

УДК 551.8+550.384

НОВЫЕ ПЕТРО- И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЧЕТВЕРТИЧНЫМ ОТЛОЖЕНИЯМ ОПОРНОГО РАЗРЕЗА ТОЛОГОЙ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) И ИХ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

© 2020 г. Г. Г. Матасова^{1,3}, А. Ю. Казанский^{2,3}, А. А. Щетников^{3,4,5,7},
М. А. Ербаева⁸, И. А. Филинов^{3,5,6}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

⁴Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁵Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁶Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

⁷Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁸Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

*E-mail: matasovagg@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 11.05.2019 г.

После доработки 14.11.2019 г.

Принята к публикации 19.11.2019 г.

Комплексные исследования, включающие лазерную гранулометрию, петромагнитные и палеомагнитные исследования, выполнены для отложений разреза Тологой (51°44'43.93" с.ш., 107°28'20.93" в.д.), являющегося опорным для позднего кайнозоя Западного Забайкалья. Обобщение петромагнитных и гранулометрических данных позволило детально уточнить стратиграфию разреза и выявить ранее неизвестные горизонты ископаемых почв. По палеомагнитным данным установлено положение магнитопольярной границы Матуяма/Брюнес, что позволило создать возрастную модель формирования отложений разреза. По петромагнитным и гранулометрическим данным разрез отчетливо делится на нижнюю и верхнюю части, формировавшиеся в различных условиях. В верхней части разреза доминировали склоновые процессы, в нижней — эоловые. По данным анизотропии магнитной восприимчивости удалось определить преобладающее направление ветров, направление и угол склона в периоды накопления осадков. Корреляционный анализ всех полученных экспериментальных данных дал возможность оценить положение стратиграфических перерывов. Реконструированные условия накопления осадков позволили восстановить климатические колебания в регионе в течение плейстоцена.

Ключевые слова: лазерная гранулометрия, петромагнитные исследования, стратиграфический перерыв, анизотропия магнитной восприимчивости.

DOI: 10.31857/S0002333720030059

ВВЕДЕНИЕ

Разрез Тологой (51°44'43.93" с.ш., 107°28'20.93" в.д.), открытый А.П. Окладниковым в 1951 г. и впервые описанный В.И. Бибиковой с соавторами [Бибикова и др., 1953], до сих пор привлекает внимание исследователей как опорный разрез для всей Восточной Сибири (рис. 1), поскольку он содержит наиболее полную последовательность континентальных отложений от начала позднего плиоцена до голоцена (здесь и далее временные интервалы даны по шкале из работы [Pilans, Gibbard, 2012] в соответствии с сопоставлениями разреза в работе [Ivanova et al., 2019]). Многолетние исследования разреза [Равский и др., 1964; Иваньев, 1966; Базаров, 1986] позволили выделить основные лито-

стратиграфические подразделения и установить плиоцен-четвертичный возраст отложений. На основе собранной представительной коллекции мелких млекопитающих была восстановлена последовательность развития биоты с плиоцена до голоцена [Ербаева, 1970; Erbajeva, Alexeeva, 2000; Алексеева, 2005]. Первые палеомагнитные и петромагнитные исследования зафиксировали положение границы Матуяма/Брюнес в средней части разреза [Гнибиденко и др., 1976]. Исследования последних лет предоставили новую информацию об образовании и структуре ископаемых почв голоцена и позднего плейстоцена, впервые получен ряд абсолютных датировок [Zech et al., 2017]. Проведены подробные исследования грануло-

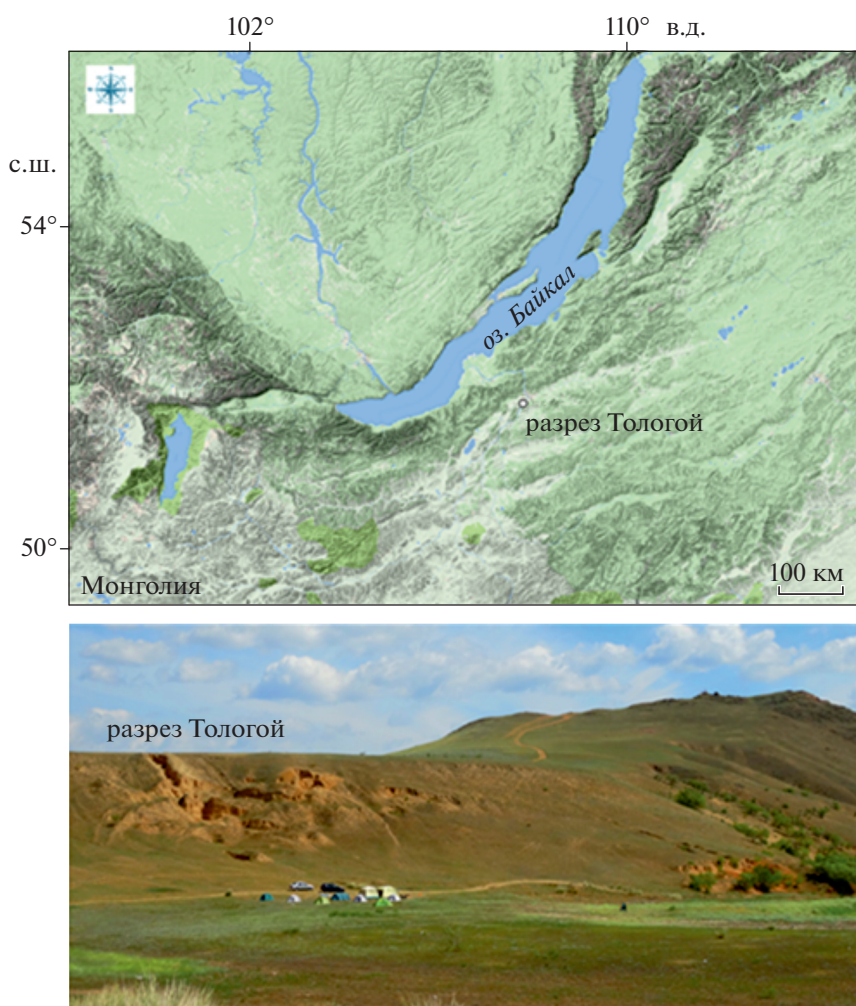


Рис. 1. Географическое положение разреза Тологой и общий вид горы Тологой.

метрического и химического состава отложений, что позволило реконструировать климатические колебания по геохимическим индикаторам [Ivanova et al., 2019].

Литологический тип рыхлых отложений определяется их гранулометрическим составом, который в первом приближении может быть оценен в ходе визуальной диагностики осадков в полевых условиях “на глаз и на ощупь” [Зольников, 1998]. Однако современные методы определения гранулометрического состава с помощью лазерных компьютеризированных анализаторов частиц (лазерная гранулометрия) позволяют уточнить фракционный состав осадков в объемных процентах и дают возможность диагностировать смешанные литологические типы. Эти уточнения очень важны в тех случаях, когда, например, почвообразовательные процессы развиваются по песчаным отложениям. Здесь, при низкой интенсивности педогенеза, глинистый компонент, характерный для почвенных образований,

может быть не замечен без инструментальных исследований, и, таким образом, в строении разреза могут быть пропущены реперные горизонты и нарушена стратиграфическая последовательность. Именно такая картина наблюдается в разрезе Тологой, где наличие двух верхних ископаемых почв было обнаружено в результате обработки и интерпретации данных лазерной гранулометрии. Впоследствии существование этих почвенных горизонтов было подтверждено геохимическими исследованиями [Ivanova et al., 2019]. Поэтому в данной работе использовано уточненное литостратиграфическое расчленение разреза, составленное с учетом гранулометрических и геохимических данных (рис. 2—рис. 5).

Неотъемлемым атрибутом современных публикаций по четвертичным отложениям являются петромагнитные данные. “Магнетизм окружающей среды (environmental magnetism)” — активно развивающееся в последние десятилетия направление — изучает петромагнитные характеристики

осадочных горных пород в контексте изменений окружающей среды и климата [Evans, Heller., 2003; Tauxe, 2010; Liu et al., 2012; и др.]. Применение современных методов, методик и аппаратуры для изучения магнитных свойств рыхлых отложений дает новую детальную информацию о строении разреза, генезисе отложений и изменениях их магнитных свойств под влиянием флуктуаций климата. Отложения разреза Тологой с этой точки зрения коллектив авторов начал изучать с 2016 г., результаты исследований представлены в данной работе.

Целью исследований являлось получение детальной петромагнитной характеристики отложений разреза Тологой, верификация палеомагнитных данных и на их основе, с привлечением ранее опубликованных гранулометрических данных, построение возрастной модели, реконструкция условий осадконакопления и климата для плейстоценового интервала разреза Тологой.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Разрез Тологой расположен в Иволгинской впадине на левом берегу р. Селенги, к юго-западу от г. Улан-Удэ (рис. 1). Комплекс существенно облессованных плиоцен-четвертичных отложений здесь вскрывается в уступе врезанной меандры в подошве педиментированной гранитной горы Тологой. По палеонтологическим данным в разрезе выделяются верхний плиоцен, нижний, средний и верхний плейстоцен [Алексеева, 2005]. Характерной особенностью всех отложений является наличие серии погребенных почвенных горизонтов.

Поздний плиоцен в Тологойском разрезе был установлен по палеонтологическим данным, прежде всего по наличию в отложениях остатков гиппарионовой фауны [Равский и др., 1964; Базаров, 1986]. Но в данной статье отложения нижней части разреза не рассматриваются (это предмет дальнейших исследований).

Нижне-средний плейстоцен сложен супесью палево-серой, местами бурой, плотной, с линзами и прослоями грубозернистого песка и гравия. В основании толщи встречаются руководящие формы кудунской микротериофауны, позволяющие отнести основание толщи к раннему плейстоцену. Выше залегают отложения, содержащие представителей тологойского фаунистического комплекса среднего плейстоцена [Алексеева, 2005]. Согласно работе [Гнибиденко и др., 1976], в этой части разреза фиксируется магнитная граница Матуяма/Брюнес.

Верхний плейстоцен сложен палево-серыми, серыми песками и супесями с включениями тонкого гравия и разнозернистых песков. Здесь

встречены немногочисленные остатки мелких млекопитающих обитателей холодных перигляциальных степей позднего плейстоцена [Алексеева, 2005].

В детально исследованной петромагнитным и палеомагнитным методами плейстоценовой части разреза, мощностью 20 м, выделены слои №№ 1–12 (рис. 2–рис. 5), нумерация сверху вниз. Слой 1 – современная почва. В слоях 3, 5, 7, 9, 11 фиксируется последовательность разной степени зрелости погребенных почв. По гранулометрическому составу отложений почвы представлены средним–легким суглинком. Межпочвенные слои 2, 4, 6, 8, 10, 12 сложены облессованными песками и супесями. Песчаные слои характеризуются плохой степенью сортировки материала, наличием гравелистых включений. Супеси имеют волнистую и линзовидную слоистость. Слой 6 сильно карбонатизирован и криотурбирован. Взаимоотношение слоев, за исключением ясно различимых бурых, обогащенных гумусом, нижних погребенных почв (слои 7, 9, 11), плохо выраженное, границы, как правило, градиентные, неясные.

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Для палеомагнитных исследований из свежезачищенной стенки обнажения были отобраны 89 образцов (со средним интервалом 23 см), ориентированных с помощью магнитного и солнечного компасов. Для изучения магнитных свойств отобрано 200 неориентированных проб через 10 см. Все измерения образцов выполнены в Палеомагнитном центре ИНГГ СО РАН. Гранулометрические исследования были проведены “образец в образец” с петромагнитными измерениями. Методика и результаты гранулометрических исследований детально изложены в работе [Казанский и др., 2018; Ivanova et al., 2019]. Некоторые гранулометрические характеристики приведены здесь для подтверждения оснований для корреляционного анализа между различными свойствами осадков.

Палеомагнитные измерения были выполнены по стандартной методике [Tauxe, 2010] на криогенном магнетометре 2G Enterprise 755R, ступенчатое размагничивание переменным полем проводилось с помощью встроенной в магнетометр установки с шагом 5–8 до 90 мТл. На каждом шаге измерялось величина и направление вектора естественной остаточной намагниченности NRM. Интерпретация результатов размагничивания выполнялась с помощью стандартных алгоритмов [Zijderveld, 1967; Fisher, 1953; Kirshvink, 1980], реализованных в пакете прикладных программ [Enkin, 1994].

