

УДК 551.89(571.1)

ПЕТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ЛЁССОВО-ПОЧВЕННЫХ СЕРИЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ[#]

© 2024 г. А. Ю. Казанский^{1,2*}, Г. Г. Матасова^{2,3}, А. А. Щетников^{2,3,4}, И. А. Филинов^{2,3,4}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

² Геологический институт РАН, Москва, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

⁴ Институт геохимии имени А. П. Виноградова, СО РАН, Иркутск, Россия

* E-mail: kazansky_alex@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

Петромагнитные методы дополняют визуальные геологические и гранулометрические исследования субаэральных комплексов, позволяя решать актуальные и интересные с точки зрения палеогеографии задачи. Магнитные характеристики, выражаемые числом, дают обоснованную базу для корректного сравнения субаэральных отложений между собой, для более детального расчленения осадков и уточнения их генезиса, для выявления маркирующих горизонтов, для корреляционного анализа данных различных методов. В работе обсуждаются основные механизмы формирования магнитных свойств лёссово-почвенных серий в различных регионах (“китайский” и “алеский”) и особенности в интерпретации петромагнитных параметров в рамках различных механизмов. Анализируется палеоклиматическая информативность петромагнитных параметров в различных физико-географических обстановках. Показаны различия в формировании магнитных свойств лёссово-почвенных серий Сибири (“сибирский” механизм) и представлены принципы палеоклиматической интерпретации петромагнитных данных на основе исследования более 40 разрезов субаэральных комплексов юга Западной, Средней и Восточной Сибири. На примере разрезов субаэральных отложений Восточной Сибири на основе изменения петромагнитных параметров выявлен тренд климатических изменений в течение квартала, отражающийся в смене “педогенного” механизма на “сибирский” и далее на “алеский”. Наличие такого тренда может служить критерием для диагностики субаэральных отложений эоплейстоценового возраста.

Ключевые слова: субаэральные отложения, магнитные свойства, частотно-зависимая магнитная восприимчивость, размер магнитного зерна, палеоклиматическая интерпретация, Байкальский регион

DOI: 10.31857/S2949178924020036, EDN: POGZIG

1. ВВЕДЕНИЕ

Главной особенностью геологической истории в четвертичное время является смена в планетарном масштабе климатических периодов крупных похолоданий и потеплений, связанных, по мнению большинства исследователей, с изменением орбитальных параметров Земли (Milanković 1930; Martinson et al., 1987; Berger, 1988; Beget, Hawkins, 1989; Shackleton et al., 1990; Ding et al., 2002 и дру-

гие). Среди континентальных отложений наиболее полные записи периодических изменений климата содержат лёссово-почвенные последовательности, которые являются частью более широко распространенных отложений субаэральной формации. Для реконструкции палеоклимата в субаэральных отложениях изучаются особенности строения ископаемых педокомплексов (цвет, строение, микро- и макроморфология почв, минералогический и гранулометрический состав, состав глинистых минералов, состав гумуса и т. п.). Во вмещающих супесчаных и лёссовых толщах исследуются тектурные, минералогические, геохимические, гранулометрические особенности, вариации скорости осадконакопления, используются палеоботанические, палеонтологические и археологические

[#] Ссылка для цитирования: Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Щетников А.А., Филинов И.А. (2024). Петромагнитные методы в изучении лёссово-почвенных серий Восточной Сибири. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 2. С. 63–85. <https://doi.org/10.31857/S2949178924020036>; <https://elibrary.ru/POGZIG>

свидетельства изменения климата и природной среды.

С 80-х годов прошлого столетия в палеоклиматических реконструкциях стали широко использоваться магнитные свойства субаэральные отложений. Этому способствовало два научных открытия. Во-первых, была установлена значимая дифференциация магнитных свойств компонентов субаэральные толщ и, следовательно, изменения магнитных параметров в большинстве случаев отражали строение разрезов субаэральная формации. Во-вторых, вариации магнитных характеристик, в частности, магнитной восприимчивости (МВ) отложений Китайского Лёссового Плато (КЛП) показали сильную корреляционную связь с климатически зависимым отношением легкого и тяжелого изотопов кислорода δO^{18} в бентосных фораминиферах океанических донных осадков соответствующих временных интервалов (Heller, Liu, 1984; Kukla et al., 1988; Maher, Taylor, 1988; An et al., 1991; Maher, Thompson, 1991; Liu et al., 1993; Hunt et al., 1995; Meng et al., 1997 и др.). Целью данной работы является установление закономерностей изменения магнитных характеристик субаэральные отложений Восточной Сибири и связи их с изменениями природной среды и климата.

2. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Существуют два общепризнанных механизма магнитной фиксации палеоклиматического сигнала, установленные в различных регионах мира и принципиально отличающиеся по своему проявлению в осадках и климатической интерпретации магнитных характеристик.

В лёссово-почвенных сериях Китайского лёссового плато магнитная восприимчивость в горизонтах ископаемых почв, в среднем, в 3—4 раза больше по сравнению с лёссовыми толщами, что объясняется образованием аутигенных тонкозернистых магнитных минералов, в основном, магнетита и маггемита с размерами зерен 0.001—0.5 мкм (суперпарамагнитных и мелких однодоменных частиц) в результате интенсивного педогенеза (Maher, Taylor, 1988; Maher, Thompson, 1991; Hus, Han, 1992; Banerjee et al., 1993; Evans, Heller, 1994; Rolph et al., 1989; Meng et al., 1997; Sun et al., 2000 и другие) при высоких тепло- и влагообеспеченности в теплые межледниковые интервалы. Новообразование этих минералов подтверждается и повышенными значениями частотно-зависимого FD-фактора, представляющего собой отношение

разницы значений магнитной восприимчивости, измеренной на низкой и высокой частоте переменного поля к величине низкочастотной восприимчивости, выраженное в процентах. Согласно (Dearing et al., 1996), значения $FD < 3\%$ свидетельствуют о преобладании частотно-независимых однодоменных и многодоменных терригенных магнитных частиц, а $FD > 3\%$ отражают присутствие суперпарамагнитных зерен педогенного происхождения. Поведение двух типов магнитной восприимчивости лежит в основе определения механизма фиксации климатических колебаний в магнитных свойствах субаэральные отложений. Одновременное повышение МВ и FD в палеопочвах характерно для лёссово-почвенных последовательностей китайского типа и представляет собой “китайский” или “педогенный” тип магнитной записи палеоклиматического сигнала. Второе название точнее отражает суть явления. Кроме Китайского лёссового плато такой тип регистрации колебаний климата распространен в большинстве европейских (Forster et al., 1996), среднеазиатских (Ding et al., 2002), африканских (Dearing et al., 1996) лёссово-почвенных отложениях. В зависимости от географического положения и геоморфологической позиции педогенный механизм имеет свои особенности и степень выраженности (табл. 1).

В субаэральные отложениях Аляски установлен другой, прямо противоположный, механизм фиксации палеоклиматического сигнала. Здесь в ископаемых почвах фиксируются низкие значения МВ, в 3—6 раз ниже, чем во вмещающих отложениях (Veget et al., 1990). При этом FD колеблется от 0 до 2 % во всех отложениях независимо от литологии (Vlag et al., 1999). Такое повышение МВ в лёссовых толщах объясняется интенсивной деятельностью ветра в холодные и сухие периоды, приносящего большое количество терригенных магнитных минералов в составе обломочного материала. В периоды потеплений недостаток тепла и влаги не способствовал интенсивному педогенезу, в результате чего FD фиксирует отсутствие (либо очень малое количество) педогенных магнитных минералов. Этот механизм палеоклиматической записи назван “алюскинским” или “ветровым” и встречается, кроме Аляски, во внутриконтинентальных лёссах Северной Америки (Hayward, Lowell, 1993) и Средней Сибири (Chlachula et al., 1997, 1998; Matasova, Kazansky, 2004). Ветровой механизм варьирует по значениям и соотношению магнитных характеристик в зависимости от географического положения, но его распространенность

Таблица 1. Диапазоны изменений магнитной восприимчивости и ее частотной зависимости в различных регионах мира**Table 1.** Ranges of variation of magnetic susceptibility and its frequency dependence in different regions of the world

Регион, <i>разрез</i>	МВ·10 ⁻⁸ м ³ кг ⁻¹		FD, %		Источник
	Лёссы	Почвы	Лёссы	Почвы	
ПЕДОГЕННЫЙ МЕХАНИЗМ					
Китайское лёссовое плато					
<i>Jiaodao</i>	20—60	200—300	3—5	9—12	Vidic et al., 2000 Deng et al., 2004
<i>Pucheng</i>	10—30	60—70	0—5	5—8	Sun, Liu, 2000
<i>Caijiagou</i>					
<i>Shimao</i>					
<i>Xifeng</i>	50—80	100—250	1—7	8—12	Liu et al., 1992 Hao, Guo, 2005
<i>Changwu</i>	40—50	100—200			
<i>Wienan</i>	20—50	200—400			
<i>Lanzhou</i>	20—30	50—60	2—8	8—9	Feng et al., 2004
<i>Dingxi</i>	25—30	80—100	2—5	10—12	
<i>Qinan</i>	20—50	60—80	4—5	9—11	
<i>Tianshui</i>	25—50	60—75	2—5	10—12	
<i>Lantian</i>	100—150	250—300	1—12	13—15	
<i>Xunyi</i>	80—100	200—220	10—11	14	
<i>Qingyang</i>	30—50	140—150	5—6	12.5	
<i>Huanxian</i>	20—25	80—110	5	9—11	
<i>Тунис</i>	5—10	30—60	4—7	9—11	Dearing et al., 1996
Северное Приазовье					
<i>Беглица</i>	20—30	40—50	0—7	10—15	Chen et al., 2022
<i>Чумбур-коса</i>	10—15	25—30			
Румыния					
<i>Costinesti</i>	20—50	100—150	2—5	11—13	Necula et al., 2015
<i>Mircea Voda</i>	20—30	50—120			
Северная Сербия					
<i>Zeman</i>	20—30	120—140	2—4	10—11	Laag et al., 2021
Венгрия					
<i>Bodrogkeresztúr</i>	30—35	60—70	6—7	9—10	Bosken et al., 2019
Иран					
<i>Toshan</i>	20—25	40—80	2—5	6—9	Vlaminck et al., 2018
ВЕТРОВОЙ МЕХАНИЗМ					
Аляска					
<i>Gold Hill Steps</i>	100—250	20—100	0—1	0—2	Vlag et al., 1999
Средняя Сибирь					
<i>Куртак</i>	300—450	50—100	<1	1.5—3.5	Chlachula et al., 1998
Аргентина					
<i>Las Carreras</i>	220—260	160—220	0—4	3—7	Schellenberger et al., 2003
<i>El Cristo</i>	50—120	20—120	1—4	1—5.5	Bidegain et al., 2005

меньше, чем педогенного (табл. 1). В специфических условиях некоторых (гидроморфных, полугидроморфных, криогидроморфных) типов почв, например, оглеенных тундровых почв, уменьшение МВ объясняется растворением магнитных минералов в переменных окислительно-восстановительных условиях, и вариации изменения МВ в почвах и вмещающих толщах происходят согласно “ветровому” механизму, но имеют другую природу (Taylor, et al. 2014).

С нашей точки зрения, модель магнитной фиксации палеоклиматических колебаний в субаэральные континентальных отложениях одна, и заключается она в различии магнитных свойств компонентов субаэральных формаций, которые сформировались под воздействием многих факторов, косвенно и напрямую связанных с климатом. Это фундаментальное свойство четвертичных субаэральных осадочных образований, которое имеет глобальный характер. На формирование магнитных свойств осадков существенное влияние оказывают также локальные условия накопления осадков: состав пород в области сноса, расстояние от источника материала, способ и условия по пути транспортировки материала, геоморфологическое положение и природные условия в области осаднения, постседиментационные преобразования. Два рассмотренных механизма являются крайними точками этой модели. Их особенности и закономерности описаны в многочисленных научных исследованиях. Но, к сожалению, в подавляющем большинстве опубликованных работ исследователи ограничиваются анализом вариаций МВ, реже приводятся данные о частотно-зависимой МВ и FD-факторе, а сведения о других петромагнитных параметрах (например, различных видах намагниченности, коэрцитивных характеристиках, магнитной жесткости, эффективном размере магнитного зерна) совсем немногочисленны и не систематизированы.

При определенных условиях эффект наложения локальных факторов может маскировать глобальный характер магнитной записи климатического сигнала. В таких случаях компоненты субаэральных толщ демонстрируют магнитные свойства, которые нельзя отнести ни к “аласкинскому”, ни к “китайскому” типу. Изменения петромагнитных характеристик в таких случаях не отражают литологию разреза: как вмещающие горизонты, так и ископаемые почвы характеризуются и повышенными, и пониженными значениями МВ и FD. К такому типу с отсутствием закономерностей в изменениях магнитных параметров относятся отдельные лёссово-почвенные

последовательности Польши (Nawrocki, 1992), Западной Украины (Nawrocki et al., 1996), Аргентины (Bidegain et al., 2005), Пакистана (Akram, Yoshida, 1997), Нижней Волги (Költringer et al., 2021) (табл. 1.). Наш опыт показывает, что в каждом сложном случае детальное исследование субаэральных толщ требует привлечение дополнительных методов (гранулометрических, геохимических, палеонтологических и т. п.) изучения осадков, что, как правило, проясняет картину и дает возможность с уверенностью диагностировать изменения природной среды и климата в данном регионе.

Основные магнитные характеристики (МВ и FD) палеопочв и вмещающих отложений для обоих механизмов отражены в табл. 1.

