сибири // Геол. и геофиз. - 2003 в. - Т. 44, № 7. - С. 638-651.
17. Kazansky A.Y., **Matasova G.G.**, Zykina V.S. Paleoclimatic proxy data in magnetic properties of the Siberian loess-soil series: comparison with the Chinese Loess Plateau, Alaska and sediments of Lake Baikal // Berliner Palaobiologische Abhandlungen. Environmental Change in Central Asia: International Symposium, Freie Universitaet Berlin, Germany, March 10-15, 2003: Abstracts. - Berlin, 2003. - С. 53-55.
18. Zhu R.X., **Matasova G.**, Kazansky A., Zykina V., Sun J.M. Rock magnetic record of the last glacial-interglacial cycle from the Kurtak loess section, southern Siberia // Geophys. J. International. - 2003. - Vol. 152, N 2. - P. 335-343.
19. **Матасова Г.Г.** Магнитные свойства лессово-почвенных отложений сибирской субаэриальной формации // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика и эксперимент: Материалы международного семинара. Казань, 3-7 ноября 2004 г. - Казань: Изд-во КГУ, 2004. - С. 306-311.
20. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Анизотропия магнитной восприимчивости лессово-почвенных отложений (на примере опорного разреза Белово, Западная Сибирь) // Физика Земли. - 2004. - № 2. - С. 50-65.
21. Fedotov A., Kazansky A., Tomurhuu D., **Matasova G.**, Ziborova G., Zheleznyakova T., Vorobyova S., Phedorin M., Goldberg E., Oyunchimeg T., Narantsetseg T., Vologina E., Yuldashev A., Kalugin I., Tomurtogoo O., Grachev M. A 1-Myr Record of Paleoclimates from Lake Khubsugul, Mongolia // Eos, Transactions, American Geophysical Union. - 2004. - Vol. 85, N 40. - P. 387-390.
22. **Matasova G.G.**, Kazansky A.Yu. Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/paleosol deposits along west-central Siberian transect and their

palaeoclimatic implications. Глава в монографию: Martin Hernandez F., Lьеburg C.M., Aubourg C., Jackson M. (eds) *Magnetic Fabric: Methods and Applications*. Chapter 12. Geological Society, London, Special Publications, 2004. - Vol. 238. - P. 145-173.

23. Казанский А.Ю., Бобров В.В., Кривоногов С.К., Молодин В.А., **Матасова Г.Г.**, Чемякина М.А. Оценка влияния хозяйственной деятельности древнего человека на природную среду по изменению естественных магнитных свойств (на примере Венгеровского археологического района Новосибирской области) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий (Материалы Годовой сессии Института археологии и этнографии СО РАН 2005г.). - Новосибирск: Изд-во ИАЭ СО РАН, 2005. - Т. XI, часть I. - С. 313-317.

24. **Матасова Г.Г.**, Казанский А.Ю. Вклад парамагнитных минералов в магнитные свойства лессово-почвенных отложений Сибири (палеоклиматический аспект) // Физика Земли. - 2005. - № 9. - С. 81-89.

25. Kazansky A., **Matasova G.** Variations in Loess and Palaeosol Magnetic Properties as Indicators of Palaeoclimatic Gradients in West- Central Siberia // Third International Conference Environmental Change in Central Asia. May 23rd till 27th, 2005, Ulaanbaatar, Mongolia: Extended Abstracts. *Geographica Oekologica Journal of MOLARE Research Centre*. - 2005. - Vol. 3. - P. 53-57.

26. Kazansky A.Y., **Matasova G.G.**, Zhdanova A.I. Siberian Subaerial Realm - the Natural Magnetic Archive of Paleoclimatic Fluctuations in Central Asia // Regularities of the Structure and Evolution of Geospheres: Proceedings of VII International Interdisciplinary Scientific Symposium and International Geoscience Programme (IGCP-476). - Vladivostok, 2005. - P. 410-411.

27. **Matasova G.G.**; Kazansky A.Y.; Bortnikova S.B.; Airijants A.A. The use of magnetic methods in an environmental study of areas polluted with non-magnetic wastes of the mining in industry (Salair region, Western Siberia, Russia) // *Geochem: Exploration Environment., Analysis*. - 2005. - Vol. 5. - P. 75-89.

28. **Матасова Г.Г.** Казанский А.Ю. Бортникова С.Б. Айриянц А.А. Магнитные свойства осадков при техногенном загрязнении отходами горнорудного производства (Салаирский ГОК, Кемеровская обл.) // *Геоэкология*. - 2006. - № 1. - С. 33-44.

29. Казанский А.Ю., **Матасова Г.Г.**, Козьмин Д.Г., Колямкин В.М., Шаталина Т.А. Петромагнитные характеристики опорного разреза Государев Лог (г. Красноярск) и их климатическая интерпретация // Исследование магнитных свойств горных пород. Сборник научных трудов памяти Л. Е. Шолпо. - Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 2006 а. - С. 48-55.

30. Казанский А.Ю., Рященко Т.Г., **Матасова Г.Г.**, Акулова В.В., Ухова Н.Н. Петромагнетизм субаэриальных отложений Прибайкалья (опорный разрез у п. Новоразводная, р-н г.Иркутска) // *Геофизический журнал*. - 2006 б. - Т. 28. - № 5. - С. 335-343.

31. Kazanskiy A., **Matasova G.** Magnetism of Siberian loess sediments as a tool for recognition of Late Pleistocene // *Environmental Changes and Earth Surface Process in Semi-Arid and Temperate Areas*. Abstracts of Joint International Symposium Ulaanbaatar, Урлах Эрдем, 2006. - P. 30-32.

Технический редактор О.М.Вараксина

подписано к печати 16.08.06

Формат 60×84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная
Печ. л. 2.1. Тираж 120. Зак. №208.

НП АИ «Гео». 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3