Каппабридж MFK1-FA использовался для измерения величины магнитной восприимчивости

(X) и ее анизотропии (АМВ). Количественными оценками АМВ являются степень анизотропии P' , эллипсоид магнитной анизотропии, характеризующийся направлением и величиной главных осей ($K1$ — максимальная, $K3$ — минимальная, $K2$ — средняя), и параметр T , определяющий форму эллипсоида анизотропии [Tarling, Hrouda, 1993]. Распределение главных осей АМВ определяет магнитную текстуру отложений.

Различные виды намагниченности (индуктивная намагниченность J_i , остаточная намагниченность насыщения J_{rs} , намагниченность насыщения ферромагнетиков J_{fer} , намагниченность парамагнетиков J_{par} и коэрцитивные характеристики (коэрцитивная сила B_c и остаточная коэрцитивная сила B_{cr}) изучались на коэрцитивном спектрометре J -meter в максимальном поле 700 мТл [Jasopov et al., 1998]. При измерении магнитного гистерезиса оценивалось присутствие суперпарамагнитных (СПМ) зерен, для их характеристики использовались параметры $J_{rm}-J_{rs}$ и X_{sp} (разница величин J_{rs} при максимальном и нулевом значениях намагничивающего поля и наклон кривой спада J_{rs} в интервале 10–0 мТл соответственно [Kosareva et al., 2015]). Значения X_{par} , J_{par} , X_{sp} , J_{fer} и $J_{rm}-J_{rs}$ определялись при помощи специализированной программы “ $XParJm$ ” П.Г. Ясонова, входящей в комплект программного обеспечения к коэрцитивному спектрометру. Следует отметить, что X_{par} (J_{par}) представляет собой сумму парамагнитной и диамагнитной составляющих в образце. Кроме того, искажения в определении величины X_{par} может вносить наличие магнитожестных зерен гематита или грейгита, не достигающих насыщения в полях 700 мТл. Однако в исследуемых осадках, судя по значениям B_{cr} , содержание таких зерен невелико.

Различные соотношения магнитных параметров использовались для уточнения и детализации магнитных свойств: показатели магнитной жесткости $S = J_{rs(-300)}/J_{rs}$, $HIRM = (J_{rs(-300)} + J_{rs})/2$, где: $J_{rs(-300)}$ — величина намагниченности обратным полем 300 мТл; J_{par}/J_i — вклад парамагнетиков в общий магнетизм осадков; B_{cr}/B_c vs J_{rs}/J_{fer} — оценка доменного состояния (ДС) магнитных зерен; X/J_{rs} — оценка эффективного размера магнитного зерна. Интерпретация петромагнитных параметров проведена по общепринятым методикам [Evans, Heller, 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Петромагнитные исследования

Петромагнитные параметры условно были разделены на три группы:

1) концентрационно-зависимые, т.е. зависящие, главным образом, от концентрации магнитных минералов (магнитная восприимчивость X , и

ее ферримагнитная часть X_{fer} , индуктивная намагниченность J_i и ее ферримагнитная часть J_{fer} , остаточная намагниченность насыщения J_{rs} и парамагнитная часть намагниченности J_{par});

2) зависящие от состава магнитной фракции. Эта группа включает коэрцитивные параметры, оценивающие содержание антиферромагнетиков (т.е. магнитожестных минералов типа гетита/гематита) по “жесткой” части намагниченности — $HIRM$ и соотношение магнитомягких и магнитожестных минералов по параметру S , а также величины коэрцитивных сил B_c и B_{cr} ;

3) структурно-чувствительные, т.е. чувствительные к магнитным зернам разных размеров. В эту группу входят расчетные характеристики: B_{cr}/B_c , X_{fer}/J_{rs} , $(J_{rm}-J_{rs})$, X_{sp} и X_{fer}/J_{fer} . Первые две характеристики оценивают доменное состояние и эффективный размер магнитного зерна и чувствительны к разным размерам частиц. Последние три параметра позволяют судить о наличии суперпарамагнитных (СПМ) зерен (<0.03 мкм), имеющих в большинстве своем аутигенное происхождение.

Характер изменения петромагнитных параметров по разрезу (рис. 2—рис. 5) позволяет разделить его на две части — верхнюю (слои 1–6) и нижнюю (слои 7–12), магнитные свойства отложений в которых различаются, поэтому анализ поведения магнитных характеристик проводился как по разрезу в целом, так и отдельно для верхней и нижней его частей.

Концентрационные параметры X , X_{fer} , J_i и J_{fer} синхронно изменяются по разрезу, по величине в 3–5 раз (рис. 2). Несмотря на резкие колебания, средние значения этих параметров для горизонтов ископаемых почв, в целом, в 1.2–1.5 раза ниже, чем для разделяющих их супесчаных и песчаных толщ. Для сравнения приведено изменение динамического фактора F , представляющего собой отношение количества физического песка (сумма фракций >50 мкм) в объемных процентах к количеству физической глины (<50 мкм) в отложениях. Значения F около 1 и менее указывают на уменьшение поступления обломочного материала и преобладание постседиментационных процессов *in situ*, что характерно для периодов формирования почв. Интервалы низких значений F и низких значений концентрационно-зависимых параметров хорошо согласуются.

Изменения J_{rs} в верхней части разреза синхронны изменениям концентрационных параметров, но в нижней части эта синхронность нарушается. В среднем величины J_{rs} в слоях 7–12 в 1.6 раза выше, чем в слоях 1–6, и их максимальные значения приурочены к горизонтам ископаемых почв, в отличие от других концентрационных характеристик.

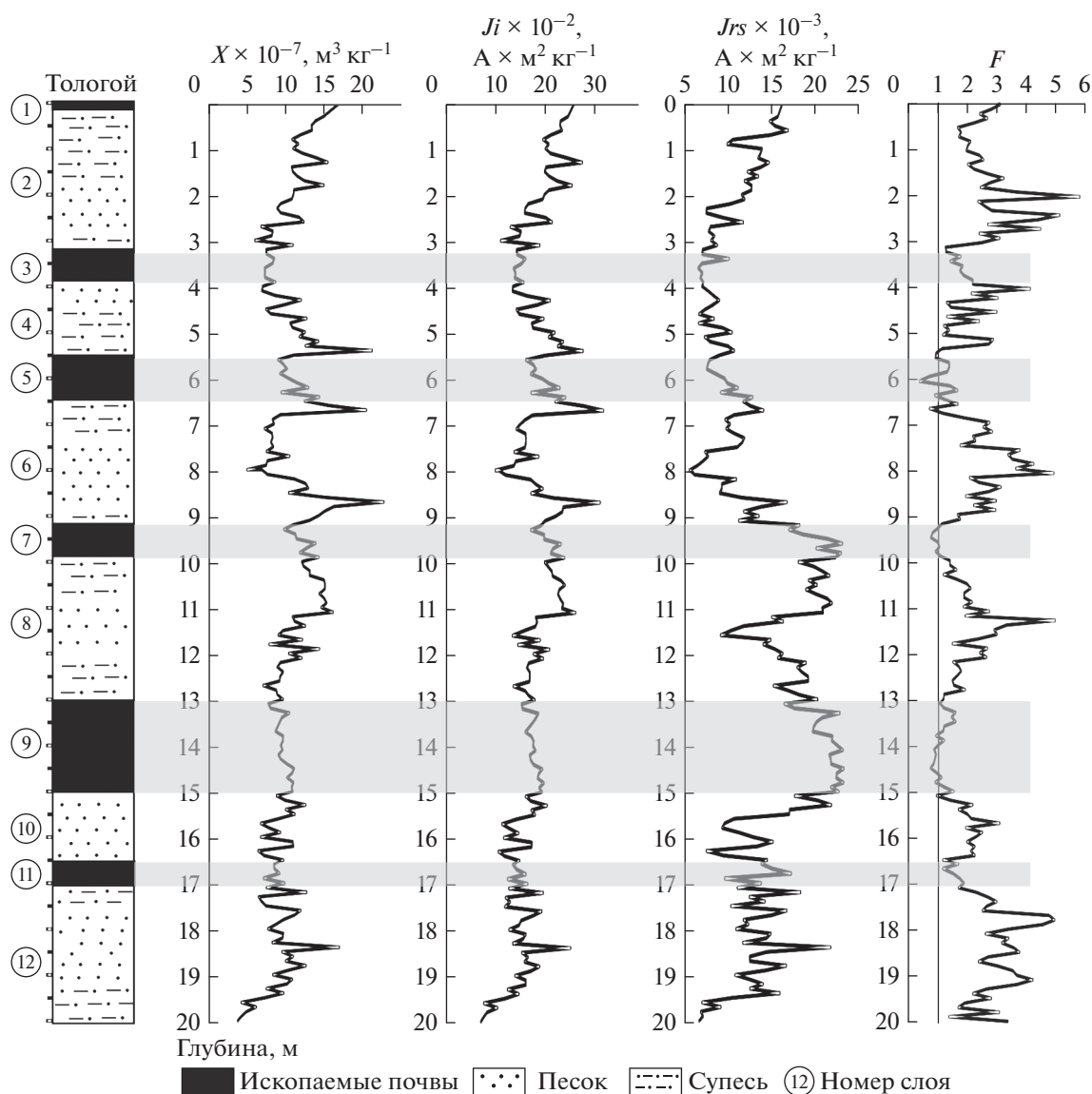


Рис. 2. Литологическая колонка и концентрационно-зависимые магнитные характеристики отложений разреза Тологой, F – динамический фактор.

Вклад парамагнитных минералов в общий магнетизм отложений варьирует от 2.5 до 30% (рис. 3). В нижней части разреза средние значения J_{par} в 1.5 раза больше, чем в верхней. Наибольший вклад парамагнетиков отмечается в ископаемых почвах (20–30%), но встречаются и отдельные прослои песка и супесей с такой же высокой парамагнитной компонентой (15–30%). За исключением этих прослоев, в песках и супесях вклад парамагнетиков менее 15%. Концентрация парамагнитных минералов возрастает, в основном, в почвенных горизонтах с повышенным содержанием илистой фракции (<2 мкм), что, вероятно, связано с более глинистым составом ископаемых почв.

Коэрцитивные параметры, оценивающие содержание антиферромагнетиков (т.е. магнито-жестких минералов типа гетита/гематита) по “жесткой” части намагниченности – $HIRM$, а также величины коэрцитивных сил B_c и B_{cr} однозначно указывают на увеличение магнитной жесткости в нижней части разреза по сравнению с верхней частью (особенно по значениям $HIRM$ и B_c) (рис. 4).