По данным В. Maher (2011) только за 20 лет (1990—2010 гг.) опубликовано более 2000 работ с результатами палеомагнитного и петромагнитного изучения лёссовых толщ. В табл. 1 приведены лишь некоторые примеры значений МВ и FD субаэральных осадков, в которых зафиксирована различная магнитная климатическая запись. Для демонстрации различий в таблицу включены результаты исследований лёссово-почвенных серий всех континентов (за исключением Австралии и Антарктиды). Наиболее многочисленны исследования лёссово-почвенных серий Китая и Европы, на эти исследования приходится ~80 % всех публикаций. Гораздо слабее изучен магнетизм субаэральных отложений Северной и Южной Америк, Африки и других регионов Азии, кроме КЛП. И уж совсем единичны работы на территории Западной, Средней и Восточной Сибири, охватывающей Сибирскую Субаэральную Формацию (Волков, 1971). Этот факт объясняется тремя основными причинами: 1) труднодоступностью; 2) сложным строением, комплексным генезисом, разнообразием основных компонентов субаэральных толщ; 3) сложной, неоднозначной, трудно интерпретируемой картиной поведения магнитных параметров, иногда требующей дополнительных исследований.

3. “СИБИРСКИЙ” МЕХАНИЗМ ЗАПИСИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАЛЕОКЛИМАТА В МАГНИТНЫХ СВОЙСТВАХ СУБАЭРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ И СРЕДНЕЙ СИБИРИ

В западной части Сибирской субаэральной формации (Западная, Юго-Западная Сибирь) МВ ископаемых почв существенно ниже (в 2—6 раз), чем во вмещающих лёссовых, песчаных и делюви-

альных толщах. При этом колебания FD в палеопочвах составляют от 0 до 10 %, а в лёссовых толщах FD — от 0 до 4 % (Казанский и др., 1998, Zhu et al., 2000, Matasova et al., 2001, Matasova, Kazansky, 2004), т.е. изменение магнитной восприимчивости происходит по “алюскинскому типу”, а FD-фактор изменяется по “китайскому типу” — в палеопочвах он превышает 2 %. Наибольшими значениями FD характеризуются палеопочвы Приобской увалистой равнины, Новосибирского Приобья и Барабинской низменности (Матасова и др., 2001; Матасова и др., 2003; Жданова и др., 2006). Наименьшие значения FD (<2.5 %) обнаружены в палеопочвах позднего—среднего неоплейстоцена Средней Сибири (Matasova et al., 2001; Zhu et al., 2003, Matasova, Kazansky, 2004). В лёссовых, суглинисто-супесчаных и песчаных отложениях значения FD не превышает 2 %, за исключением лёссовых отложений Приобской равнины, Кузнецкой котловины и Барабинской низменности, где они могут достигать 3—4 % (Matasova, Kazansky, 2004). Таким образом, на территории Западной и Юго-Западной Сибири по ключевым магнитным параметрам (MB и FD) установлено наложение двух известных механизмов — “алюскинского” и “китайского”, которое мы назвали “сибирским” механизмом формирования магнитных свойств сибирских лёссово-почвенных серий под воздействием климата (Матасова и др., 2003). С нашей точки зрения, “сибирский” механизм имеет право на существование, как переходный между двумя, вышеупомянутыми, но при этом его можно рассматривать и как самостоятельный, поскольку он имеет существенные отличия от общепринятых.

Магнитные свойства пород зависят, прежде всего, от концентрации магнитных (аллотигенных и аутигенных) минералов, а также от состава магнитной фракции и размеров магнитных зерен. В случае невысокого содержания магнетиков дополнительный весомый вклад в общий магнетизм дают парамагнетики. Эти факторы характеризуются определенными магнитными параметрами и действуют при любом механизме фиксации изменений природной среды и климата в магнитных свойствах субаэральных осадков. Более подробно с магнитными характеристиками субаэральных отложений можно ознакомиться в работе (Evans, Heller, 2003). Вместе с магнитной восприимчивостью изменяются все виды намагниченности, в том числе намагниченность насыщения (Js) и остаточная намагниченность насыщения (Jrs), поскольку они зависят в основном от концентрации магнитных

минералов. Так, в “алюскинском” и “сибирском” механизмах эти показатели обнаруживают низкие значения в палеопочвах и высокие — во вмещающих отложениях, в “китайском” — обратная картина. Также противоположно ведут себя коэрцитивные характеристики. Так называемые параметры магнитной жесткости (B_c , B_{cr} — коэрцитивная сила и остаточная коэрцитивная сила) демонстрируют более высокие значения в палеопочвах по сравнению с вмещающими отложениями в “алюскинском” и “сибирском” механизмах, тогда как в почвах с “китайским” типом магнитной записи эти значения ниже, чем в лёссах. “Алюскинские” и “сибирские” палеопочвы более магнитожесткие, чем “китайские”.

Вместе с тем существует ряд магнитных параметров, отличающихся по величине в разных разрезах, но изменяющихся одинаково во всех механизмах магнитной климатической записи. Это, в первую очередь, *эффективный размер* магнитного зерна, оценкой которого являются отношения K_{fer}/J_{rs} и B_{cr}/B_c (здесь K_{fer} — магнитная восприимчивость ферромагнетиков; J_{rs} — остаточная намагниченность насыщения). Эти отношения показывают уменьшение размеров магнитных зерен в почвенных горизонтах и увеличение во вмещающих толщах, независимо от механизма фиксации палеоклиматического сигнала. В общем случае, B_{cr}/B_c в отложениях “китайского” типа ниже по величине, что подтверждается доменным состоянием магнитных частиц, определенным по графику Дэй (J_{rs}/J_s & B_{cr}/B_c , Day et al., 1977): в отложениях “китайского” типа присутствуют, в основном, мелкие и средние псевдооднодоменные частицы; в магнитной фракции “алюскинских” и “сибирских” отложений преобладают крупные псевдооднодоменные зерна и многодоменные частицы. На диаграмме Дэй (Day et al., 1977) с учетом расчетов Д. Данлопа (Dunlop, 2002) содержание однодоменных частиц в магнитных фракциях “китайских” отложениях гораздо выше (до 60—70 % от общего количества), а в “алюскинских” и “сибирских” отложениях их количество уменьшается до 0—20 %.

И второй показатель, значение которого растет в палеопочвах и снижается во вмещающих толщах независимо от типа магнитной записи, это *вклад парамагнитных минералов* (J_{par} , K_{par}) в общий магнетизм осадков. Существование этих двух магнитных характеристик, единообразно меняющихся во всех субаэральных отложениях земного шара, является доказательством, во-первых, *фундаментальности*

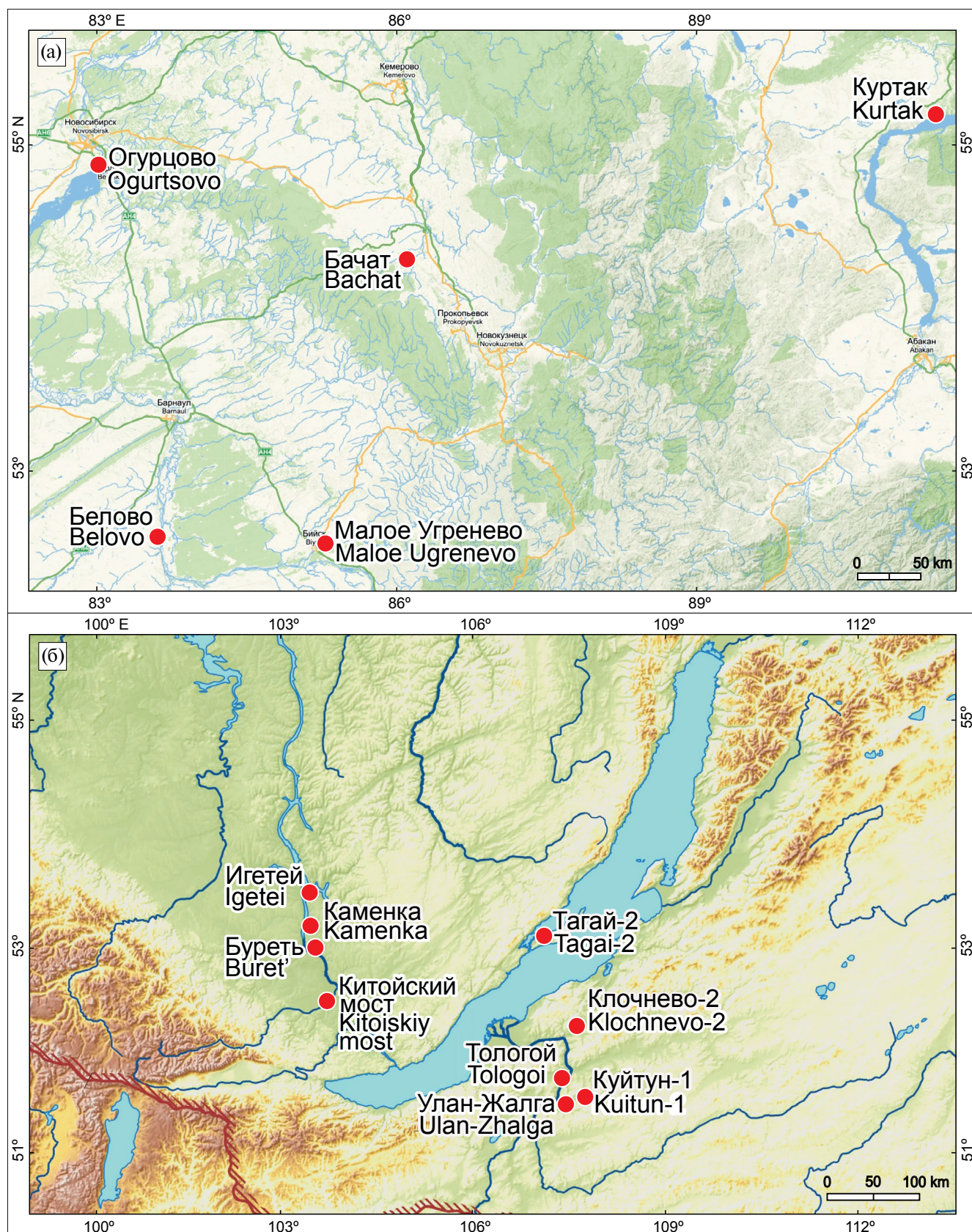


Рис. 1. Географическое положение изученных разрезов: (а) — Западная и Средняя Сибирь, (б) — Восточная Сибирь.

Fig. 1. Geographic location of the studied sections mentioned: (a) — is Western and Prienisei Siberia, (b) — is Eastern Siberia.

магнитной фиксации изменений природной среды и климата, и, во-вторых, свидетельством в пользу *единой модели магнитной* записи изменений природной среды и климата в субаэральные покровных толщах.

Рассмотрим “сибирский” механизм несколько подробнее. Ранее выполненные исследования позволили подразделить его на сильный и слабый. Сильный магнитный сигнал заключается в высоких значениях МВ в лёссовых и супесчано-песчаных горизонтах (до $400 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$), в 4–6 раз меньше значения МВ в палеопочвах ($30\text{—}80 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$) и величина FD от 6 до 10 %. Этот вариант магнитной записи климатических изменений можно считать “классическим” и ярко выраженным вариантом “сибирского” механизма. Примером такой классической магнитной записи по “сибирскому” типу может служить разрез Белово ($52^\circ 37' 1''$ с. ш., $83^\circ 37' 57''$ в. д., рис. 1) (Матасова и др. 2003), вскрывающий один из увалов Приобской равнины. Слабым магнитным сигналом можно считать невысокие значения МВ, мало различающиеся в палеопочвах и вмещающих толщах, и небольшие значения FD (<6 %), например, разрез Бачат ($54^\circ 16' 53''$ с. ш.; $86^\circ 09' 48''$ в. д.). Возможно еще более дробное подразделение “сибирского” механизма, например, высокие значения МВ и небольшие значения FD, например, разрез Малое Угреново ($52^\circ 33' 2''$ с. ш., $85^\circ 19' 54''$ в. д.), либо наоборот, невысокие значения МВ и высокие FD (разрез Огурцово, $54^\circ 52' 20''$ с. ш. $83^\circ 0' 25''$ в. д.), но это наиболее вероятно отражает существенное воздействие на запись локальных (частных) факторов (склоновые процессы, катастрофические потоки, размывы, приводящие к перерывам, вулканогенное “загрязнение” и т. п.). Все приведенные примеры описывают поведение МВ и FD в средне-позднеплейстоценовых отложениях Западной части Сибирской субаэральной формации. На территории Средней Сибири, согласно поведению МВ и FD, преобладающим механизмом фиксации палеоклиматического сигнала в среднем и позднем неоплейстоцене является “аласкинский”.

По степени проявления “сибирского” и “аласкинского” механизмов на территории Западной и Средней Сибири можно выделить отдельные регионы с преобладающим механизмом, границы которых в целом отвечают границам типов растительности для верхнего неоплейстоцена (МИС 3), приведенные в (Динамика ландшафтных..., 2002), что подтверждает климатическую обусловленность изменений магнитных характеристик.

4. МЕХАНИЗМЫ ЗАПИСИ КЛИМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МАГНИТНЫХ СВОЙСТВАХ СУБАЭРАЛЬНЫХ ОСАДКОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

В рамках данной статьи рассматриваются только магнитные параметры (в основном, МВ и FD), по изменению которых можно судить, каков механизм магнитной записи и как он соотносится с уже известными механизмами, какое положение он занимает в рамках единой модели магнитной палеоклиматической записи.

4.1. Неоплейстоцен Предбайкалья

На территории Предбайкалья нами изучено 10 разрезов отложений различного возраста, на рис. 2 приведены результаты исследования двух из них — Буреть и Китойский мост. На рисунках вмещающие толщи намеренно не подразделяются на отдельные горизонты, не обсуждается их состав, литология и генезис, поскольку цель данной работы показать дифференциацию магнитных свойств палеопочв и вмещающих их субаэральных осадков. Результаты изучения приведенных разрезов опубликованы, и заинтересованные исследователи могут найти детальное описание вмещающих отложений в работах (Стратиграфия и палеогеография..., 1990, Ербаева и др., 2019, Ivanova et al., 2019, Матасова и др., 2020, Казанский и др., 2022а, б, Матасова и др., 2023).

4.1.1. Разрез Буреть ($52^\circ 59' 26.86''$ с. ш. $103^\circ 28' 30.99''$ в. д.)

Разрез Буреть расположен в береговом уступе Братского водохранилища у пос. Буреть на территории Буретской многослойной археологической стоянки (Стратиграфия и палеогеография..., 1990). В разрезе вскрывается комплекс суглинистых и супесчаных верхнеплейстоцен-голоценовых субаэрально-склоновых отложений с заключенными в них горизонтами погребенных почв. Из отложений разреза по $C_{\text{орг}}$ было получено три AMS ^{14}C даты: 21250 ± 240 л. н. (гл. 2.4 м), 26220 ± 430 л. н. (гл. 10 м), 27540 ± 610 л. н. (гл. 12.8 м), свидетельствующие об аномально высоких скоростях осадконакопления. Полученная геохронометрическая характеристика отложений дает возможность выделить в разрезе три хроностратиграфических подразделения: МИС 1, МИС 2 и МИС 3.

Поведение магнитной восприимчивости (Kint) и FD-фактора по разрезу (рис. 2) позволяет квалифицировать магнитную запись в разрезе Буреть по типу

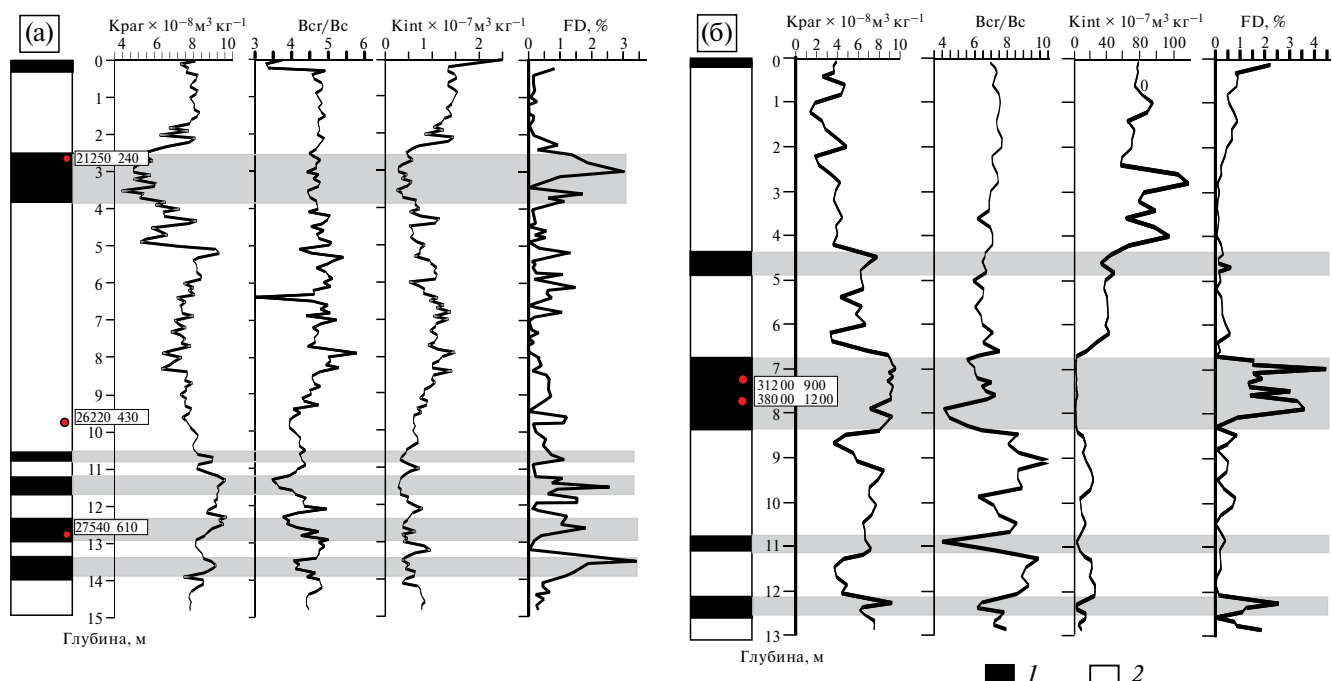


Рис. 2. Магнитные параметры, характеризующие верхнеплейстоценовые отложения разрезов Буреть (а) и Китойский мост (б).

1 — палеопочвы; 2 — вмещающие породы. Kpar — парамагнитная часть магнитной восприимчивости; Bcr/Bc — доменное состояние (размер магнитного зерна); Kint — начальная магнитная восприимчивость; FD — частотно-зависимая магнитная восприимчивость.

Fig. 2. Magnetic parameters characterizing the Late Neopleistocene deposits of the Buret (a) and the Kitoy bridge (b) sections. 1 — paleosols; 2 — host rocks; Kpar — paramagnetic part of magnetic susceptibility; Bcr/Bc — domain state (magnetic grain size); Kint — initial magnetic susceptibility; FD — frequency-dependent magnetic susceptibility.

слабого “сибирского” механизма (МВ палеопочв в ~2 раза меньше, чем МВ вмещающих отложений; FD в почвах достигает 3.5—4 %, во вмещающих отложениях <1.5 %). Два других параметра являются универсальными и демонстрируют различия в палеопочвах и вмещающих толщах: парамагнитная восприимчивость (Kpar) увеличивается в почвенных горизонтах и достигает 65—85 % от общей магнитной восприимчивости, тогда, как во вмещающих отложениях снижается и варьирует между 30 и 50 %; эффективный размер магнитного зерна (Bcr/Bc) уменьшается в палеопочвах и увеличивается в остальных осадках, причем наиболее четкая картина прослеживается в нижних, более развитых почвенных горизонтах.

4.1.2. Разрез Китойский мост (52°28'28.02" с. ш., 103°46'21.64" в. д.)

Разрез Китойский мост представлен сложно построенной толщей отложений, мощностью 13 м. Пески верхней части разреза (до глубины ~6.5 м) имеют нивейно-эоловое происхождение с характерным параллельным, порой горизонтальным залеганием поверхностей седиментации. Их формирование

происходило в условиях криоаридного климата и обусловлено захоронением в эоловых песках фрагментов снежного покрова, который постепенно преобразовывался в горизонтальные или полого наклонные шилы осадочно-метаморфического льда (Brookfield, 2011, Галанин, 2021). Нижняя часть разреза сложена лёссами и ископаемыми почвами с прослоями делювиальных отложений.

В верхней части разреза нивейные пески и палеопочва высокомагнитны и демонстрируют самые высокие значения МВ в Предбайкалье; разница в 2.0—2.5 раза между МВ верхней почвы и песков сохраняется (рис. 2). Значения FD-фактора здесь не превышают 1 % (за исключением современной почвы). Такое поведение двух видов МВ характерно для “алескинского” механизма магнитной записи. В отложениях нижней части разреза МВ резко падает, хотя сохраняется тенденция более низких значений магнитной восприимчивости в палеопочвенных горизонтах, чем во вмещающих осадках. Значения FD-фактора, наоборот, в почвах возрастают до 4.5 %, а во вмещающих отложениях остаются <1 %, что позволяет квалифицировать магнитную запись по типу среднего “сибирского” механизма. Парамагнитная

компонента (K_{par}) во всех палеопочвах показывает повышенные значения по сравнению с вмещающими отложениями, независимо от смены механизма. Эффективный размер магнитного зерна (V_{cr}/V_c) также уменьшается в палеопочвах и увеличивается в остальных осадках, наиболее четкая картина прослеживается в нижних, более развитых почвенных горизонтах.

4.1.3. Разрез Игетей

(53.581856° с. ш., 103.444225° в. д.)

Игетей является одним из опорных разрезов верхнечетвертичных отложений Юга Восточной Сибири и важнейшим многослойным геоархеологическим объектом Байкальского региона, результаты его изучения представлены на рис. 3.

Разрез Игетей расположен в береговом обрыве Братского водохранилища, вблизи устья реки Оса и представлен сложно построенной толщей субэзально-склоновых отложений, мощностью 20 м. Отложения разреза на разных стратиграфических уровнях насыщены палеонтологическим и археологическим материалом и охарактеризованы геохронологически (Медведев, Воробьева, 1987, Стратиграфия, палеогеография..., 1990). Возрастной интервал

формирования разреза — средний неоплейстоцен — голоцен.

В поздненеоплейстоценовых отложениях разреза Игетей значения FD не превышают 2 % независимо от состава и генезиса, но, вместе с тем MB характеризуется пониженными значениями в палеопочвах (рис. 3). Наблюдается незначительное различие величин отношений K_{par} и V_{cr}/V_c между верхним палеопочвенным горизонтом и вмещающими толщами. Такая картина характерна скорее для “алескинского” механизма магнитной записи. В отложениях среднего неоплейстоцена (верхняя граница не установлена, но среднеоплейстоценовый возраст палеопочв с глубины 9 м обосновывается палеонтологическим материалом) поведение магнитных характеристик более наглядно демонстрирует различие магнитных свойств отложений. В палеопочвах пониженные значения MB сопровождаются увеличением значений FD до 4.5–5 %, во вмещающих отложениях FD колеблется между 0 и 1 %. Существенно повышается парамагнитная восприимчивость и держится высокой во всей нижней части разреза, хотя некоторое различие с вмещающими осадками наблюдается. Заметно снижается эффективный размер магнитного зерна, особенно в нижних почвенных горизонтах. Таким образом, с учетом значений MB (на порядок выше, чем в Бурети, разница MB между почвами и вмещающими отложениями достигает 3–4 раз) для среднеоплейстоценовых субэзальных отложений характерен сильный “сибирский” механизм со средним вкладом “педогенного” фактора (FD).

4.2. Эоплейстоцен Предбайкалья

Эоплейстоценовые отложения Прибайкальского региона изучены в двух разрезах — Тагай-2 и Каменка.

4.2.1. Разрез Тагай-2

(53°09'19.74" с. ш., 107°12'45.36" в. д.)

Расположен на берегу одноименного залива на северо-западном побережье острова Ольхон озера Байкал (рис. 4). Здесь в искусственной выемке вскрываются отложения нюрганской (до 3 м) и харанцинской (ниже 3 м) свит эоплейстоцена (Мац и др., 1982). Нюрганская свита представлена песчано-суглинистыми субэзальными отложениями делювиального генезиса. Отложения нюрганской свиты существенно переработаны и не сохранили первоначальных магнитных свойств, поэтому далее не рассматриваются.

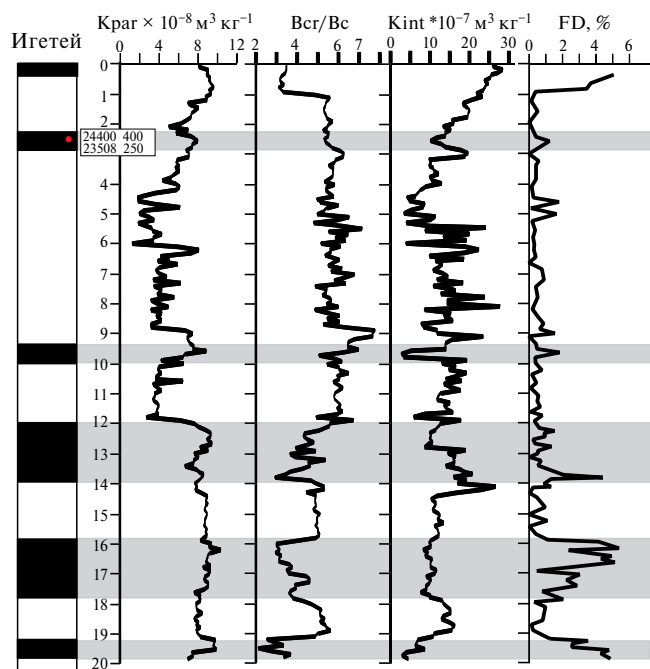


Рис. 3. Магнитные параметры средне-верхнеоплейстоценовых отложений разреза Игетей. Усл. обозначения см. рис. 2.

Fig. 3. Magnetic parameters of Middle-Late Neopleistocene deposits of the Igetay section. For the symbols, see fig. 2.

Харанцинская свита представляет собой лёссово-почвенную последовательность суглинистого состава. Последовательность включает семь горизонтов аридных погребенных почв, разделенных слоями склоновых отложений. В суглинках найдены остатки мелких млекопитающих, которые позволяют датировать вмещающие породы концом нижнего эоплейстоцена (Мац и др., 1982, Покатилов, 1984). По палеомагнитным данным отложения харанцинской свиты характеризуются только обратной полярностью (Kazansky et al., 2022).

Верхние слои представляют собой склоновые, перемешанные отложения, не сохранившую первичную текстуру и первичную намагниченность. В эоплейстоценовом ПК в гумусовых (иллювиальных?) горизонтах наблюдается повышенное содержание парамагнитных минералов (повышенные значения K_{par}), как и во всех палеопочвах любого возраста. Также в этих слоях четко прослеживается уменьшение эффективного размера магнитного зерна. Главное отличие магнитных свойств эоплейстоценовых палеопочв от палеопочв более молодого возраста заключается в увеличении в них значений МВ в $\sim 3\text{--}4$ раза. В промежуточных и вмещающих слоях, напротив, наблюдается уменьшение МВ. Одновременно с увеличением МВ в палеопочвенных горизонтах существенно возрастает величина FD (до 9.5 %!), против 1–3 % во вмещающих отложениях. Как было сказано выше, такая картина поведения двух типов

МВ характерна для “китайского” механизма магнитной записи.