По значениям структурно-чувствительных параметров X_{fer}/J_{rs} в верхней части разреза магнитные зерна имеют больший размер, чем в нижней, где наиболее низкие значения X_{fer}/J_{rs} и их минимальный разброс наблюдаются в ископаемых почвах (рис. 5). Параметры ($J_{rm}-J_{rs}$), X_{sp}

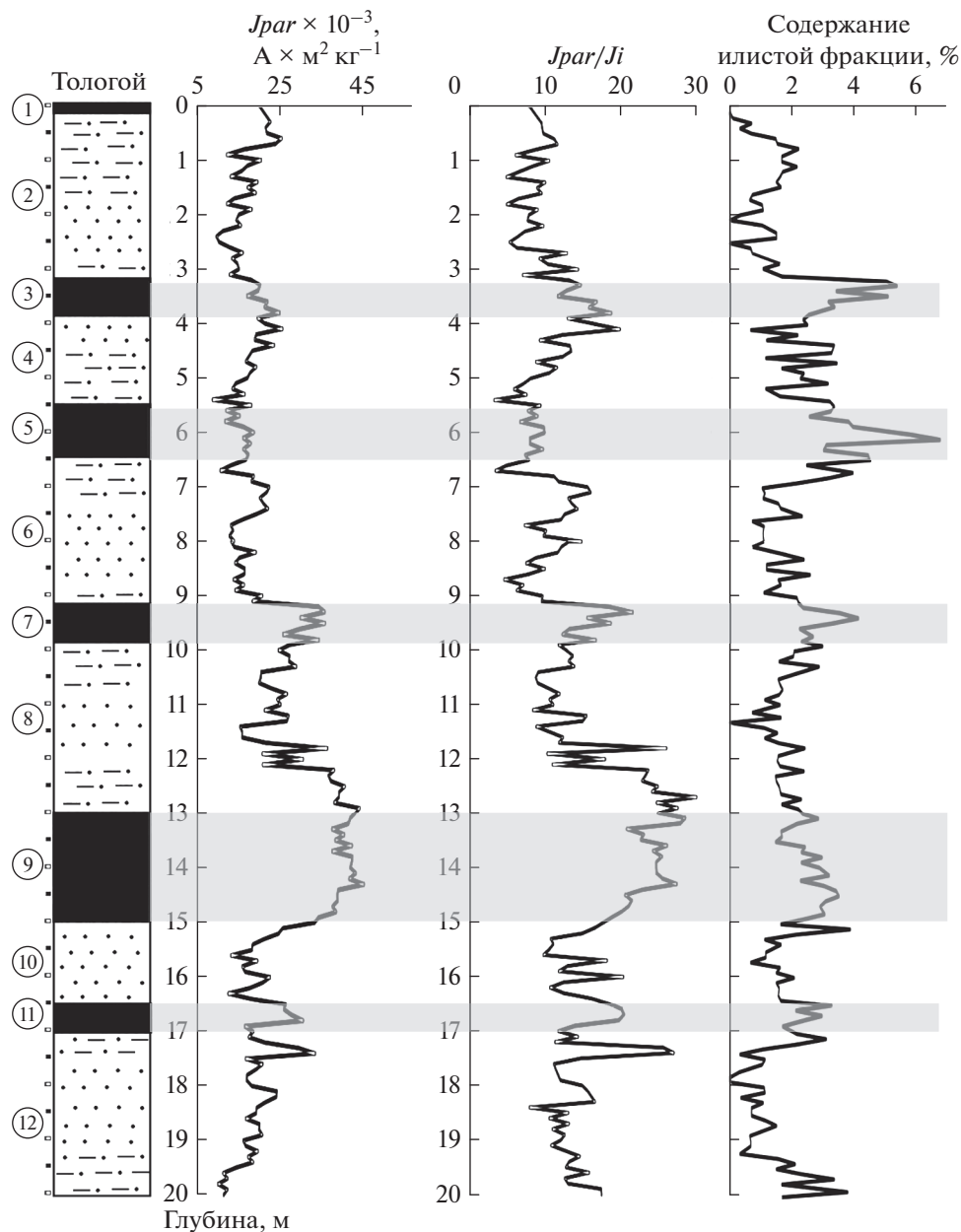


Рис. 3. Парамагнитные характеристики и содержание илистой фракции в отложениях разреза Тологой.

и X_{fer}/J_{fer} свидетельствуют о том, что содержание СПМ зерен, напротив, в верхней части разреза существенно меньше, чем в нижней (по значениям всех трех параметров), при этом, изменения ($J_{rm}-J_{rs}$), X_{sp} и X_{fer}/J_{fer} в верхней части разреза подобны поведению концентрационно-зависимых параметров, а в нижней части — подобны изменениям J_{rs} (ср. рис. 2 и рис. 5).

Кроме вышеупомянутых параметров, размеры зерен косвенно оцениваются через их доменное состояние (ДС), определяемое графическим способом по диаграмме B_{cr}/B_c vs J_{rs}/J_{fer} [Day et al., 1977; Dunlop, 2002]. В верхней части разреза (слои

1–6) магнитная фракция отложений состоит из многодоменных (МД) зерен, их распределение имеет сильно вытянутую форму (рис. 6в). В ископаемой почве (слой 9) и вмещающих слоях доля однодоменных (ОД) зерен достигает 20%, распределение зерен компактно (рис. 6д). В нижней части разреза и в слоях 7–8 количество ОД зерен варьирует в пределах 10–15%, распределение имеет вытянутую, но компактную форму (рис. 6г), т.е. диапазон магнитных зерен по размерам значительно уже, чем в верхней части разреза. Некоторое отличие точек на графиках от теоретической кривой, вероятно, обусловлено присутствием магнито-

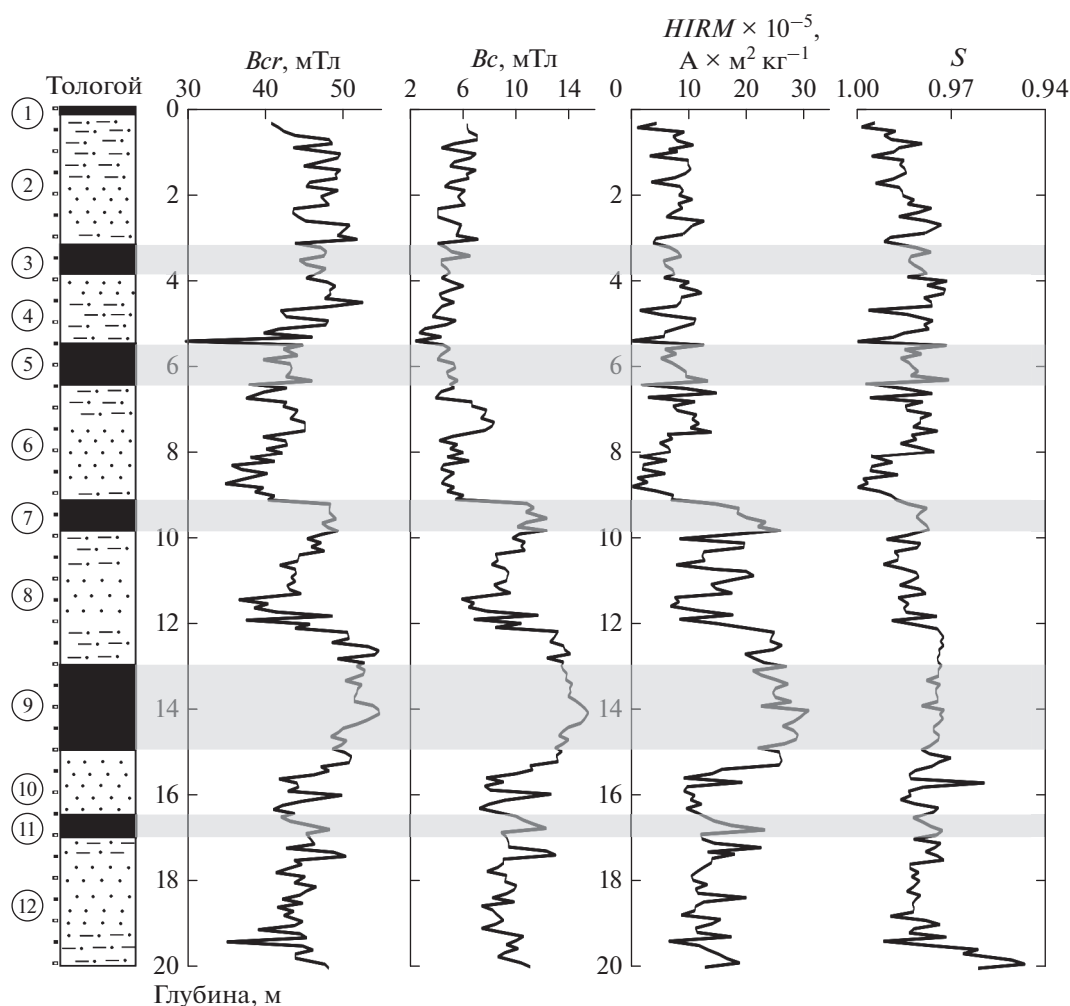


Рис. 4. Коэрцитивные характеристики и параметры магнитной “жесткости” отложений разреза Тологой.

жестких минералов, о чем косвенно свидетельствует высокая отрицательная корреляция между параметрами $HIRM$ и B_c/B_{cr} , а также между $HIRM$ и X_{fer}/J_{rs} (табл. 1). Здесь же, на рис. 6а, 6б, приведены типичные примеры петель (полупетли) гистерезиса для образцов почв и вмещающих отложений в верхней и нижней частях разреза, из которых видно существенное различие гистерезисных характеристик этих частей.

Взаимосвязи между петромагнитными параметрами

Для выяснения наиболее значимых взаимосвязей, определяющих сложное и неоднозначное поведение магнитных характеристик по разрезу, был проведен детальный корреляционный анализ всех изученных параметров. Значимые коэффициенты корреляции между различными петромагнитными характеристиками представлены в табл. 1. Прежде всего, следует отметить высокую

корреляцию ($r > 0.8$) между параметрами, характеризующими одни и те же магнитные свойства осадков – концентрацию ферромагнетиков (X , J_i , X_{fer} , J_{fer}), содержания СПМ частиц в осадке ($(J_{rm}-J_{rs})$ и X_{sp}) и размеры магнитных зерен (B_c/B_{cr} , J_{rs}/J_s и X_{fer}/J_{rs}). Это устойчивые зависимости, одинаково сильные как в верхней, так и в нижней частях разреза (табл. 1).

Концентрационные параметры обнаруживают сильные положительные корреляционные связи с содержанием СПМ и ОД зерен, при этом коэффициенты корреляции для верхней части разреза несколько выше, чем для нижней. Наблюдается слабая обратная корреляция с коэрцитивными параметрами (с параметром S – прямая) и слабая прямая с размером магнитного зерна. Эти связи сохраняются для обеих частей разреза. Поскольку ферромагнитная фракция в разрезе представлена, главным образом, крупными магнитомягкими зёрнами, то изменение концентрационно-зависимых параметров происходит именно за счет из-

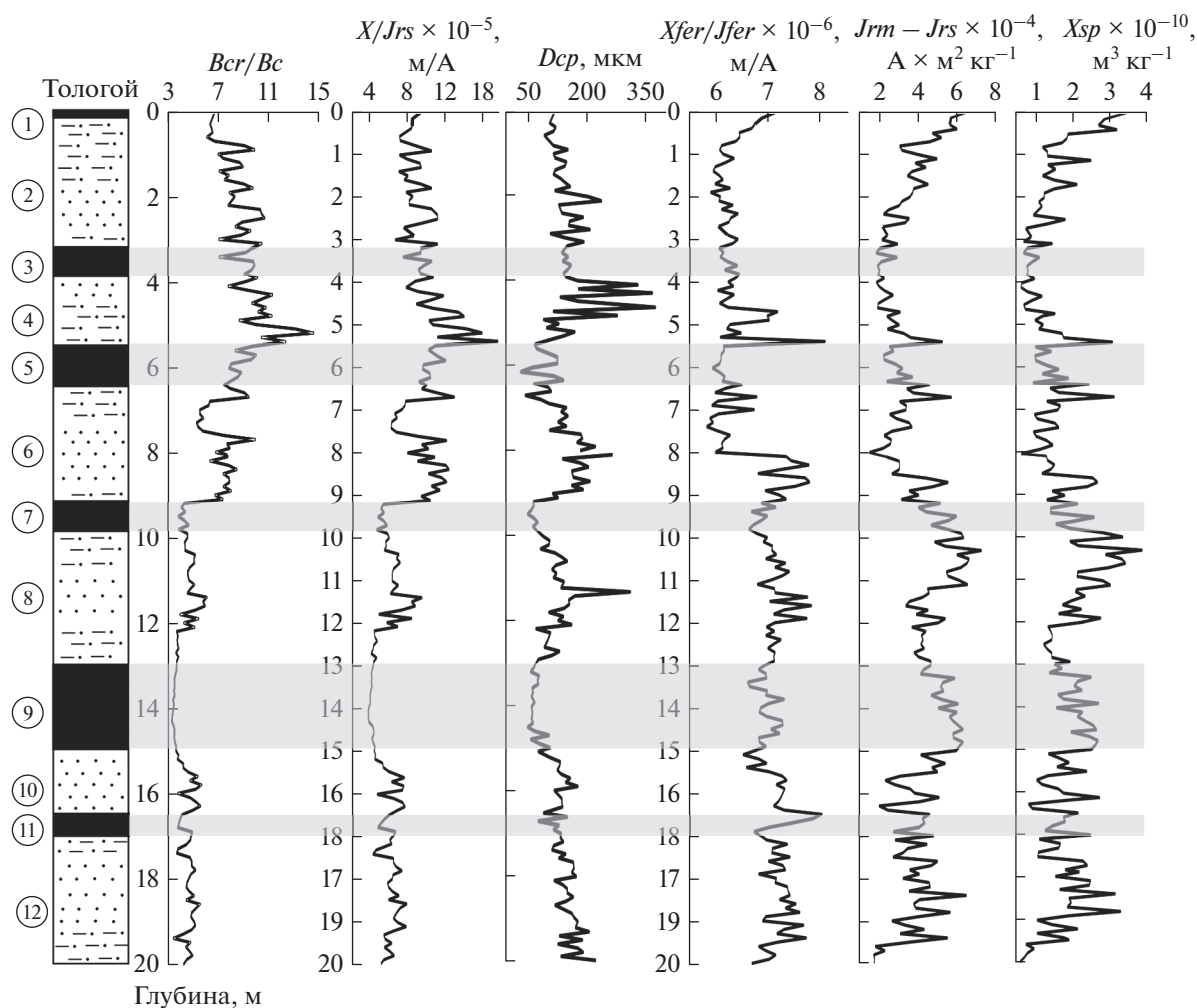


Рис. 5. Структурно-чувствительные магнитные характеристики и средний размер обломочного зерна (D_{cp}) в отложениях разреза Тологой.