4.2.2. Разрез Каменка

($52^{\circ}10'26.0''$ с. ш., $103^{\circ}22'45.5''$ в. д.)

Разрез Каменка был обнаружен группой археологов ИГУ в 2019 г. при совместных полевых работах, его описание приводится впервые. Разрез расположен на правом берегу р. Ангары, на окраине пос. Каменка. Здесь в стенке придорожного карьера вскрываются тонкослойчатые пески, супеси, глины с заключенными в них погребенными почвами. Видимая мощность вскрытых отложений составляет 6 м.

По палеомагнитным данным в разрезе четко выделяются три зоны магнитной полярности, что позволяет предполагать эоплейстоценовый возраст нижней части разреза (рис. 4), красная черта отделяет нижнюю толщу, сложенную осадками эоплейстоценового возраста. Как и во всех рассмотренных отложениях в палеопочвенных горизонтах традиционно увеличивается количество парамагнитных минералов (K_{par}), уменьшается размер магнитного зерна ($V_{\text{сг}}/V_{\text{с}}$). Как и в предыдущем разрезе, эоплейстоценовые палеопочвы характеризуются повышением значений МВ (в 3–5 раз по сравнению с вмещающими отложениями) и значениями FD до 5 %. Таким образом, здесь также фиксируется “китайский” механизм записи палеомагнитного сигнала.

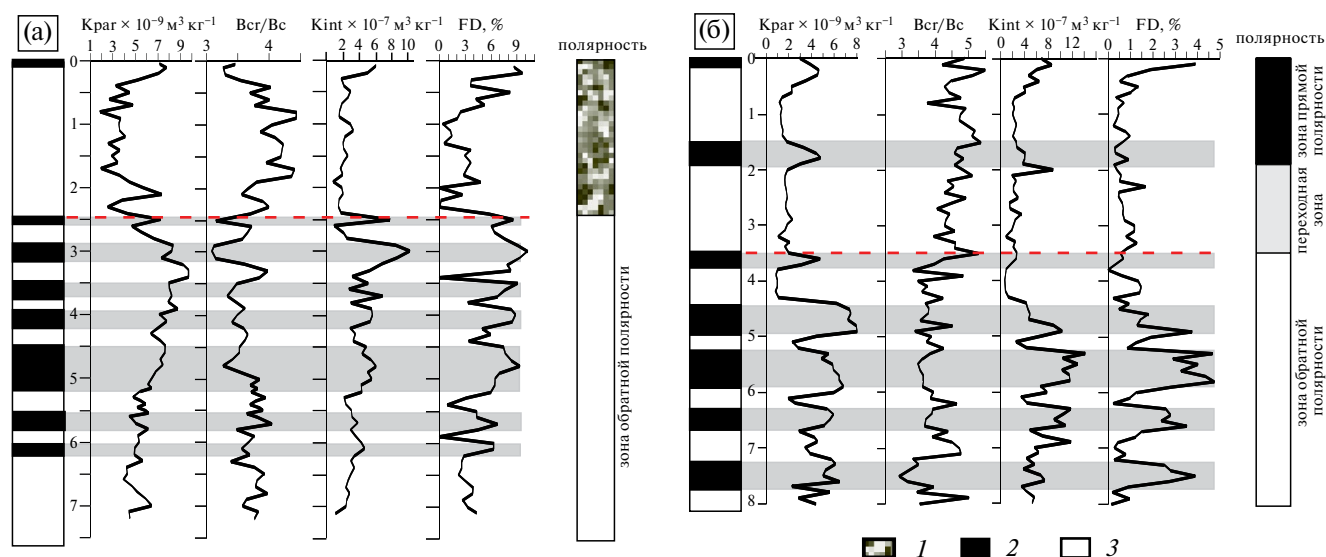


Рис. 4. Магнитные параметры эоплейстоценовых отложений разрезов Тагай-2 (а) и Каменка (б). Красная прерывистая черта — граница Матуйама–Брюнес. Усл. обозначения см. рис. 2.

Fig. 4. Magnetic parameters of the Eopleistocene deposits of the Tagay-2 (a) and Kamenka (б) sections. The red dashed line is the Matuyama–Brunhes boundary. For the symbols, see fig. 2.

Подведем итог по изучению основных магнитных показателей для определения механизма записи колебаний палеоклимата в магнитных свойствах субаэральных отложений Предбайкалья:

- в эоплейстоцене климат Западного Предбайкалья был намного более гумидным — теплым и влажным, чем в неоплейстоцене. Это подтверждается фиксацией климата в магнитных свойствах субаэральных отложений по “китайскому” или “педогенному” механизму. Мягкий климат, особенно в теплые эпохи, способствовал интенсивному педогенезу, одним из следствий которого было образование *in situ* новых магнитных минералов, фиксируемых двумя типами магнитной восприимчивости палеопочв. Но даже в эпохи похолоданий климатические колебания не достигали того уровня иссушения и похолодания, как в более молодые климатические периоды, поскольку во вмещающих отложениях также наблюдаются повышенные значения FD (до 3—4 %), свидетельствующие об определенном уровне развития педогенных процессов;
- в среднем неоплейстоцене магнитная климатическая запись происходила по типу сильного “сибирского” механизма с умеренным вкладом “педогенного” фактора. Это означает, что при общих высоких значениях магнитной восприимчивости отложений, МВ почв меньше МВ вмещающих отложений в 3—4 раза, а значения FD достигают 4—5 %. Что означает переход к более суровым климатическим условиям;
- в верхнеоплейстоценовых отложениях магнитные записи изменения климата фиксируют 2 этапа. Ранний этап позднего неоплейстоцена (МИС 5—МИС 4) характеризуется близкими со средним неоплейстоценом климатическими условиями. Магнитная запись происходила также по типу “сибирской”, но об ужесточении климата свидетельствуют более низкие и менее контрастные значения МВ и снижение величин FD до 3—4 %, т.е. фиксируется слабый “сибирский” механизм. Поздний этап позднего неоплейстоцена (МИС 3—МИС 2) характеризуется еще более суровыми климатическими условиями, при которых магнитная запись происходит по “аласкинскому” типу с условиями, не способствующими интенсивному педогенезу и, соответственно, с малыми значениями FD (0—2 %). Но в некоторых разрезах осадки этого временного интервала показывают магнитные характеристики по типу слабого “сибирского” механизма с FD до 2—3 %. Вероятно,

эти мелкие различия между двумя зафиксированными магнитными записями определяют местными условиями (геоморфологическим положением, окружающим рельефом, расстоянием до источников сноса, катастрофическими событиями и т. п.);

- нижнеоплейстоценовые осадки не были нами обнаружены, поэтому данные о магнитных записях климата в отложениях этого временного интервала отсутствуют. Интерполируя полученные результаты, можно сделать предположение о механизме фиксации палеоклиматического сигнала в раннем неоплейстоцене и позднем эоплейстоцене: скорее всего, это будет переход от “китайского” механизма записи к “сибирскому”, что выразится в небольшой контрастности значений МВ горизонтов ископаемых и вмещающих отложений, но с достаточно высокими FD (до 6—9 % для почв).

4.3. Неоплейстоцен Забайкалья

На территории Забайкалья неоплейстоценовые отложения изучены в шести разрезах, для краткости мы остановимся на трех из них: Куйтун-1, Тологой и Улан-Жалга.

4.3.1. Разрез Куйтун 1

(51°31'48.87" с. ш., 107°43'51.21" в. д.)

Разрез Куйтун-1 расположен на правом берегу реки Куйтунка близ поселка Куйтун (Матасова и др., 2023). Здесь на крутом северном склоне покровные отложения сохранились лишь в самом его подножии и перекрывают аллювиальные образования краевой части днища долины. Покровные отложения представляют собой переслаивание палевых и коричневатопалевых массивных супесей и суглинков с характерными структурами вертикальных столбчатых отдельностей, с прослоями песков (рис. 5). Строение разреза Куйтун-1 аналогично строению разрезов в долине р. Куйтунка, датированных радиоуглеродным методом (Голубцов и др., 2017), поэтому возраст отложений в разрезе Куйтун 1 можно ограничить верхним неоплейстоценом, что также подтверждается прямой полярностью отложений разреза Куйтун по палеомагнитным данным.

Контрастность магнитных свойств отложений невелика. Горизонты ископаемых почв отмечаются пониженными значениями МВ, всего в 1.5—1.7 раза меньше МВ вмещающих отложений. Кроме того, в палеопочвах по сравнению с другими осадками

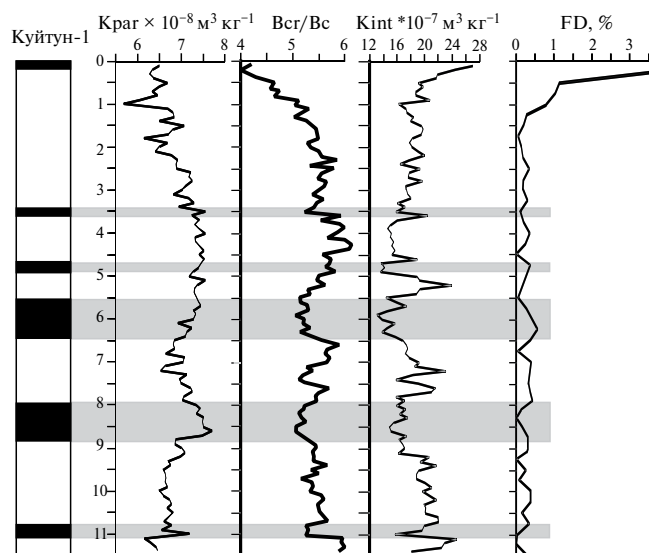


Рис. 5. Магнитные параметры верхнеплейстоценовых отложений разреза Куйтун-1. Усл. обозначения см. рис. 2.

Fig. 5. Magnetic parameters of the Late Neopleistocene deposits in the Kuitun-1 section. For the symbols, see fig. 2.

наблюдаются повышенные значения Краг и пониженные B_{cr}/B_c . Наименее контрастны магнитные параметры в верхней части разреза, но с глубины 5.5 м вниз по разрезу различия возрастают. Значения FD не превышают 1 % во всех горизонтах разреза, за исключением современной почвы (рис. 5). Поведение двух типов МВ свидетельствует о том, что в данном разрезе зафиксирована магнитная запись изменений природной среды и климата по типу слабой “алаянской”.

4.3.2. Разрез Тологой

($51^{\circ}44'43.93''$ с. ш., $107^{\circ}28'20.93''$ в. д.)

Разрез Тологой в силу своей стратиграфической полноты является опорным не только для Западного Забайкалья, но и для всей Восточной Сибири (Ivanova et al., 2019). Разрез расположен в прибортовой части Иволгинской впадины на левом берегу р. Селенги, у подножья горы Тологой в 16 км к юго-западу от г. Улан-Удэ. Здесь вскрывается сложно построенная толща субаэральных отложений мощностью более 30 м с горизонтами ископаемых почв (рис. 6). Подробное описание разреза приведено в (Ivanova et al., 2019).

Возраст отложений определен по палеонтологическим данным (Алексеева, 2005) и подтвержден палеомагнитным методом. Палеомагнитная граница Матуяма—Брюнес (0.772 млн лет) по данным (Ма-

тасова и др. 2020) проходит на глубине 11.1—11.3 м. Субхрон Харамильо в разрезе не обнаружен, что позволяет датировать нижнюю границу разреза на глубине 20 м не древнее 1 млн л.

Ископаемые почвы неоплейстоцена выделяются пониженными значениями МВ, которые меньше всего в 1.5—2 раза, чем МВ вмещающих осадков. На рис. 6 добавлен горизонт палеопочвы на глубине 6.8—7.6 м со знаком вопроса, дополнительный по сравнению с уже опубликованными данными. Этот горизонт выделяется по всем петромагнитным параметрам, но не очевиден по гранулометрическому составу и большинству геохимических параметров. Палеопочвы характеризуются повышенными значениями Краг и снижением отношения B_{cr}/B_c . Значения FD не превышают 2 %, за исключением палеопочвы на глубине 9—10 м (FD до 2.7 %), которую можно отнести по времени формирования к среднему неоплейстоцену.

4.3.3. Разрез Улан Жалга

($51^{\circ}29'40.75''$ с. ш., $107^{\circ}20'18.11''$ в. д.)

Новый для Забайкалья разрез Улан-Жалга был обнаружен нами в 2017 г. По полноте геологической летописи Улан-Жалга не уступает опорному разрезу Тологой (Ербаева и др., 2019). Разрез Улан-Жалга располагается в нижнем течении реки р. Куйтунка, недалеко от ее впадения в р. Селенга на северной окраине пос. Тарбагатай. Здесь в эрозионном уступе педиментированного Омудевского останцового массива обнажается толща четвертичных отложений, сложенная эолово-делювиальными песками, лёссовидными супесями и суглинками, грубообломочными селевыми накоплениями. Возраст отложений определен по палеомагнитным и палеонтологическим данным. Граница Брюнес—Матуяма фиксируется на глубине 15 м, а на глубине 23 м — верхняя граница субхрона Харамильо (0.990 млн л.) (Ербаева и др., 2019).

Значения МВ неоднозначно фиксируют строение разреза: в верхней части (до глубины 6.5 м) палеопочвы явно проявляются меньшей МВ (до 3 раз) по сравнению с МВ вмещающих отложений (рис. 6). По всей видимости, это отложения позднего неоплейстоцена. Ниже и до границы Брюнес—Матуяма ископаемые почвы и вмещающие отложения по значениям МВ практически не различаются. Но во всей верхней части разреза (0—15 м) четко фиксируются неоплейстоценовые палеопочвы по повышенному содержанию парамагнитных минералов (повышенные значения Краг), уменьшению размеров магнитных зерен (пониженные значения B_{cr}/B_c).

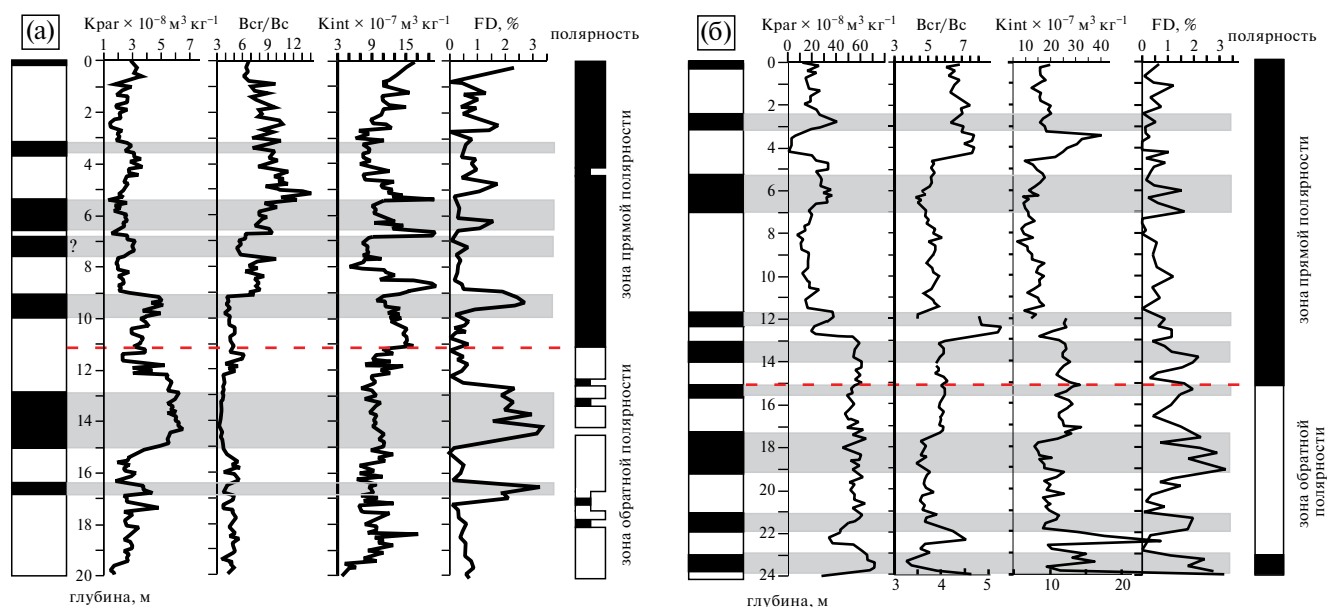


Рис. 6. Магнитные параметры плейстоценовых (неоплейстоценовых, эоплейстоценовых) отложений разрезов Тологой (а) и Улан-Жалга (б). Красная прерывистая черта указывает на палеомагнитную границу Матуйама–Брюнес. Усл. обозначения см. рис. 2.

Fig. 6. Magnetic parameters of the Pleistocene (Neopleistocene and Eopleistocene) deposits of the Tologoi (a) and Ulan-Zhalga sections (b). The red dashed line indicates the paleomagnetic boundary of Matuyama–Brunhes. For the symbols, see fig. 2.

Значения FD не превышают 1.5 %, за исключением палеопочвы на глубине 13–14 м (FD до 2.2 %), которую можно считать образованием среднего неоплейстоцена.

Таким образом, в отложениях неоплейстоцена Забайкалья фиксация палеоклиматического сигнала в их магнитных свойствах происходила по “аласкинской” типу. Несмотря на относительно высокие значения MB, но учитывая небольшие различия по MB палеопочв и вмещающих отложений, можно констатировать, что данные магнитные записи относятся к слабому варианту “аласкинского” механизма с малой контрастностью магнитных свойств отложений различного генезиса.

4.4. Эоплейстоцен Забайкалья

Эоплейстоценовые отложения изучены в трех разрезах Забайкалья — Тологой, Улан-Жалга, и Ключево.

4.4.1. Разрез Тологой

В разрезе Тологой в эоплейстоценовых отложениях MB не очень отчетливо фиксирует палеопочвы, ее значения, в целом, ниже в почвах, но всего в ~1.2 раза. Остальные три параметра четко отмечают их

положение в разрезе, особенно показатель FD, величина которого возрастает до 3.5 % (рис. 6). Также четко выделяются палеопочвы по значениям Краг и Bcr/Bc.

4.4.2. Разрез Улан-Жалга

В разрезе Улан-Жалга картина несколько другая: здесь палеопочвы четко выделяются также по трем параметрам, это Bcr/Bc, MB и FD, значения последнего возрастают до 3.2 % (рис. 6).

Различия между MB ископаемых почв и MB вмещающих отложений минимальны, примерно также как в Тологой — в ~1.2 раза. В обоих разрезах в эоплейстоценовых отложениях увеличение параметра FD, хотя и не очень большое, но дает основание для более уверенного определения положения ископаемых почв в разрезе. Следует заметить, что этот параметр лучше “работает” в мощных, хорошо развитых почвах.

4.4.3. Разрез Ключево-2 (52°11'15.48" с. ш., 107°34'40.35" в. д.)

Разрез Ключево-2 расположен на западной окраине Итанцинской впадины в подножие склона Морского хребта. Разрез приурочен к одной из врезаемых излучин реки Итанца. В 2022 г. нами было

вскрыто основание разреза. Эта расчистка является фрагментом Итанцинского разреза — уникального местонахождения эоплейстоценовой фауны и важнейшего опорного разреза квартала Забайкалья (Базаров и др., 1976; Базаров, 1986; Алексеева, 2005; и др.).

Результаты палео- и петромагнитного изучения Ключнево-2 представлены на рис. 7. В разрезе Ключнево-2 вскрываются разновозрастные четвертичные субаэральные-склоновые образования, залегающие на юрских конгломератах. Здесь коричневатые-палевые облёсанные суглинки и супеси с примесью дресвы и щебня переслаиваются с красновато-бурыми плотными суглинками погребённых почв. Согласно палеонтологическим данным (Erbaeva, 1998; Erbaeva, Alexeeva, 2000; Алексеева, 2005) возраст отложений этой части разреза оценивается ранним эоплейстоценом (поздним плиоценом по старой схеме) — 1.9–2.5 млн л. (Alexeeva, Erbaeva, 2005). Оба палеопочвенных горизонта выделены по геологическому описанию и характеризуются повышенными значениями МВ и FD (рис. 7). Превышение небольшое, МВ палеопочв больше МВ вмещающих пород в 1.5–1.6 раз. Значения FD в палеопочвах колеблются от 6 до 8 %. Во вмещающих отложениях диапазон изменения FD шире, от 2 до 8 %, но также в среднем FD (~5 %) имеет высокие значения по сравнению с отложениями Забайкалья другого возраста.

По палеомагнитным и палеонтологическим данным изученные эоплейстоценовые отложения Забайкалья относятся к разным временным интервалам: отложения разрезов Тологой и Улан-Жалга сформировались в поздней половине эоплейстоцена (по магнитостратиграфической шкале — между

эпизодом Харамилье и границей Матуяма–Брюнес); в то время, как отложения Ключнево-2 наиболее вероятно являются образованиями нижнего эоплейстоцена (по магнитостратиграфической шкале — в эпоху Матуяма до субхрона Харамилье). Возрастным различием объясняется столь различная картина поведения магнитных характеристик отложений.

Таким образом, в разрезах Тологой и Улан-Жалга в верхнеэоплейстоценовых отложениях фиксация климатических колебаний происходила в рамках слабого “сибирского” механизма с малым вкладом педогенного фактора (небольшие значения FD). В нижнеэоплейстоценовых отложениях, вскрытых в разрезе Ключнево-2, магнитная запись палеоклиматических изменений относится к “китайскому” механизму с небольшим различием МВ в почвах и вмещающих отложениях, но с высоким вкладом педогенного фактора как в палеопочвах, так и во вмещающих породах. Эта смена механизма формирования магнитных свойств в субаэральные отложения отражает глобальную перестройку климата, вероятно связанную со сменой длительности циклов δO^{18} с 40 000 до 100 000 лет по (Lisiecki, Raymo, 2005). Проявление “китайского” механизма в эоплейстоценовых отложениях Прибайкалья и Забайкалья позволяет предполагать региональный характер смены механизма формирования магнитных свойств и рассматривать его как диагностический признак для эоплейстоценовых отложений в разрезах Байкальского региона.

На рис. 8 помещены все изученные разрезы относительно магнитостратиграфической шкалы МСК (Гужиков, Шкатова, 2015) с указанием типа магнитной климатической записи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В неоплейстоцене на территории Сибири формирование магнитных свойств субаэральные отложений под влиянием климатических изменений носит сложный характер. В Средней Сибири в позднем неоплейстоцене основным механизмом является “алеский” или “ветровой”, обусловленный интенсивной ветровой деятельностью. В Западной Сибири в позднем неоплейстоцене преобладает специфический “сибирский” механизм, представляющий суперпозицию “китайского” (высокие значения FD) и “алеского” (более высокие значения МВ в лёссах по сравнению с почвами) механизмов. При этом наблюдается существенная дифференциация в интенсивности проявления этих механизмов, что, вероятно, имеет климатическую природу. На климатическую обусловленность, в частности,

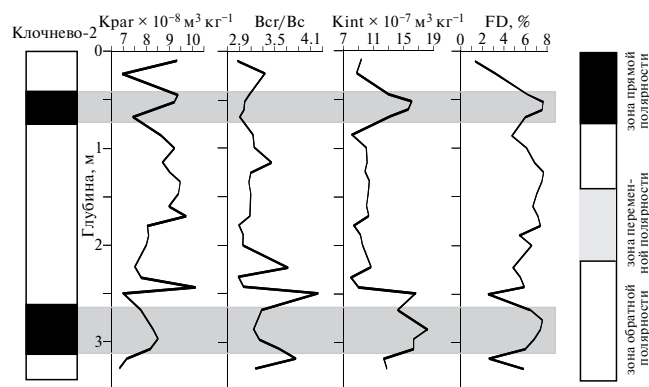


Рис. 7. Магнитные свойства эоплейстоценовых отложений разреза Ключнево-2. Усл. обозначения см. рис. 2.

Fig. 7. Magnetic properties of Eopleistocene deposits in the Klochnovo-2 section. For the symbols, see fig. 2.

Морские изотопные стадии	Общая стратиграфическая шкала кватерра России					Тип магнитной климатической записи	
Возраст	Система	Отдел	Подраздел	Звено	Ортозоны	Восточная Сибирь	
						Предбайкалье	Бурятия, Забайкалье
1 11.7	КВАРТЕР	ПЛЕЙСТОЦЕН	НЕОПЛЕЙСТОЦЕН	Верхнее	БРЮНЕС	Сибирский слабый Сибирский Аляскинский Аляскинский	Аляскинский Аляскинский Аляскинский
2 29							
3 57							
4 71							
5 126							
6 191							
7 243							
8 301							
9 334							
10 364							
11 427							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19 781							
20–35	ЭОПЛЕЙСТОЦЕН	Верхнее	НИЖНЕЕ	МАТУЯМА		Каменка	
36–63						Тагай	Тологой
64–103 2588						Китайский	Улан-Жалга
	НЕОГЕН	ПЛИОЦЕН					Клочнево
							Китайский

Рис. 8. Схема сопоставления изученных разрезов с магнитохронологической шкалой (Гужиков, Шкатова, 2015, с упрощениями авторов) с указанием типа магнитной климатической записи.

Fig. 8. Scheme of comparison of the studied sections with the magnetochronological scale (Guzhikov, Shkatova, 2015, with simplifications by the authors) indicating the type of magnetic climate record.

указывают палинологические данные. Универсальными магнитными параметрами для выявления интервалов потепления (палеопочв) во всех механизмах являются концентрация парамагнитных минералов и размер (доменное состояние) магнитных зерен. Обобщение магнитных данных по Западной и Восточной Сибири позволяет проводить обоснованную палеоклиматическую интерпретацию изменений основных магнитных характеристик по разрезам субаэральных отложений Сибирского региона.

На примере изучения покровных субаэральных отложений Байкальского региона, имеющих разный возраст, различное геоморфологическое положение и различный генезис, показано, что поведение магнитных характеристик позволяют более детально и более уверенно определять строение покровных толщ, выделяя составляющие их компоненты, обусловленные изменениями окружающей природной среды и климата. Несмотря на применение магнитных методов в комплексе с другими исследованиями они имеют и самостоятельное значение. Во-первых, палеомагнитные измерения дают возможность построить возрастную модель, а для отложений, не имеющих абсолютных датировок и “немых” с точки зрения ископаемой фауны, это единственная возможность оценки возраста. Во-вторых, петромагнитные измерения фиксируют механизм магнитной записи палеоклиматических колебаний и определяют его место среди известных механизмов, соответствующих конкретным климатическим условиям.

Полученные результаты позволяют предложить следующую климатическую интерпретацию.