менения содержания магнитомягких и СПМ зерен. Параметр J_{rs} в верхней части разреза слабо ($r < 0.5$) коррелирует с B_c (прямая корреляция) и с параметрами доменного состояния (обратная с B_{cr}/B_c). В нижней части эти связи усиливаются ($r > 0.5$), и появляются новые сильные прямые корреляции с J_{par} , B_{cr} , $HIRM$ и сильная обратная с X_{fer}/J_{rs} .

Содержание парамагнитной фракции в нижней части значимо (r до 0.6) коррелирует с коэрцитивными параметрами B_c и B_{cr} (прямая) и с параметрами B_{cr}/B_c и X_{fer}/J_{rs} (обратная). В нижней части эти связи существенно усиливаются (r до 0.88), появляются новые зависимости с $(J_{rm} - J_{rs})$ и $HIRM$.

Индикаторы СПМ частиц, кроме упомянутых выше корреляционных связей с концентрационно-зависимыми параметрами, в верхней части разреза демонстрируют значимые обратные корреляции с коэрцитивными параметрами B_{cr} и

$HIRM$ и значимую прямую корреляцию с S . В нижней части разреза, наоборот, $(J_{rm} - J_{rs})$ прямо коррелирует с B_c и $HIRM$ и обратно с B_{cr}/B_c , X_{fer}/J_{rs} и S .

Коэрцитивные параметры (кроме S) прямо коррелируют между собой, при этом коэффициенты корреляции в нижней части разреза существенно выше, чем в верхней части. Для S корреляционные связи обратные и, напротив, сильнее выражены для нижней части разреза. Большинство коэрцитивных параметров в верхней части разреза значимо коррелируют с концентрационными и СПМ параметрами (обратная корреляция) и с J_{par} и J_{rs} (прямая корреляция). В нижней части разреза значимые корреляционные связи с концентрационно-зависимыми параметрами исчезают, а с J_{par} и J_{rs} , наоборот, усиливаются. Сильные обратные корреляции обнаружены у B_c с B_{cr}/B_c и B_c с X_{fer}/J_{rs} в верхней части разреза, в нижней части разреза такая же сильная связь про-

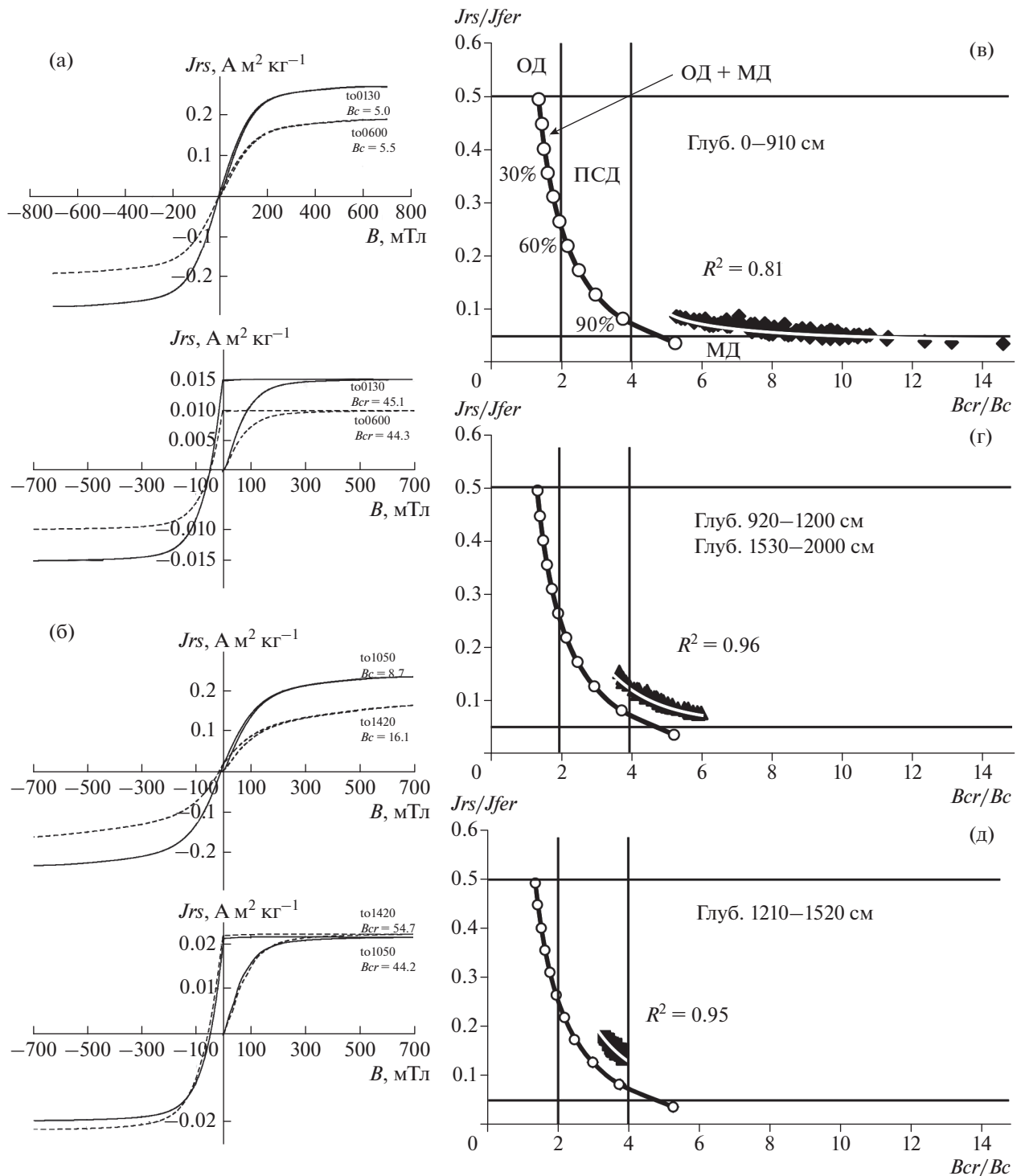


Рис. 6. Типичные кривые магнитного гистерезиса для образцов из верхней части (а) и нижней части (б) разреза Тологой. Пунктирная кривая — палеопочвы, сплошная кривая — вмещающие отложения. Номера образцов соответствуют глубине. Графическое определение доменного состояния магнитных частиц в отложениях разреза Тологой (в), (г), (д), описание в тексте.

является уже между всеми коэрцитивными (кроме S) параметрами и B_{cr}/B_c и X_{fer}/J_{rs} .

Параметры X_{fer}/J_{rs} и B_{cr}/B_c , зависящие от размеров ферромагнитных зерен и их доменного со-

стояния, тесно ($r > 0.9$) коррелируют между собой как в верхней, так и в нижней части разреза. Это означает, что данные отношения оптимально чувствительны к одним и тем же популяциям зе-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между основными магнитными параметрами

		Нижняя часть разреза (при $r > 0.25$ корреляции, значимые на уровне 99%)												
		<i>Xfer</i>	<i>Jrs</i>	<i>Jfer</i>	<i>Jpar</i>	<i>Xsp</i>	<i>Jrm-Jrs</i>	<i>Bc</i>	<i>Bcr</i>	<i>Bcr/Bc</i>	<i>Jrs/Jfer</i>	<i>S</i>	<i>HIRM</i>	<i>Xfer/Jrs</i>
Верхняя часть разреза (при $r > 0.2$ корреляции значимые на уровне 99%)	<i>Xfer</i>		0.57	0.99		0.71	0.72	−0.31	−0.32	0.29	−0.33	0.68		0.33
	<i>Jrs</i>	0.70		0.63	0.73	0.59	0.89	0.59	0.51	−0.58	0.56		0.70	−0.56
	<i>Jfer</i>	0.96	0.74			0.72	0.75				−0.28	0.64		
	<i>Jpar</i>						0.51	0.88	0.80	−0.79	0.87		0.79	−0.80
	<i>Xsp</i>	0.79	0.69	0.73			0.87					0.67		
	<i>Jrm-Jrs</i>	0.81	0.90	0.81		0.93		0.32		−0.35	0.31	0.52	0.35	−0.30
	<i>Bc</i>	−0.34	0.38	−0.30	0.59				0.93	−0.94	0.99	−0.39	0.84	−0.97
	<i>Bcr</i>	−0.52		−0.38	0.37	−0.53	−0.33	0.38		−0.80	0.88	−0.44	0.80	−0.90
	<i>Bcr/Bc</i>		−0.44		−0.44			−0.89			−0.94	0.35	−0.78	0.98
	<i>Jrs/Jfer</i>	−0.32	0.38	−0.31	0.60			0.97	0.36	−0.86		−0.39	0.82	−0.95
	<i>S</i>	0.60	0.48	0.49		0.75	0.69		−0.56				−0.49	0.42
	<i>HIRM</i>					−0.48		0.28	0.53			−0.83		−0.81
	<i>Xfer/Jrs</i>	0.48		0.39	−0.55			−0.92	−0.58	0.79	−0.90		−0.37	

Примечание. Прямой шрифт – сильная зависимость; наклонный шрифт – слабая зависимость.

рен, составляющих магнитную фракцию отложенный разреза Тологой. В нижней части разреза наблюдается довольно тесная связь между магнитным ($Xfer/Jrs$, Bcr/Bc) и обломочным размером (D_{cp}) зерна ($r = 0.65–0.67$), тогда как в верхней части она полностью отсутствует. Как уже отмечалось выше, существует слабая прямая корреляция $Xfer/Jrs$ и Bcr/Bc с концентрационно-зависимыми параметрами и высокая с параметрами Jrs , $Jpar$, параметрами магнитной жесткости и содержанием СПМ зерен. При этом корреляционные связи в верхней части разреза, как правило, слабее, чем в нижней части, вплоть до незначимых значений (табл. 1).

Суперпарамагнитные характеристики ($Jrm-Jrs$) и Xsp обнаруживают сильную корреляционную связь ($r = 0.87–0.93$) как по всему разрезу, так и для отдельных его частей, тогда как корреляция с $Xfer/Jfer$ существенно слабее ($r = 0.32–0.49$) и заметна только для всего разреза в целом и, в меньшей степени, для его верхней части. Поскольку эти параметры фиксируют суперпарамагнитные частицы различных размеров, их корреляционные связи с параметрами других групп отличаются.

Поскольку значения параметра S уменьшаются с ростом доли магнитомягких минералов, то он связан с $HIRM$, Bcr и Bc обратной зависимостью. При этом в верхней части разреза связи между параметрами сильнее, чем в нижней части, за исключением параметра Bc , с которым в верхней части разреза корреляция S незначима (табл. 1).

Взаимосвязи между гранулометрическим составом и петромагнитными параметрами

Значимые коэффициенты корреляции между гранулометрическими и петромагнитными ха-

рактеристиками представлены в табл. 2. Очевидно, что для петромагнитных параметров, характеризующих эффективные размеры магнитного зерна и его доменное состояние, наблюдается значимая прямая корреляция с содержанием песчаной фракции (>100 мкм) и со средним размером обломочного зерна. Для остальных параметров (кроме $Xfer$, Ji и S) эта корреляция обратная.

Для алевритовой фракции (10–100 мкм) картина полностью противоположная: значимая обратная корреляция наблюдается с параметрами, характеризующими размер и ДС магнитных зерен, для остальных параметров (кроме $Xfer$, Ji и S) эта корреляция прямая. Более тесная связь наблюдается с фракцией крупного алеврита (50–100 мкм); значения коэффициентов корреляции с фракцией мелкого алеврита (10–50 мкм) существенно ниже.