Согласно полученным результатам, палеоклиматические условия Предбайкалья (Западное Прибайкалье) и Забайкалья (Восточное Прибайкалье) отличались. “Китайский” тип магнитной записи палеоклиматического сигнала в его слабом варианте и соответствующий ему климат (теплый, мягкий, умеренно континентальный) обнаружен в нижнеэоплейстоценовых отложениях Забайкалья и эоплейстоценовых (без детализации) отложениях Предбайкалья. При этом в Предбайкалье “китайский” тип записи более выражен, чем в Забайкалье, что говорит о более сильном влиянии местного климата на магнитные свойства отложений.

В верхнем эоплейстоцене Забайкалья тип магнитной записи сменяется слабым “сибирским” с малым вкладом “педогенного” фактора. Такая запись свидетельствует о существенном изменении климата в сторону похолодания и уменьшения влажности, по типу магнитной записи его можно сравнить с современной Северной Европой.

Пока нет данных о фиксации климата в магнитных свойствах нижнеэоплейстоценовых отложений Байкальского региона.

В течение среднего неоплейстоцена в Предбайкалье магнитная климатическая запись происходила по типу сильного “сибирского” механизма со средним вкладом “педогенного” фактора. В Забайкалье в это же время климат фиксировался по типу слабого “сибирского” с малым вкладом “педогенного” фактора. От верхнеэоплейстоценовой записи фиксация климата среднего неоплейстоцена отличается более четкой картиной, с большей разницей между МВ почв и вмещающих пород, что можно интерпретировать, как усиление климатических различий между теплыми и холодными периодами. Климат на территории Предбайкалья в среднем неоплейстоцене можно сравнить с современным резко континентальным климатом Западной Сибири.

Поздний неоплейстоцен характеризуется переходом климата к еще более суровым условиям. В Предбайкалье в позднеэоплейстоценовых отложениях магнитные записи изменения климата фиксируют 2 этапа. Ранний этап позднего плейстоцена (МИС 5—МИС 4) характеризуется близкими климатическими условиями со средним неоплейстоценом, магнитная запись происходила также по типу “сибирской”, но об ужесточении климата свидетельствуют более низкие и менее контрастные значения МВ отложений и снижение величин FD. Заключительный этап позднего неоплейстоцена (МИС 3—МИС 2) характеризуется еще более суровыми климатическими условиями, при которых магнитная запись происходит по “аласкинскому” типу с соответствующим климатом. Но в некоторых разрезах осадки этого интервала показывают магнитные характеристики по типу слабого “сибирского” механизма с малым FD. Таким образом, не наблюдается единого, общего типа магнитной записи на этот временной интервал в Предбайкалье, что может указывать на переходный характер механизма фиксации палеоклиматического сигнала от “сибирского” к “аласкинскому”.

В Забайкалье этот переход уже произошел, и “сибирский” тип климата сменился в период МИС 3—МИС 2 устойчивым “аласкинским”, который можно сравнить с современным экстраконтинентальным климатом Средней Сибири.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Н. В. (2005). Эволюция природной среды Западного Забайкалья в позднем кайнозое (по данным фауны мелких млекопитающих). М: ГЕОС. 141 с.
- Базаров Д. Б. (1986). Кайнозой Прибайкалья и Западного Забайкалья. Новосибирск: Наука. 182 с.
- Базаров Д. Б., Ербаева М. А., Резанов И. Н. (1976). Геология и фауна опорных разрезов антропогена Западного Забайкалья. М.: Наука, 148 с.
- Волков И. А. (1971). Позднечетвертичная субэкральная формация. М.: Изд-во Наука. 254 с.
- Галанин А. А. (2021). Позднечетвертичные песчаные покровы Центральной Якутии (Восточная Сибирь): строение, фациальный состав и палеоэкологическое значение. *Криосфера Земли*. Т. XXV. № 1. С. 3—34. <https://doi.org/10.15372/KZ20210101>
- Голубцов В. А., Рыжов Ю. В., Кобылкин Д. В. (2017). Почвообразование и осадконакопление в Селенгинском среднегорье в позднеледниковье и голоцене. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН. 139 с.
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 13000 лет. Атлас-монография. (2002). Под ред. А. А. Величко. М.: ГЕОС. 231 с.
- Гужиков А. Ю., Шкатова В. К. (2016). О внесении изменений в Общую магнитостратиграфическую шкалу полярности четвертичной системы. *Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий*. Вып. 44. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ. С. 35—36.
- Ербаев М. А., Щетников А. А., Казанский А. Ю. и др. (2019). Новый опорный разрез плейстоцена Улан-Жагла в Западном Забайкалье. *Доклады Академии наук*. Т. 488. № 3. С. 48—52. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883277-281>
- Жданова А. И., Казанский А. Ю., Зольников И. Д. и др. (2007). Опыт фациально-генетического расчленения субэкральных отложений Новосибирского Приобья геолого-петромагнитными методами. *Геология. Геофизика*. Т. 48. № 4. С. 446—459.
- Казанский А. Ю., Кравчинский В. А., Зыкина В. С. и др. (1998). Возможности магнитных методов для выявления климатического сигнала в лёссово-почвенных разрезах Сибири. В сб.: *Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири*. Новосибирск: Ин-т археологии и этнографии. С. 191—202.
- Казанский А. Ю., Матасова Г. Г., Щетников А. А. и др. (2022а). Разрез Китойский мост — новый тип разреза верхнечетвертичных отложений Предбайкалья. В сб.: *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Вып. 20. Иркутск: ИЗК СО РАН. С. 117—118.
- Казанский А. Ю., Матасова Г. Г., Щетников А. А. и др., (2022б). Результаты комплексных исследований опорного разреза Игетей (средний верхний неоплейстоцен, Предбайкалье). В сб.: *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Вып. 20. Иркутск: ИЗК СО РАН. С. 119—122.
- Матасова Г. Г., Казанский А. Ю. (2005). Вклад парамагнитных минералов в магнитные свойства лёссово-почвенных отложений Сибири (палеоклиматический аспект). *Физика Земли*. № 9. С. 81—89.
- Матасова Г. Г., Казанский А. Ю., Зыкина В. С. (2003). Наложение “Аляскинской и Китайской моделей записи палеоклимата в магнитных свойствах отложений верхнего и среднего неоплейстоцена на юге Западной Сибири. *Геология. Геофизика*. Т. 44. № 7. С. 638—651.
- Матасова Г. Г., Казанский А. Ю., Щетников А. А. и др. (2020). Новые петро- и палеомагнитные данные по четвертичным отложениям опорного разреза Тологой (Западное Забайкалье) и их климатическое значение. *Физика Земли*. № 3. С. 112—133. <https://doi.org/10.31857/S0002333720030059>
- Матасова Г. Г., Казанский А. Ю., Щетников А. А. и др. (2023). Куйтунская долина — экзодинамический полигон для отработки междисциплинарной методики исследований седиментационных обстановок формирования покровного лёссовидного комплекса в позднем неоплейстоцене Забайкалья. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 14. № 3. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0703>
- Мац В. Д., Покатилов А. Г., Попова С. М. и др. (1982). Плиоцен и плейстоцен Среднего Байкала. Новосибирск: Наука. 195 с.
- Медведев Г. И., Воробьева Г. А. (1987). Игетей — опорный разрез верхнеплейстоценовых субэкральных отложений и палеолитических культур на юге Восточной Сибири. В сб.: *Геология кайнозоя юга Восточной Сибири: тезисы докладов*. Иркутск. С. 20—21.
- Покатилов А. Г. (2004). Палеонтология и стратиграфия кайнозоя юга Восточной Сибири и сопредельных территорий. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 275 с.
- Стратиграфия, палеогеография и археология юга Средней Сибири: К XIII Конгрессу ИНКВА (КНР, 1991) (1990). Под ред. Г. И. Медведева, Н. А. Савельева, В. В. Свирина. Иркутск: Изд-во Иркутск. ун-та. 165 с.
- Akram H., Yoshida M. (1997). Ultra-fine magnetite/magnetite and their magnetic granulometry in the Late Pleistocene loess-paleosol deposits, Haro River Area, Attock Basin, Pakistan. *Proceedings of Inter-PARMAGS Seminar (1996) “Paleomagnetism of Collision Belts, Recent Progress in Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism”*. № 1. P. 153—197.
- Alexeeva N. V., Erbaeva M. A. (2005). Changes in the fossil mammal faunas of Western Transbaikalia during the Pliocene—Pleistocene boundary and the Early—Middle Pleistocene transition. *Quat. Int.* V. 131. № 1. P. 109—115. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.07.002>.
- An Z. S., Kukla G. J., Porter S. C. et al. (1991). Magnetic susceptibility evidence of Monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130000 years. *Quat. Res.* V. 36. P. 29—36. <https://doi.org/10.1144/SP342.8>
- Banerjee S. K., Hunt C. P., Liu X. M. (1993). Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese loess plateau: A rock-magnetic approach. *Geophys. Res. Lett.* № 20. P. 843—846. <https://doi.org/10.1029/93GL00908>

- Beget J. E., Stone D. B., Hawkins D. B. (1990). Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the late Quaternary. *Geology*. V. 18. № 1. P. 40–43. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0040:pformsv>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0040:pformsv>2.3.co;2)
- Berger A. (1988). Milankovitch theory and climate. *Rev. Geophys.* V. 26. P. 624–657. <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00624>
- Bidegain J. C., Evans M. E., van Velzen A. J. (2005). A magnetoclimatological investigation of Pampean loess, Argentina. *Geophys. J. Int.* V. 160. № 1. P. 55–62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02431.x>
- Bosken J., Obreht I., Zeeden C. et al. (2019). High-resolution paleoclimatic proxy data from the MIS3/2 transition recorded in northeastern Hungarian loess. *Quat. Int.* V. 502. Part A. P. 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.008>
- Brookfield M. E. (2011). Aeolian processes and features in cool climates. Geological Society, London, Special Publications. P. 241–258. <https://doi.org/10.1144/SP354.16>
- Chlachula J., Evans M. E., Rutter N. W. (1998). A magnetic investigation of a Late Quaternary loess/paleosol record in Siberia. *Geophys. J. Int.* V. 132. P. 128–132. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00399.x>
- Chlachula J., Rutter N. W., Evans M. E. (1997). A late Quaternary loess-paleosol record at Kurtak, southern Siberia. *Canadian J. of Earth Sci.* V. 34. P. 679–686. <https://doi.org/10.1139/e17-054>
- Day R., Fuller M., Schmidt V. A. (1977). Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Int.* V. 13. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
- Dearing J., Liningstone I., Zhou L. P. (1996). A late Quaternary magnetic record of Tunisian loess and its climatic significance. *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 2. P. 189–192. <https://doi.org/10.1029/95GL03132>
- Dearing J. A., Dann R. J. L., Hay K. et al. (1996). Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys. J. Int.* V. 124. P. 228–240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>
- Deng C., Zhu R., Verosub K. L. et al. (2004). Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr. *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 109. Iss. B1. 01103. <https://doi.org/10.1029/2003JB002532>
- Ding Z. L., Ranov V., Yang S. L. et al. (2002). The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 200. P. 387–400. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00637-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00637-4)
- Dunlop D. J. (2002). Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c). 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 107. Iss. B3. P. 2046–2067. <https://doi.org/10.1029/2001JB000487>
- Erbajeva M. A. (1998). Late Pliocene Itansinian faunas in Western Transbaikalia. In: *The Dawn of the Quaternary. Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*. V. 60. P. 417–430.
- Erbajeva M. A., Alexeeva N. V. (2000). Pliocene and Pleistocene biostratigraphic succession of Transbaikalia with emphasis on small mammals. *Quat. Int.* V. 68–71. P. 67–75. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00033-1)
- Evans M. E., Heller F. (2003). *Environmental Magnetism*. New York: Academic Press. 299 p.
- Evans T. E., Heller F. (1994). Magnetic enhancement and palaeoclimate: study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophys. J. Int.* V. 117. P. 257–264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03316.x>
- Feng Z.-D., Wang H. B., Olson C. et al. (2004). Chronological discord between the last interglacial paleosol (S1) and its parent material in the Chinese Loess Plateau. *Quat. Int.* V. 117. № 1. P. 17–26. [https://doi.org/10.1016/s1040-6182\(03\)00112-5](https://doi.org/10.1016/s1040-6182(03)00112-5)
- Forster Th., Heller F., Evans M. E. et al. (1996). Loess in the Czech Republic: magnetic properties and paleoclimate. *Stud. Geophys. Geod.* V. 40. P. 243–261. <https://doi.org/10.1007/BF02300741>
- Hao Q., Guo Z. (2005). Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution. *J. Geophys. Res.* V. 110. B12101. <https://doi.org/10.1029/2005JB003765>
- Hayward R. K., Lowell T. V. (1993). Variations in loess accumulation rates in the mid-continent, United States, as reflected by magnetic susceptibility. *Geology*. V. 21. P. 821–824. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0821:VILARI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0821:VILARI>2.3.CO;2)
- Heller F., & Liu T. (1984). Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. Int.* V. 77. № 1. P. 125–141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1984.tb01928.x>
- Hunt C. P., Banerjee S. K., Han J. et al. (1995). Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-paleosol sequences of the western Loess Plateau of China. *Geophys. J. Int.* V. 123. P. 232–244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06672.x>
- Hus J. J., Han J. (1992). The contribution of loess magnetism to the retrieval of past global changes — some problem. *Phys. Earth Planet. Int.* V. 70. № 3–4. P. 154–168. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90178-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90178-X)
- Ivanova V. V., Erbajeva M. A., Shchetnikov A. A. et al. (2019). Tologoi key section: A unique archive for Pliocene-Pleistocene paleoenvironment dynamics of transbaikalia, bikal rift zone. *Quat. Int.* V. 519. № 10. P. 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.004>
- Jie Chen J., Stevens T., Yang T. et al. (2021) Revisiting Late Pleistocene Loess–Paleosol Sequences in the Azov Sea Region of Russia: Chronostratigraphy and Paleoenvironmental Record. *Front. Earth Sci.* V. 9. 808157. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.808157>
- Kazansky A. Y., Shchetnikov A. A., Matasova G. G. et al. (2022). Palaeomagnetic data from the late Cenozoic Tagay section (Olkhon island, Baikal region, Eastern Siberia). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. V. 102. № 4. P. 943–967. <https://doi.org/10.1007/s12549-022-00559-7>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2021). Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.* V. 103. P. 49–73. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>