Раздельный анализ корреляционных связей для верхней и нижней частей разреза показал, что в верхней части разреза все корреляционные связи сохраняются, но коэффициенты корреляции здесь ниже, чем в целом по разрезу. Связь петромагнитных параметров (за исключением $Jpar$) с крупноалевритовой фракцией существенно сильнее, чем с мелкоалевритовой.

Для нижней части разреза корреляция петромагнитных параметров с содержанием алевритовой фракции наиболее высокая (r до 0.9). Коэффициенты корреляции в этой части разреза заметно выше, чем в верхней части разреза. Появляются зависимости параметров Jrs и $Jpar$, параметров магнитной жесткости, размера магнитных зерен с содержанием глинистой (<10 мкм) и илистой (<2 мкм) фракций. При этом знаки корреляционных зависимостей сохраняются. Для концентрационных и

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между основными магнитными параметрами и некоторыми гранулометрическими фракциями

Петромагнитные параметры	Весь разрез ($r > 0.18$ значимые)				0–900 см ($r > 0.27$ значимые)			910–2000 см ($r > 0.25$ значимые)				
	песок	крупный алеврит	мелкий алеврит	алеврит	крупный алеврит	мелкий алеврит	алеврит	крупный алеврит	мелкий алеврит	алеврит	глина	ил
Концентрационно-зависимые параметры												
X_{fer}							0.32					
J_{rs}	–0.62	0.74	0.57	0.74	0.68		0.53	0.63	0.68	0.74	0.32	0.33
J_{fer}					0.32	0.28	0.40					
J_{par}	–0.67	0.66	0.64	0.73				0.75	0.76	0.85	0.40	0.44
Суперпарамагнитные зерна												
$J_{rm}-J_{rs}$	–0.51	0.65	0.46	0.62	0.59		0.46	0.49	0.50	0.55		
X_{sp}	–0.31	0.45	0.25	0.39	0.40		0.33					
Магнитная жесткость												
B_{cr}	–0.45	0.45	0.43	0.52				0.63	0.69	0.74	0.42	0.45
B_c	–0.58	0.71	0.52	0.69	0.54		0.28	0.66	0.72	0.78	0.45	0.49
$HIRM$	–0.6	0.60	0.57	0.67				0.55	0.70	0.72	0.44	0.47
Размер зерна и доменное состояние												
X_{fer}/J_{rs}	0.46	–0.69	–0.37	–0.59	–0.46			–0.62	–0.67	–0.73	–0.43	–0.47
B_{cr}/B_c	0.42	–0.67	–0.33	–0.54	–0.50			–0.61	–0.64	–0.70	–0.40	–0.45
J_{rs}/J_{fer}^*	–0.57	0.70	0.51	0.67	0.52			0.65	0.69	0.76	0.43	0.48

Примечание. * – параметр J_r/J_{fer} увеличивается с уменьшением размера магнитного зерна. Прямой шрифт – сильная зависимость; наклонный шрифт – слабая зависимость.

суперпарамагнитных параметров такие зависимости незначимы.

Скользкая корреляция с окнами 2 и 3 м, перемещаемыми с шагом 0.1 м, позволила выявить дополнительные корреляционные связи на отдельных участках разреза, на рис. 7 приведены примеры скользкой корреляции различных петромагнитных параметров с разными гранулометрическими характеристиками.

В слоях 6–11 с содержанием песчаной фракции связаны X (рис. 7а), J_i , B_{cr} , B_c ; в почвах корреляция уменьшается, в супесчаных горизонтах увеличивается до $r = 0.9$. Более слабая связь ($r < 0.6$) существует у концентрационных параметров с песком в слоях 1–2. С крупным алевритом связана J_i на тех же участках (рис. 7б), с высокими значениями r (до 0.97 на 8–19 м), но с прерыванием связи в слое 9 (13–14 м). Слабее связь в слоях 1–2 ($r = 0.55$).

В верхней части разреза глинистая фракция определяет величины и поведение суперпарамагнитных характеристик (r до 0.6) только в подстилающем ископаемую почву (слой 5) слое 6, который по петромагнитным характеристикам можно определить как нижний горизонт педокомплекса (см. ниже раздел “Реконструкция изменений па-

леоклимата...”). На участках 8–17 и 0–3 м эти параметры связаны отрицательно (рис. 7г), в песчаных толщах связь сильнее (до $r = -0.78$). Прямо противоположны по знаку связи СПМ характеристик с мелкоалевритовой фракцией (рис. 7в), на участке 0–3 м r повышается до 0.6; на 8–17 м r достигает 0.9, уменьшаясь до незначимых величин в песчаном прослое слоя 8 (10.5–12 м) и в средней части слоя 9 (13.5–14.5 м).

Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ)

Магнитная текстура отложений, реконструированная по эллипсоидам анизотропии магнитной восприимчивости, тесно связана с условиями осаждения магнитных зерен и последующим преобразованием отложений. Интервалы ископаемых почв отмечены понижением степени анизотропии по сравнению с вмещающими отложениями, что характерно для почв Сибирской субэвральской формации [Matasova, Kazansky, 2004] (рис. 8). Максимальная степень АМВ обнаружена в средней части разреза, где она достигает $P' = 1.21$. В большинстве отложений степень АМВ варьирует от 1.04 до 1.11, что типично для осадочных отложений, формировавшихся под воздей-

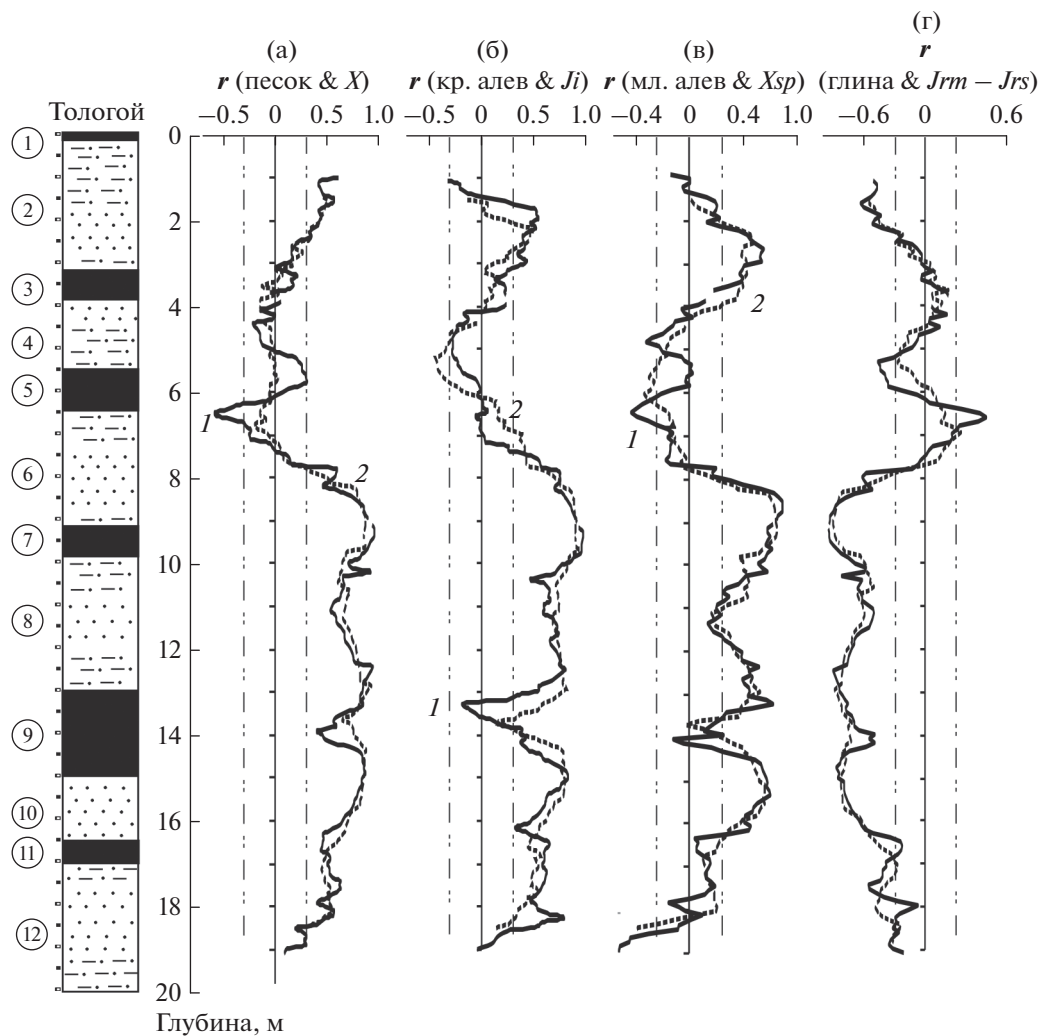


Рис. 7. Коэффициенты корреляции r между некоторыми магнитными характеристиками и гранулометрическим составом отложений разреза Тологой. Кривая 1 – скользящее “окно” 2 м, кривая 2 – скользящее “окно” 3 м. Прерывистые линии показывают значимые коэффициенты корреляции.

ствием нескольких факторов. Фактор формы T в 85% образцов имеет положительные значения (от 0 до 0.8), из них около 57% образцов демонстрируют изменения T в диапазоне 0.4–0.8. Между фактором формы и степенью анизотропии существует не очень тесная, но значимая связь ($r = 0.5$ при $n = 88$). Магнитная текстура отложений, преимущественно плоскостная (рис. 8а), что также свидетельствует об осадочном происхождении пород. По данным магнитной анизотропии отложения разреза Тологой можно разделить на три различных интервала: интервал с существенно нарушенной магнитной текстурой и нерегулярными изменениями значений фактора T (0–2.5 м); интервал со слаборазрушенной магнитной текстурой и уплощенной формой эллипсоида АМВ (2.5–11 м); и интервал с ненарушенной магнитной текстурой и преимущественно уплощенной, реже сферической формой эллипсоида АМВ (11–20 м).

Нарушения плоскостной текстуры выражаются в отклонении главных осей эллипсоида от вертикальной и горизонтальной плоскости, но их положение в пространстве указывает на особенности условий осадкообразования.

Направление и положение минимальной оси эллипсоида АМВ (К3) указывают на направление и угол падения склона времени образования осадков [Lagroix, Banerjee, 2004]. Эти параметры склона, как видно из рис. 8, существенно не менялись на протяжении всего времени формирования исследуемой толщи осадков и характеризуют падение склона в западном направлении под углом $\sim 10^\circ$.

Палеомагнитные исследования

По результатам размагничивания переменным магнитным полем установлено, что во всех образ-

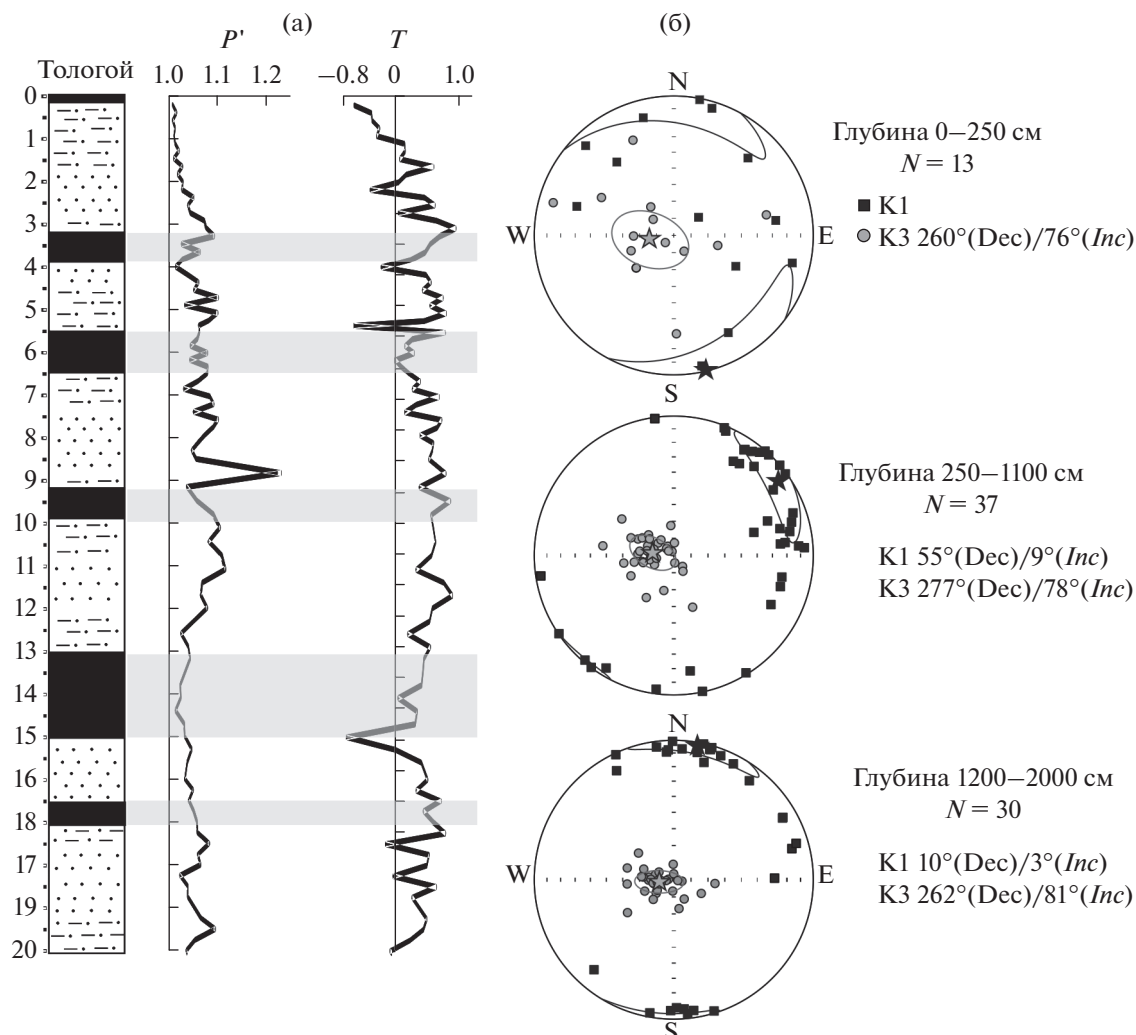


Рис. 8. Параметры магнитной анизотропии: (а) — степень анизотропии (P'), параметр формы (T); (б) — магнитная текстура отложений в трех интервалах разреза Тологой. Звездочки — средние значения положений главных осей эллипсоида AMB на стереопроекциях.

цах естественная остаточная намагниченность (NRM) состоит из двух компонентов: низкокоэрцитивного (LCC), разрушающегося в полях от 10 до 30 мТл, и высококоэрцитивного, который, как правило, является характеристическим компонентом ($ChRM$) (рис. 9). Значительная часть направлений LCC компонента группируется вокруг направления современного магнитного поля места отбора и, по-видимому, представляет собой сумму древней и лабораторной вязкой намагниченностей. Направление $ChRM$ имеет как прямую, так и обратную полярность. В зависимости от величины LCC и его соотношения с величиной $ChRM$ различаются и результаты размагничивания. При высоких >30 мА/м значениях NRM наблюдается хорошая сохранность $ChRM$ (рис. 9а, 9д) или вполне удовлетворительная (рис. 9б, 9е). В образцах с величинами $NRM < 25$ мА/м, низко-

коэрцитивный компонент преобладает, и в этом случае, направление $ChRM$ определяется с большой ошибкой (рис. 9в, 9ж, либо имеет аномальные значения (рис. 9г, 9з).

Распределение направлений $ChRM$ для верхней и нижней частей разреза по глубине и изменение их угловых параметров представлено на рис. 10. По преобладающему направлению $ChRM$ разрез делится на две части — верхнюю (до глубины 11.1 м), которая имеет преимущественно прямую полярность, и нижнюю (ниже 11.4 м), характеризующуюся, в основном, обратной полярностью.

Распределение направлений $ChRM$ в верхней части разреза достаточно компактно ($N = 56$; $D = 4.1^\circ$; $I = 58.9^\circ$; $K = 23.7$; $a_{95} = 4.9^\circ$). Заниженное наклонение ($I < 30^\circ$) имеют всего несколько образцов, и, как правило, они имеют пониженные значения

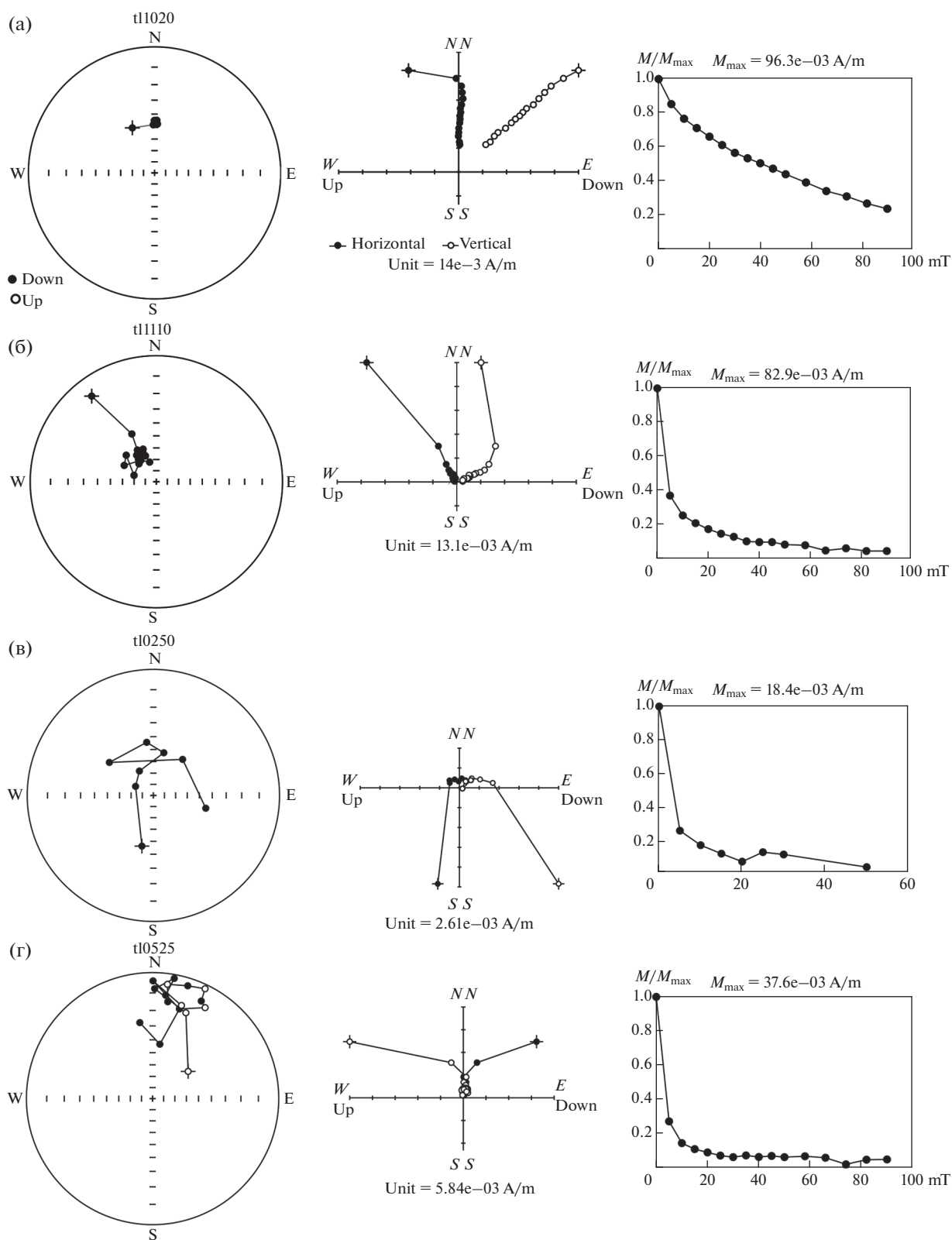


Рис. 9. Результаты ступенчатого размагничивания образцов переменным полем, номер образца соответствует глубине в см.