- Kukla G., Heller F., Liu X.M., et al. (1988). Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*. V. 16. P. 811—814. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0811: PCICDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0811: PCICDB>2.3.CO;2)
- Laag C., Hambach U., Zeeden C. et al. (2021). A Detailed Paleoclimate Proxy Record for the Middle Danube Basin Over the Last 430 kyr: A Rock Magnetic and Colorimetric Study of the Zemun Loess-Paleosol Sequence. *Front. Earth Sci.* V. 9. 9: 600086. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.600086>
- Lisiecki L. E., Raymo M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*. V. 50. № 1. PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004pa001071>
- Liu X. M., Shaw J., Liu T. S. et al. (1992). Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance. *Geophys. J. Int.* V. 108. P. 301—308. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00859.x>
- Liu X. M., Shaw J., Liu T. S. et al. (1993). Magnetic susceptibility of the Chinese loess-paleosol sequence: environmental change and pedogenesis. *J. Geol. Soc.* V. 150. P. 583—588. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.3.0583>
- Maher B. A., Taylor R. M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soil. *Nature*. V. 336. P. 368—370. <https://doi.org/10.1038/336368a0>
- Maher B. A., Thompson R. (1991). Mineral magnetic record of the Chinese loess and palaeosols. *Geology*. V. 19. P. 3—6. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0003: MMROTC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0003: MMROTC>2.3.CO;2)
- Maher B. A. (2011). The Magnetic Properties of Quaternary Aeolian Dusts and Sediments, and Their Palaeoclimatic Significance. *Aeolian Res.* V. 3. P. 87—144. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.01.005>
- Martinson D. G., Pisias N. G., Hays J. D. et al. (1987). Age dating and the orbital theory of the Ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Int.* V. 27. P. 1—29. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90046-9) Berger, 1988.
- Matasova G., Petrovsky E., Jordanova N. et al. (2001). Magnetic study of Late Pleistocene loess/palaeosol sections from Siberia: palaeoenvironmental implications. *Geophys. J. Int.* V. 147. № 2. P. 367—380. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2001.01544.x>
- Matasova G. G., Kazansky A. Yu. (2004). Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/palaeosol deposits along west-central Siberian transect and their palaeoclimatic implications. In: *Magnetic Fabric: Methods and Applications*. Geological Society, London, Special Publications. V. 238. P. 145—173. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.238.01.11>
- Meng X., Derbyshire E., Kemp R. A. (1997). Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess. *Quat. Sci. Rev.* V. 16. P. 833—839. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(97\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(97)00053-X)
- Milanković M. (1930). Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: *Handbuch der Klimatologie*. Bd. 1. Berlin: Borntraeger. S. 176.
- Nawrocki J. (1992). Magnetic Susceptibility of Polish loesses and loess-like sediments. *Geol. Zb. Geol. Carpathica*. V. 43. P. 179—180.
- Nawrocki J., Wojcik A., Bogucki A. (1996). The magnetic susceptibility record in the Polish and western Ukrainian loess-palaeosol sequences conditioned by palaeoclimate. *Boreas*. V. 25. № 3. P. 161—169. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1996.tb00845.x>
- Necula C., Dimofte D., Panaiotu C. (2015). Rock magnetism of a loess-palaeosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophys. J. Int.* V. 202. № 3. P. 1733—1748. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv250>
- Rolph T. C., Shaw J., Derbyshire E. et al. (1989). A detailed geomagnetic record from Chinese loess. *Phys. Earth. Planet. Int.* V. 56. P. 151—164. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90044-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90044-7)
- Schellenberger A., Heller F., Veit H. (2003). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the Las Carreras loess-paleosol sequence in Valle de Tafti, Tucumán, NW-Argentina. *Quat. Int.* V. 106—107. P. 159—167. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00170-2)
- Shackleton N. J., Berger A., Peltier W. R. (1990). An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science*. V. 81. P. 251—261. <https://doi.org/10.1017/s026359330002078>
- Sun J. M., Kohfeld K. E., Harrison S. P. (2000). Records of aeolian dust deposits on the Chinese Loess Plateau during the Late Quaternary. Jena, Germany: Max-Planck — Institute for Biogeochemistry. 318 p.
- Sun J., Liu T. (2000). Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 180. P. 287—296. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00175-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00175-8)
- Taylor S. N., Lacroix F. (2014). Mineral magnetic analysis of the Upper Pleniglacial loess-palaeosol deposits from Nussloch (Germany): An insight into local environmental processes. *Geophys. J. Int.* V. 199. P. 1463—1480.
- Vidic N. J., TenPas J. D., Verosub K. L. et al. (2000). Separation of pedogenic and lithogenic components of magnetic susceptibility in the Chinese loess/palaeosol sequence as determined by the CBD procedure and a mixing analysis. *Geophys. J. Int.* V. 142. P. 551—562. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00178.x>
- Vlag P. A., Oches E. A., Banerjee S. K. et al. (1999). The paleoenvironmental — magnetic record of the Gold Hill Steps loess section in central Alaska. *Phys. Chem. Earth*. V. 24. № 9. P. 779—783. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00114-3)
- Vlaminck S., Kehl M., Rolf C. et al. (2018). Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia — Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran). *Quat. Sci. Rev.* V. 180. № 15. P. 75—95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.010>
- Zhu R. X., Matasova G., Kazansky A., et al. (2003). Rock magnetic record of the last glacial-interglacial cycle from the Kurtak loess section, southern Siberia. *Geophys. J. Int.* V. 152. № 2. P. 335—343. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01829.x>
- Zhu Rixiang, Kazansky A., Matasova G. et al. (2000). Rock-magnetic investigation of Siberia loess and its implication. *Chin. Sci. Bull.* V. 45. № 23. P. 2192—2197. <https://doi.org/10.1007/BF02886328>

ROCK MAGNETIC METHODS IN THE STUDY OF THE LOESS-SOIL SERIES OF EASTERN SIBERIA¹

Yu. Kazansky^{a,b,#}, G. G. Matasova^{b,c}, A. A. Shchetnikov^{b,c,d}, and I. A. Filinov^{b,c,d}

^a Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

^b Geological Institute RAS, Moscow, Russia

^c Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^d Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

[#] E-mail: kazansky_alex@mail.ru

Rock magnetic methods complement geological and granulometric studies of subaerial deposits, allowing to solve relevant and interesting problems in terms of paleogeography. The magnetic characteristics are numerical and provide a reasonable basis for a correct comparison of subaerial deposits among themselves, for a more detailed stratigraphic dissection of sediments and specifying their genesis, for the identification of marker horizons, and for the correlation of the data of different methods. The paper discusses the main mechanisms of formation of the magnetic properties of loess-soil series in different regions ("Chinese" and "Alaskan") and peculiarities in the interpretation of rock magnetic parameters within the framework of different mechanisms. The paleoclimatic informativity of rock magnetic parameters in different physical-geographic settings is analyzed. The fundamental differences in the formation of the magnetic properties of the loess-soil series of Siberia ("Siberian" mechanism) are shown and the principles of paleoclimatic interpretation of rock magnetic data on the basis of more than 40 sections of subaerial complexes of southern Western, Preenisei and Eastern Siberia are developed. Based on changes in rock magnetic parameters, the trend of climatic changes during the quaternary period, which consists in the change from the "pedogenic" mechanism to the "Siberian" one and then to the "Alaskan" one, was revealed using the example of subaerial sediments of Eastern Siberia. This difference in mechanisms may serve as a criterion for diagnosing subaerial deposits of Eopleistocene age.

Keywords: subaerial deposits, magnetic properties, frequency-dependent magnetic susceptibility, magnetic grain size, paleoclimatic interpretation, Baikal region

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Russian Science Foundation Grant № 23-27-00022.

REFERENCES

- Akram H., Yoshida M. (1997). Ultra-fine magnetite/magnetite and their magnetic granulometry in the Late Pleistocene loess-paleosol deposits, Haro River Area, Attock Basin, Pakistan. *Proceedings of Inter-PARMAGS Seminar (1996). Paleomagnetism of Collision Belts, Recent Progress in Geomagnetism, Rock Magnetism and Paleomagnetism*. № 1. P. 153–197.
- Alexeeva N. V., Erbaeva M. A. (2005). Changes in the fossil mammal faunas of Western Transbaikalia during the Pliocene–Pleistocene boundary and the Early–Middle Pleistocene transition. *Quat. Int.* V. 131. № 1. P. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.07.002>
- Alexeeva, N. V. (2005). Evolyutsiya prirodnoi sredy Zapadnogo Zabaikal'ya v pozdnem kainozoe (po dannym fauny melkikh mlekopitayushchikh) [Environmental Evolution of Late Cenozoic of West Transbaikalia (Based on Small Mammal Fauna)]. Moscow: GEOS (Publ.). 14 p. (in Russ.)
- An Z. S., Kukla G. J., Porter S. C. et al. (1991). Magnetic susceptibility evidence of Monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130 000 years. *Quat. Res.* V. 36. P. 29–36. <https://doi.org/10.1144/SP342.8>
- Banerjee S. K., Hunt C. P., Liu X. M. (1993). Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese loess plateau: A rock-magnetic approach. *Geophys. Res. Lett.* № 20. P. 843–846. <https://doi.org/10.1029/93GL00908>
- Bazarov D. B. (1986). Kainozoi Pribaikal'ya i Zapadnogo Zabaikal'ya (Cenozoic of the Baikal Region and Western Transbaikalia). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 182 p.
- Bazarov D. B., Erbaeva M. A., Rezanov I. N. (1976). Geologiya i fauna opornykh razrezov antropogena Zapadnogo Zabaikal'ya (Geology and fauna of reference sections of the Anthropogenic of Western Transbaikalia). Moscow: Nauka (Publ.). 148 p.
- Beget J. E., Stone D. B., Hawkins D. B. (1990). Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the late Quaternary. *Geology*. V. 18. № 1. P. 40–43. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0040:pfoms>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0040:pfoms>2.3.co;2)
- Berger A. (1988). Milankovitch theory and climate. *Rev. Geophys.* V. 26. P. 624–657. <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00624>

¹ For citation: Kazansky A. Yu., Matasova G. G., Shchetnikov A. A., Filinov I. A. (2024). Rock magnetic methods in the study of the loess-soil series of Eastern Siberia. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 2. P. 63–85. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924020036>; <https://elibrary.ru/POGZIG>