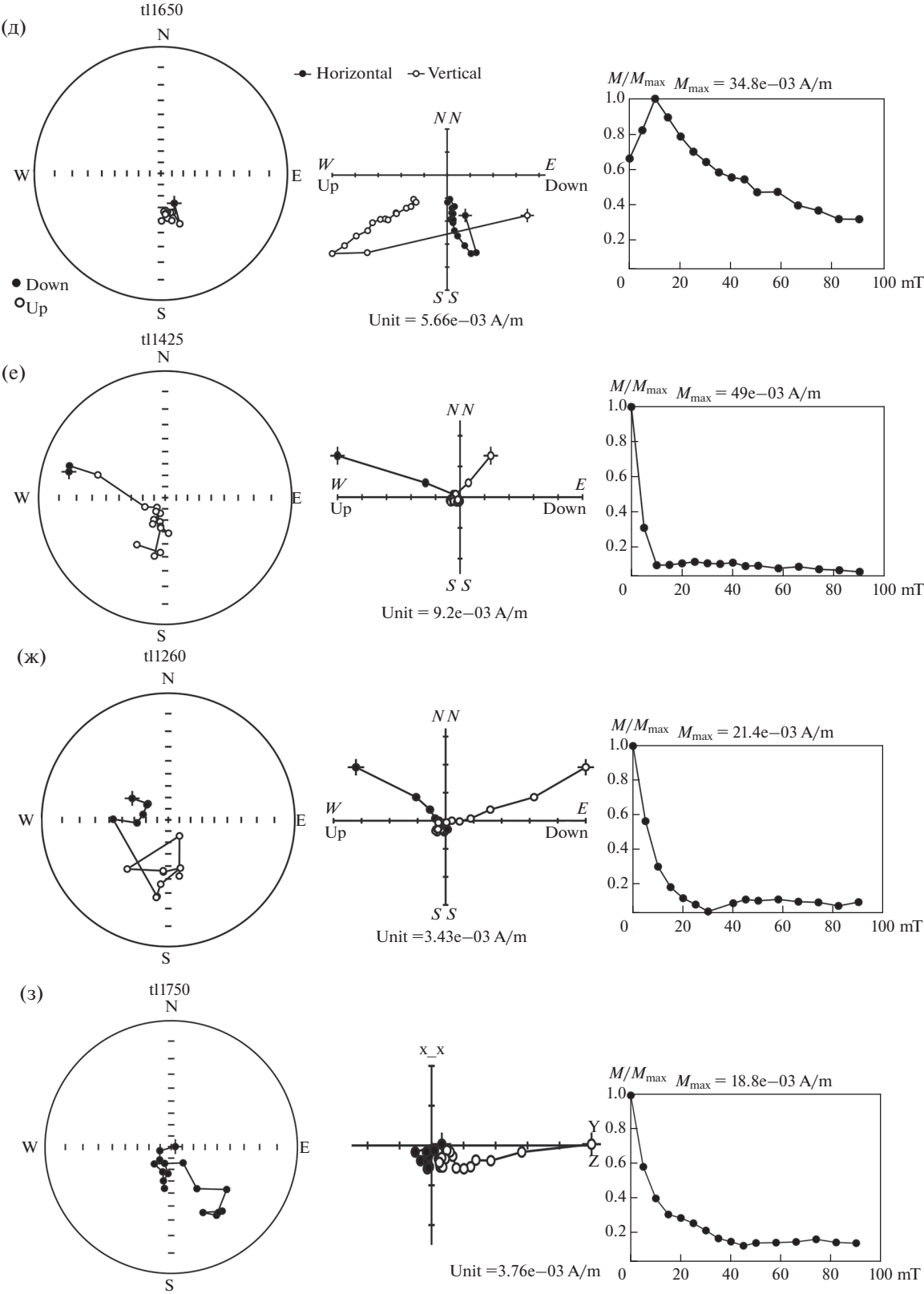


Рис. 9. Окончание

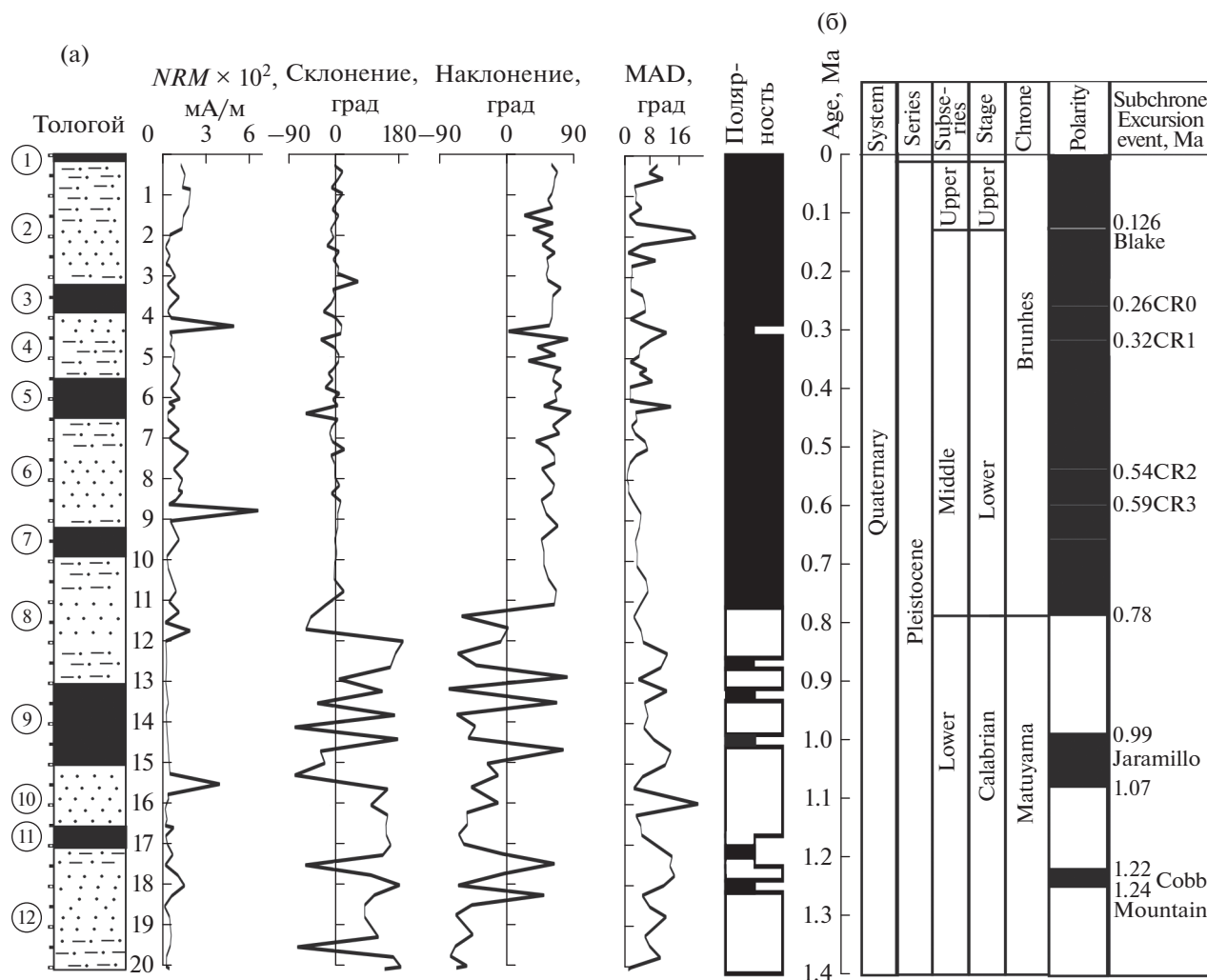


Рис. 10. Магнитополлярная характеристика отложений разреза Тологой (а). В колонке справа черным цветом обозначена положительная полярность, белым — отрицательная. MAD — максимальный угол отклонения вектора. Международная шкала полярности по работе [Pilans, Gibbard, 2012] — (б).

NRM и повышенные ($>15^\circ$) доверительные интервалы.

Разброс направлений $ChRM$ в нижней части разреза существенно выше. Кроме обратных направлений, антиподальных прямой намагниченности ($N = 27$; $D = 182.7^\circ$; $I = -62.4^\circ$; $K = 4.7$; $a95 = 14.5^\circ$), здесь присутствуют также единичные образцы с положительным наклонением, и с заниженным до $(-4^\circ) - (-6^\circ)$ отрицательным наклонением. Хотя эти образцы представляют лишь отдельные стратиграфические уровни, все они сосредоточены в двух интервалах глубин 12.7–14.7 и 17.0–18.5 м.

Угол между направлениями прямой и обратной полярности для выборки из 56 прямых и 27 обратных направлений (исключая аномальные) составляет 3.2° , при величине критического угла 14.6° (из-за большого разброса направлений обратной полярно-

сти), что согласно работе [McFadden, McElhinny, 1990] соответствует классификации “С”, т.е. тест обращения положительный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По величине концентрационных магнитных характеристик отложения разреза Тологой можно отнести к среднемагнитным, подобные значения концентрационных параметров встречаются в субаэральных отложениях Западной и Восточной Сибири [Матасова и др., 2003; Matasova, Kazan-sky, 2004; Казанский и др., 2006; и др.]; в Средней Сибири в субаэральных отложениях концентрация магнитных минералов, как правило, выше [Chlachula et al., 1998]. В целом по разрезу магнитная восприимчивость в почвах несколько ниже, чем во вмещающих горизонтах; почвы содержат большее количество магнитоустойчивых, суперпара-

магнитных и парамагнитных минералов и характеризуются меньшим размером магнитных зерен. Эти зависимости хорошо заметны на качественном уровне (рис. 2–рис. 5). Подобное поведение в той или иной степени характерно для большинства лессово-почвенных серий Западной, Средней и Восточной Сибири и нетипично для лессов и почв Китая, Европы, Средней Азии и Северной Америки [Evans, Heller, 2003]. Такой своеобразный механизм формирования магнитных свойств в лессово-почвенных последовательностях Сибири был назван нами “сибирским” [Матасова и др., 2003; Matasova, Kazansky, 2004; и др.] и в рамках этого механизма была проведена идентификация генетических типов отложений и палеоклиматическая интерпретация результатов.

Генетический тип отложений и положение литостратиграфических границ

Обширная статистика, полученная нами в процессе многолетнего изучения отложений Сибирской субэвальной формации (ССФ) [Матасова и др., 2003; Matasova, Kazansky, 2004; Матасова, 2006; и др.], свидетельствует о том, что отложения различных генетических типов обладают каждый своим набором магнитных и гранулометрических характеристик, и эти закономерности прослеживаются по всей ССФ. Диапазоны характеристик могут меняться в зависимости от географического положения в пределах ССФ, геоморфологической позиции, степени развитости и мощности горизонтов (для почв), но их соотношения для осадков разных генетических типов в пределах одного разреза сохраняются. Так, ископаемые почвы менее магнитные, более магнитомягкие и характеризуются меньшим размером магнитных зерен по сравнению с лессовыми горизонтами и/или эоловыми песками. Делювиальные отложения характеризуются самым большим разбросом значений концентрационных магнитных характеристик, но по составу магнитной фракции и размеру магнитного зерна они ближе к лессам и пескам [Жданова и др., 2007].

По результатам корреляционного анализа по всему разрезу песчаная фракция содержит наименьшее количество магнитных (ОД, СПМ, магнитомягких) и парамагнитных частиц, а эффективный размер магнитного зерна здесь увеличивается (табл. 2). Однако в различных частях разреза эти особенности проявляются по-разному.

Отличительной особенностью верхней части разреза (слои 1–6) является высокое, но крайне неравномерное содержание песчаной фракции (особенно фракции крупного песка >500 мкм). В этом же интервале концентрационно-зависимые петромагнитные параметры демонстрируют более высокие значения и наибольшие колебания, дисперсии этих величин в верхней части раз-

реза в два раза больше, чем в нижней. Здесь также наблюдаются максимальные вариации эффективного размера магнитного зерна (хотя все зерна находятся в МД состоянии). Наличие значимых корреляционных связей между содержанием алеврита и концентрационно-зависимыми параметрами указывает на принадлежность магнитных зерен, в основном, к алевритовой фракции. Синхронное изменение концентрационных и суперпарамагнитных характеристик свидетельствует о значительном перемешивании материала в осадках верхней части разреза, хотя некоторая первичная дифференциация сохраняется, поскольку наиболее слабомагнитные разности пород являются более магнитомягкими.

На основании этих результатов можно утверждать, что пески и супеси верхней толщи разреза Тологой (слои 1–6) формировались, главным образом, под действием процессов плоскостного смыва. Это согласуется с результатами исследования магнитной анизотропии, которые свидетельствуют о формировании осадков разреза на склоне и наиболее активной динамической обстановке их осаждения в верхней части разреза. Кроме того, определенную, но второстепенную роль здесь играли эоловые процессы, поскольку основные магнитные свойства связаны с алевритовой фракцией.

Почвенные горизонты в верхней части разреза, диагностированные по повышенному содержанию илистой фракции и пониженным значениям динамического фактора F , характеризуются уменьшением концентрации ферромагнитной фракции, уменьшением эффективного размера магнитного зерна и увеличением магнитной жесткости. Тем не менее, в отличие от развитых почв Западной и Восточной Сибири [Матасова, 2006], в почвах верхней части разреза Тологой отсутствуют ОД и СПМ зерна и не увеличивается содержание парамагнетиков. Такой набор параметров указывает на умеренно холодные и влажные климатические условия при накоплении осадков, не благоприятствующие развитию педогенеза, что соответствует “слабому” сибирскому механизму формирования магнитных свойств почв [Матасова, 2006].

В нижней части разреза (слои 7–12) содержится в 1.2 раза меньше песка, чем в верхней (слои 1–6). К тому же песок представлен, главным образом, крупной фракцией, практически отсутствующей в почвенных горизонтах. Поэтому содержание песка меньше влияет на магнитные свойства слоев 7–12. В них наблюдается иное, чем в вышележащих отложениях, поведение петромагнитных параметров. Во-первых, отсутствует какая-либо корреляционная связь между концентрационными параметрами и гранулометрическими характеристиками осадков. Во-вторых, отличительной особенностью является повышенное содержание ОД частиц (до 20%) и снижение содержания МД частиц, что в целом приводит к уменьшению эффективного размера магнитного зерна и смещению параметров доменного состояния частиц в

ПСД область. Концентрация ОД зерен $>10\%$ существенно влияет на магнитные свойства горных пород, поэтому поведение всех магнитных характеристик в нижней части разреза значительно разнится с верхней частью. ОД зерна обладают повышенными значениями Jrs и пониженными значениями $Xfer$ [Dunlop, Özdemir, 1997]. Это объясняет различия в корреляции Jrs с концентрационно-зависимыми характеристиками в верхней и нижней частях разреза.

Сильная корреляционная связь между Jrs и $Jpar$ и их значимая корреляция с содержанием глинистой и илистой фракций, а также и сильные обратные корреляционные связи этих параметров с параметрами, характеризующими ДС зерен (табл. 1, табл. 2), указывают на то, что ОД зерна генетически связаны с горизонтами ископаемых почв, в которых протекают интенсивные процессы преобразования минералов, в том числе и образование новых ферромагнетиков ОД и СПМ размера [Evans, Heller, 2003] и увеличивается содержание глинистых парамагнитных минералов. В субэкральных осадках к основным (по содержанию) парамагнитным минералам относятся глинистые минералы, которые, в крупнозернистых субэкральных осадках имеют преимущественно аутигенное происхождение в результате интенсивных процессов химического выветривания в периоды наибольшей тепло- и влагообеспеченности, то есть во время формирования ископаемых почв. Действительно, увеличение концентрации ОД, СПМ и магнито жестких частиц и парамагнитных минералов в нижней части разреза Тологой соответствует почвенным горизонтам. Однако не во всех случаях эти интервалы точно совпадают (рис. 2–рис. 5), что можно объяснить либо постепенным изменением климата, либо процессами вымывания (в нижней части почв) или процессами размыва и/или перемешивания (в верхней части почв) материала различных горизонтов.