- Bidegain J. C., Evans M. E., van Velzen A. J. (2005). A magnetoclimatological investigation of Pampean loess, Argentina. *Geophys. J. Int.* V. 160. № 1. P. 55—62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02431.x>
- Bosken J., Obreht I., Zeeden C. et al. (2019). High-resolution paleoclimatic proxy data from the MIS3/2 transition recorded in northeastern Hungarian loess. *Quat. Int.* V. 502. Part A. P. 95—107. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.008>
- Brookfield M. E. (2011). Aeolian processes and features in cool climates. *Geological Society, London, Special Publications*. P. 241—258. <https://doi.org/10.1144/SP354.16>
- Chlachula J., Evans M. E., Rutter N. W. (1998). A magnetic investigation of a Late Quaternary loess/palaesol record in Siberia. *Geophys. J. Int.* V. 132. P. 128—132. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00399.x>
- Chlachula J., Rutter N. W., Evans M. E. (1997). A late Quaternary loess-paleosol record at Kurtak, southern Siberia. *Canadian J. of Earth Sci.* V. 34. P. 679—686. <https://doi.org/10.1139/e17-054>
- Day R., Fuller M., Schmidt V. A. (1977). Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Int.* V. 13. P. 260—267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
- Dearing J., Liningstone I., Zhou L. P. (1996). A late Quaternary magnetic record of Tunisian loess and its climatic significance. *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 2. P. 189—192. <https://doi.org/10.1029/95GL03132>
- Dearing J. A., Dann R. J. L., Hay K. et al. (1996). Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys. J. Int.* V. 124. P. 228—240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>
- Deng C., Zhu R., Verosub K. L. et al. (2004). Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr. *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 109. Iss. B1. 01103. <https://doi.org/10.1029/2003JB002532>
- Ding Z. L., Ranov V., Yang S. L. et al. (2002). The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 200. P. 387—400. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00637-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00637-4)
- Dunlop D. J. (2002). Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c). 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. V. 107. Iss. B3. P. 2046—2067. <https://doi.org/10.1029/2001JB000487>
- Erbajeva M. A. (1998). Late Pliocene Itansinian faunas in Western Transbaikalia. In: *The Dawn of the Quaternary. Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*. V. 60. P. 417—430.
- Erbajeva M. A., Alexeeva N. V. (2000). Pliocene and Pleistocene biostratigraphic succession of Transbaikalia with emphasis on small mammals. *Quat. Int.* V. 68—71. P. 67—75. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00033-1)
- Erbajeva M. A., Shchetnikov A. A., Kazansky A. Y. et al. (2019). The New Pleistocene Ulan-Zhalga Key Section in Western Transbaikalia. *Doklady Earth Sci.* V. 488. № 3. P. 1035—1038. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1909023X>
- Evans M. E., Heller F. (2003). *Environmental Magnetism*. New York: Academic Press. 299 p.
- Evans T. E., Heller F. (1994). Magnetic enhancement and palaeoclimate: study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophys. J. Int.* V. 117. P. 257—264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03316.x>
- Feng Z.-D., Wang H. B., Olson C. et al. (2004). Chronological discord between the last interglacial paleosol (S1) and its parent material in the Chinese Loess Plateau. *Quat. Int.* V. 117. № 1. P. 17—26. [https://doi.org/10.1016/s1040-6182\(03\)00112-5](https://doi.org/10.1016/s1040-6182(03)00112-5)
- Forster Th., Heller F., Evans M. E. et al. (1996). Loess in the Czech Republic: magnetic properties and paleoclimate. *Stud. Geophys. Geod.* V. 40. P. 243—261. <https://doi.org/10.1007/BF02300741>
- Galanin A. A. Late Quaternary sand covers of Central Yakutia (Eastern Siberia) structure, facies and paleoenvironment significance. *Earth's Cryosphere*. Iss. XXV. № 1. P. 3—34. (in Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20210101>
- Golubtsov V. A., Ryzhov Yu. V., Kobylkin D. V. (2017). Pochvoobrazovanie i osadkonakoplenie v Selenginskom srednegor'e v pozdnelednikov'e i golotsene (Late Glacial and Holocene Soil Formation and Sedimentation in the Selenga Middle Mountains). Irkutsk: Institute of Geography SB RAS (Publ.). 139 p. (in Russ.)
- Guzhikov A. Yu., Shkatova V. K. (2016). On Amendments to the General Magnetostratigraphic Polarity Scale of the Quaternary System. In: *Postanovleniya Mezhdovedstvennogo stratigraficheskogo komiteta i ego postoyannykh komissii*. V. 44. SPb.: VSEGEI (Publ.). P. 35—36. (in Russ.)
- Hao Q., Guo Z. (2005). Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution. *J. Geophys. Res.* V. 110. B12101. <https://doi.org/10.1029/2005JB003765>
- Hayward R. K., Lowell T. V. (1993). Variations in loess accumulation rates in the mid-continent, United States, as reflected by magnetic susceptibility. *Geology*. V. 21. P. 821—824. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0821:VILARI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0821:VILARI>2.3.CO;2)
- Heller F., Liu T. (1984). Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. Int.* V. 77. № 1. P. 125—141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1984.tb01928.x>
- Hunt C. P., Banerjee S. K., Han J. et al. (1995). Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-paleosol sequences of the western Loess Plateau of China. *Geophys. J. Int.* V. 123. P. 232—244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06672.x>
- Hus J. J., Han J. (1992). The contribution of loess magnetism to the retrieval of past global changes — some problem. *Phys. Earth Planet. Int.* V. 70. № 3—4. P. 154—168. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90178-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90178-X)
- Ivanova V. V., Erbajeva M. A., Shchetnikov A. A. et al. (2019). Tologoi key section: A unique archive for Pliocene-Pleistocene paleoenvironment dynamics of transbaikalia, bikal rift zone. *Quat. Int.* V. 519. № 10. P. 58—73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.004>
- Jie Chen J., Stevens T., Yang T. et al. (2021). Revisiting Late Pleistocene Loess — Paleosol Sequences in the Azov Sea Region of Russia: Chronostratigraphy and Paleoenviron-

- mental Record. *Front. Earth Sci.* V. 9. 808157. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.808157>
- Kazansky A. Yu., Kravchinsky V. A., Zykina V. S. et al. (1998). Possibilities of magnetic methods for revealing the climatic signal in loess-soil sections of Siberia. In: *Problemy rekonstruktsii klimata i prirodnoi sredy golotsena i pleistotsena Sibiri*. Novosibirsk: Institut arheologii i etnografii (Publ.). P. 191—202. (in Russ.).
- Kazansky A. Y., Shchetnikov A. A., Matasova G. G. et al. (2022). Palaeomagnetic data from the late Cenozoic Tagay section (Olkhon island, Baikal region, Eastern Siberia). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*. V. 102. № 4. P. 943—967. <https://doi.org/10.1007/s12549-022-00559-7>
- Kazansky A. Yu., Matasova G. G., Shchetnikov A. A. et al. (2022a). The Kitoysky most section is a new type of the Upper Quaternary deposits of Predbaikalia. In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. V. 20. Irkutsk: IZK SB RAS (Publ.). P. 117—119 (in Russ.).
- Kazansky A. Yu., Matasova G. G., Shchetnikov A. A. et al. (2022b). Results of comprehensive studies of the Igteei reference section (Middle Upper Neopleistocene, Predbaikalia). In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. V. 20. Irkutsk: IZK SB RAS Irkutsk (Publ.). P. 119—122. (in Russ.).
- Költringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2021). Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.* V. 103. P. 49—73. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Kukla G., Heller F., Liu X. M. et al. (1988). Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*. V. 16. P. 811—814. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0811: PCICDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0811: PCICDB>2.3.CO;2)
- Laag C., Hambach U., Zeeden C. et al. (2021). A Detailed Paleoclimate Proxy Record for the Middle Danube Basin Over the Last 430 kyr: A Rock Magnetic and Colorimetric Study of the Zemun Loess-Paleosol Sequence. *Front. Earth Sci.* V. 9. 6:600086. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.600086>
- Lisiecki L. E., Raymo M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*. V. 50. № 1. PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004pa001071>
- Liu X. M., Shaw J., Liu T. S. et al. (1992) Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance. *Geophys. J. Int.* V. 108. P. 301—308. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00859.x>
- Liu X. M., Shaw J., Liu T. S. et al. (1993). Magnetic susceptibility of the Chinese loess-paleosol sequence: environmental change and pedogenesis. *J. Geol. Soc.* V. 150. P. 583—588. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.3.0583>
- Maher B. A., Taylor R. M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soil. *Nature*. V. 336. P. 368—370. <https://doi.org/10.1038/336368a0>
- Maher B. A., Thompson R. (1991). Mineral magnetic record of the Chinese loess and palaeosols. *Geology*. V. 19. P. 3—6. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0003: MMROTC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0003: MMROTC>2.3.CO;2)
- Maher B. A. (2011). The Magnetic Properties of Quaternary Aeolian Dusts and Sediments, and Their Palaeoclimatic Significance. *Aeolian Res.* V. 3. P. 87—144. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.01.005>
- Martinson D. G., Pisias N. G., Hays J. D. et al. (1987). Age dating and the orbital theory of the Ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Int.* V. 27. P. 1—29. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90046-9) Berger, 1988;
- Matasova G., Petrovsky E., Jordanova N. et al. (2001). Magnetic study of Late Pleistocene loess/palaeosol sections from Siberia: palaeoenvironmental implications. *Geophys. J. Int.* V. 147. № 2. P. 367—380. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2001.01544.x>
- Matasova G. G., Kazansky A. Yu., Zykina V. S. (2003). Superposition of Alaskan and Chinese models of paleoclimate records in magnetic properties of Upper and Middle Neopleistocene deposits in southern West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*. V. 44. № 7. P. 607—619
- Matasova G. G., Kazansky A. Yu. (2004). Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/palaeosol deposits along west-central Siberian transect and their palaeoclimatic implications. In: *Magnetic Fabric: Methods and Applications*. Geological Society, London, Special Publications. V. 238. P. 145—173. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.238.01.11>
- Matasova G. G., Kazansky A. Yu. (2005). Contribution of paramagnetic minerals to magnetic properties of loess-soil deposits in Siberia and its paleoclimatic implications. *Physics of the Solid Earth*. V. 41. № 9. P. 758—766.
- Matasova G. G., Kazansky A. Y., Shchetnikov A. A. et al. (2020). New rock- and paleomagnetic data on quaternary deposits of the Tologoi key section, western Transbaikalia, and their paleoclimatic implications. *Physics of the Solid Earth*. V. 56. № 3. P. 392—412. <https://doi.org/10.1134/S1069351320030052>
- Matasova G. G., Kazansky A. Yu., Shchetnikov A. A. et al. (2023). The Kuytun Valley as an Exogeodynamic Test Site for the Application of Methodology for Interdisciplinary Research in the Sedimentation Settings of Loess-like Cover Deposits in the Late Pleistocene Transbaikalia. *Geodynamics and Tectonophysics*. V. 14 № 3. Article 0303. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0703> (in Russ.)
- Mats V. D., Pokatilov A. G., Popova S. M. et al. (1982). Pliocen i pleistocen Srednego Baikala (Pliocene and Pleistocene of the Middle Baikal). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 195 p. (in Russ.).
- Medvedev G. I., Vorob'eva G. A. (1987). Igteei, a reference section of Upper Pleistocene subaerial deposits and Paleolithic cultures in southern Eastern Siberia. In: *Geologiya kainozoya yuga Vostochnoi Sibiri*. Irkutsk: Irkutsk Universitet (Publ.). P. 20—21. (in Russ.)
- Medvedev G. I., Saveliev N. A., Svinin V. V. (Eds.). (1990). Stratigrafiya, paleogeografiya i arkhologiya yuga Srednei Sibiri: K XIII Kongressu INKVA (KNR, 1991) [Stratigraphy, Paleogeography, and Archaeology in the South of Middle Siberia: Toward the XIIIth Congress of the INKVA (PRC, 1991)]. Irkutsk: Irkutsk Universitet (Publ.) 165 p. (in Russ.)

- Meng X., Derbyshire E., Kemp R.A. (1997). Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess. *Quat. Sci. Rev.* V. 16. P. 833–839. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(97\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(97)00053-X)
- Milanković M. (1930). Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: *Handbuch der Klimatologie*. Bd. 1. Berlin: Borntraeger. S. 176.
- Nawrocki J. (1992). Magnetic Susceptibility of Polish loesses and loess-like sediments. *Geol. Zb. Geol. Carpathica*. V. 43. P. 179–180.
- Nawrocki J., Wojcik A., Bogucki A. (1996). The magnetic susceptibility record in the Polish and western Ukrainian loess-palaeosol sequences conditioned by palaeoclimate. *Boreas*. V. 25. № 3. P. 161–169. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1996.tb00845.x>
- Necula C., Dimofte D., Panaiotu C. (2015). Rock magnetism of a loess-palaeosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophys. J. Int.* V. 202. № 3. P. 1733–1748. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv250>
- Pokatilov A. G. (2004). Paleontologiya i stratigrafiya kainozoya yuga Vostochnoi Sibiri i sopredel'nykh territorii (Paleontology and stratigraphy of the Cenozoic of the south of East Siberia and adyacent territories). Irkutsk: IrGTU (Publ.). 275p. (in Russ.)
- Rolph T. C., Shaw J., Derbyshire E. et al. (1989). A detailed geomagnetic record from Chinese loess. *Phys. Earth. Planet. Int.* V. 56. P. 151–164. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90044-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90044-7)
- Schellenberger A., Heller F., Veit H. (2003). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the Las Carreras loess–paleosol sequence in Valle de Taft, Tucumán, NW-Argentina. *Quat. Int.* V. 106–107. P. 159–167. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00170-2)
- Shackleton N.J., Berger A., Peltier W.R. (1990). An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science*. V. 81. P. 251–261. <https://doi.org/10.1017/s026359330002078>
- Sun J., Liu T. (2000). Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 180. P. 287–296. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00175-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00175-8)
- Sun J. M., Kohfeld K. E., Harrison S. P. (2000). Records of aeolian dust deposits on the Chinese Loess Plateau during the Late Quaternary. Jena, Germany: Max-Planck — Institute for Biogeochemistry. 318 p.
- Taylor S.N., Lagroix F. (2014). Mineral magnetic analysis of the Upper Pleniglacial loess-palaeosol deposits from Nussloch (Germany): An insight into local environmental processes. *Geophys. J. Int.* V. 199. P. 1463–1480.
- Velichko A. F. (Ed.) (2002). Dinamika landschaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseinov Severnoi Evrazii za poslednie 13 000 let. Atlas-monografiya (Dynamics of landscape components and inland marine basins of Northern Eurasia over the past 13,000 years. Atlas-Monograph). Moscow: GEOS (Publ.). 231 p.
- Vidic N.J., TenPas J.D., Verosub K. L. et al. (2000). Separation of pedogenic and lithogenic components of magnetic susceptibility in the Chinese loess/palaeosol sequence as determined by the CBD procedure and a mixing analysis. *Geophys. J. Int.* V. 142. P. 551–562. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00178.x>
- Vlag P.A., Oches E.A., Banerjee S. K. et al. (1999). The paleoenvironmental-magnetic record of the Gold Hill Steps loess section in central Alaska. *Phys. Chem. Earth*. V. 24. № 9. P. 779–783. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00114-3)
- Vlaminck S., Kehl M., Rolf C. et al. (2018). Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia — Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran). *Quat. Sci. Rev.* V. 180. № 15. P. 75–95. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.010>
- Volkov. I.A. (1971). Pozdnechetvertichnaya subaeral'naya formatsiya (Late Quaternary Subaerial Formation). Moscow: Nauka (Publ.). 254 p. (in Russ.)
- Zhdanova A. I., Kazansky A. Yu., Zol'nikov I.D. et al. (2007). Application of geological and petromagnetic methods to facies-genetic division of subaerial deposits in the Ob' region near Novosibirsk (Ogurtsovo key section). *Russian Geology and Geophysics*. V. 48. № 4. P. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.03.003>
- Zhu R.X., Matasova G., Kazansky A. et al. (2003). Rock magnetic record of the last glacial-interglacial cycle from the Kurtak loess section, southern Siberia. *Geophys. J. Int.* V. 152. № 2. P. 335–343. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01829.x>
- Zhu Rixiang, Kazansky A., Matasova G. et al. (2000). Rock-magnetic investigation of Siberia loess and its implication. *Chin. Sci. Bull.* V. 45. № 23. P. 2192–2197. <https://doi.org/10.1007/BF02886328>