Согласно выявленным ранее закономерностям [Матасова, 2006], поведение петромагнитных и гранулометрических параметров в нижней части разреза Тологой, предполагает, что здесь доминировал эоловый процесс формирования осадков при некотором участии делювиального процесса [Жданова и др., 2007]. Немаловажную роль здесь играли педогенные процессы в периоды формирования палеопочвенных горизонтов с образованием мелких ОД и СПМ частиц и парамагнитного материала глинистой и илистой размерности *in situ*. Тем не менее, формирование магнитных свойств осадков верхней и нижней частей разреза происходило в рамках “сибирского механизма”, поскольку в целом горизонты ископаемых почв содержат меньшее количество ферромагнитных частиц и обладают повышенной магнитной жесткостью. Обогащение палеопочвенных горизонтов СПМ и ОД частицами не оказывает заметного влияния на концентрационно-

зависимые параметры $Xfer$ и $Jfer$, а рост концентрации парамагнитного материала – на величины Ji и X . Что касается магнито жестких частиц, то $HIRM$, $Jrm-Jrs$ и Jrs изменяются синхронно, что говорит об образовании СПМ и ОД зерен не только магнетита, но и гематита, однако при увеличении абсолютных значений $HIRM$ их доля в общей Jrs уменьшается из-за различий в удельной намагниченности магнитомягких и магнито жестких минералов.

Реконструкция изменений палеоклимата и среды осадконакопления

Результаты анализа полученных данных указывают на то, что отложения разреза Тологой накапливались на склоне долины при активном участии ветрового фактора. Поступление большей части магнитного материала в отложения нижней части разреза происходило из дальних и средней дальности источников, а при накоплении верхней части – наряду с удаленными источниками существенную роль играл ближний источник [Shao, 2008]. Направление максимальной оси эллипсоида АМВ ($K1$) отражает направление основного фактора, под воздействием которого формировались осадки [Tarling, Hroudá, 1993; Lagroix, Banerjee, 2002]. Учитывая генезис отложений, можно констатировать, что в период образования осадочной толщи в интервале 2.5–11 м основным направлением ветра, приносящего обломочный материал, было СВ–ЮЗ. Нижележащие отложения (интервал 12–20 м) сформировались под воздействием воздушных масс, перемещающихся в направлении С–Ю. Верхняя часть разреза (интервал 0–2.5 м) имеет гораздо более нарушенную текстуру, чем остальная часть разреза, что свидетельствует о неустойчивых процессах осадконакопления в переменных климатических условиях, но с сохранением положения склона в пространстве.

Магнитные свойства отложений сформировались главным образом под воздействием климатических условий. С этой точки зрения нижняя часть (9–20 м) разреза образовалась в гораздо более теплых и влажных условиях, чем верхняя. Как было уже сказано, ископаемые почвы ССФ характеризуются меньшей концентрацией магнитных минералов, присутствием в магнитной фракции магнито жестких минералов, уменьшением эффективного размера магнитного зерна и большим количеством ультратонких СПМ (и ОД) минералов наиболее вероятно аутигенного происхождения. Все эти признаки являются свидетельством переработки субэкральных отложений педогенными процессами различной степени интенсивности. Слабовыраженные изменения соответствующих магнитных параметров в верхней части объясняются недостаточно сильными преобразованиями осадочного материала (т.е. слабой степенью развития почв) либо денудацией почв с ча-

стичным или полным уничтожением некоторых почвенных горизонтов или сохранившихся в виде реликтов (педоседиментов).

По совокупности магнитных характеристик таких почв в разрезе две, причем верхнюю (глубина ~3–4 м, слой 3) можно считать слаборазвитой, а нижнюю (глубина ~16.5–17.0 м, слой 11) — плохо сохранившейся с перемешанным, переотложенным (?) солифлюкцией и делювиальными процессами материалом. Почвы средней части разреза (глубина ~9–10 м, слой 7, и 12.5–15 м, слой 9) демонстрируют ярко выраженные “почвенные” магнитные параметры, которые характеризуют их как зрелые, развитые, хорошо сохранившиеся.

Почва на глубине ~5.5–7.5 м по большинству магнитных параметров состоит из двух почвенных горизонтов с небольшим песчаным прослоем на глубине 6.5–6.8 м, т.е. можно считать эту толщу ископаемым педокомплексом (ПК). Поскольку по гранулометрическим данным нижний горизонт ПК не выделяется, он не вынесен в рисунках в строение разреза.

Обращает на себя внимание поведение магнитных параметров (X , S , B_c) в основании разреза (19.6–20 м), характерное для ископаемых почв. Возможно, здесь также фиксируются процессы педогенеза. К такому же выводу можно прийти на основании значений и поведения некоторых гранулометрических параметров (например, F или содержание глинистой фракции, рис. 2, рис. 3). Тем не менее, поведение других петромагнитных характеристик (J_i , J_{par} , J_{sp} , X_{fer}/J_{rs} , B_{cr}/B_c , $HIRM$) не позволяет пока диагностировать данный горизонт.

По совокупности петромагнитных и гранулометрических данных отложения разреза Тологой формировались в течение двух, существенно различающихся, климатических интервалов: относительно более холодного и сухого в верхней части разреза и более теплого и влажного в его нижней части. Граница между этими интервалами совпадает с кровлей слоя 7 и, судя по приуроченной к ней резкой смене характера графиков большинства петромагнитных параметров, соответствует длительному перерыву в осадконакоплении.

По результатам корреляционного анализа в разрезе можно предположить наличие и других стратиграфических перерывов. Это уровни, на которых происходит смена знака взаимосвязей (коэффициентов корреляции) петромагнитных и гранулометрических характеристик на противоположный. С этой точки зрения значительные перерывы (со сменой знака) приурочены к отметкам в районе глубин ~2.5–3, ~8, ~17; менее значительные (уменьшение величины коэффициентов корреляции без смены ее знака) — к отметкам ~13/14, 18/20 м. У большинства параметров корреляция низкая (или отсутствует) в интервале глубин 3–6 м, в некоторых случаях она есть только внутри ПК (5.5–7.5 м) и, как правило, проти-

воположная по знаку таковой во вмещающих толщах. Это также возможное свидетельство стратиграфического перерыва. Вероятно, в разрезе Тологой по результатам корреляционного анализа скорее можно выделить интервалы более менее непрерывного осадконакопления, чем стратиграфические перерывы. К таким интервалам можно отнести (снизу вверх) ~16.5–14.5 м; 13–8 м; и небольшие участки в верхней части разреза на глубине ~7.5–6.5 м, и, возможно, 2.5–0 м.

Граница Матуяма/Брюнес и возрастная модель отложений

Положение границы магнитозон прямой и обратной полярности на глубине 11.1 м также позволяет разделить разрез на верхнюю и нижнюю части. Отложения верхней части формировались в течение хрона прямой полярности (Брюнес), что соответствует среднему и позднему плейстоцену по геохронологической шкале [Pilans, Gibbard, 2012], и нижнюю часть, время образования которой соответствует хрону обратной полярности Матуяма. Такое разделение в принципе соответствует существующим возрастным оценкам [Ivanova et al., 2019], но вступает в противоречие с ранее опубликованными палеомагнитными данными. Согласно [Гнибиденко и др., 1976] граница Матуяма/Брюнес проходит либо по кровле знакопеременной зоны на глубине 12.5 м, либо по ее подошве на глубине 14.5 м (точного положения границы в статье не приводится). Однако поскольку подобная знакопеременная зона обнаружена нами в интервале глубин 13–14 м, мы предполагаем, что граница Матуяма/Брюнес попала в неопробованный авторами интервал 11–12 м (см. рис. 2 в работе [Гнибиденко и др., 1976]) и была просто пропущена. Поэтому, мы считаем установленное нами положение границы Матуяма/Брюнес на глубине 11.1 м более достоверным, по крайней мере, с точностью ± 10 см.

Положение границы Матуяма/Брюнес позволяет предложить некоторые возрастные оценки этапов формирования разреза. Интервал с нарушенной магнитной текстурой (глубина 0–2.5 м), на нижней границе которого происходит резкая смена знака корреляции между петромагнитными и гранулометрическими характеристиками, вероятно, соответствует голоцену. По крайней мере, это не противоречит палеонтологическим данным и абсолютным датам [Алексеева, 2005; Zech et al., 2017].

Граница между верхним и средним плейстоценом по палеонтологическим данным проходит на уровне ~9 м [Ivanova et al., 2019], что соответствует расчленению разреза Тологой по петромагнитным данным. С другой стороны, граница Матуяма/Брюнес, соответствующая границе нижнего и среднего плейстоцена, находится на глубине 11.1 м, что подразумевает, что отложения среднего плейстоцена в разрезе Тологой существенно редуцированы.

Нижнюю возрастную границу формирования осадков разреза можно оценить на основе сопоставления с соседними регионами. Сходная смена “аласкинского” механизма, характерного для позднего плейстоцена в Средней Сибири (разрез Куртак) [Chlahula et al., 1998; Matasova et al., 2001] на “сибирский” с выраженным педогенным вкладом (разрез Государев Лог) наблюдается непосредственно над границей Матуяма/Брюнес [Казанский и др., 2006]. С другой стороны, наши предыдущие исследования раннеоплейстоценовых (по работе [Мац, 2013]) лессово-почвенных отложений в разрезе Тагай на о. Ольхон показали, что здесь магнитные свойства ископаемых почв фиксируют палеоклиматические изменения в соответствии с “китайским” или “педогенным” механизмом [Матасова и др., 2016]. В отложениях нижней части разреза Тологой фиксация палеоклиматического сигнала происходила по “сибирскому” механизму, предполагающему более суровые климатические условия, и таким образом, нижняя часть разреза моложе нижней половины калабрия (раннего эоплейстоцена по работе [Гужиков, Шкатова, 2016]), но древнее границы Матуяма/Брюнес, и, таким образом, соответствует верхней половине калабрия. Следовательно, разрез на склоне горы Тологой формировался в течение всего плейстоцена, с четкой границей между верхним, средним и нижним плейстоценом. В верхней части фиксируются многочисленные перерывы осадконакопления, не позволяющие более точно определить возраст отдельных горизонтов. С учетом палеонтологических данных снизу возраст можно ограничить верхней половиной калабрия (до субхрона Кобб Маунтин), при этом в самой нижней части разреза (16–20 м) также вероятны стратиграфические перерывы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе совместной интерпретации результатов петро-, палеомагнитных и гранулометрических исследований в отложениях разреза Тологой выделено пять ископаемых почв, чередующихся с горизонтами песчаных-супесчаных отложений, причем две верхние почвы выделены впервые.

По гранулометрическим и петромагнитным параметрам изученный разрез четко подразделяется на две части. Осадки нижней части разреза (9–20 м), средне-нижний плейстоцен, формировались в борту долины, в относительно спокойных литодинамических условиях. При формировании этих осадков преобладали эоловые процессы, а климат был более теплым и влажным. Особенности климатических условий определили поступление материала, в основном, из средне-дальних областей сноса (десятки и, возможно, сотни км) с подчиненным значением ближних источников. Магнитные минералы поступали в отложения в составе алевритовых, в большей степени — мел-

коалевритовых фракций. Отложения верхней части (0–9 м), верхний плейстоцен, формировались также в борту долины под действием преобладающего плоскостного смыва, обусловившего значительное перемешивание осадочного материала. Эти отложения более крупнозернисты как по магнитному, так и обломочному зерну; они образовались в высокодинамических, более суровых климатических условиях из материала источников ближней и средней дальности (до первых десятков км). Магнитный материал приносился в составе песчано-крупноалевритовых фракций.

Климатические различия при формировании верхней и нижней толщ обусловили различие в интенсивности педогенеза в ископаемых почвенных горизонтах. В верхней части разреза палеопочвы слабо развитые и частично денудированы. В нижней части более интенсивные почвообразовательные процессы привели к образованию развитых почв с формированием педогенных СПМ и ОД частиц и увеличением концентрации парамагнетиков.

Геоморфологическая позиция разреза Тологой в процессе накопления осадков, по данным анизотропии магнитной восприимчивости, не менялась: ориентировка и наклон палеосклона сохраняли свое положение на протяжении всего периода осадкообразования. Преобладающее направление ветра менялось незначительно.

Взаимосвязи петромагнитных и гранулометрических параметров предполагают стратиграфические перерывы, особенно велик их объем в верхней части разреза (слои 1–5). В нижней части разреза выделены интервалы более-менее непрерывного осадконакопления (8–13 м; 14.5–16.5 м), в верхней части такие интервалы выделяются менее надежно и предполагаются на глубине 6–7.5 и 0–2.5 м.

Формирование магнитных свойств осадков разреза Тологой происходило в соответствии с “сибирским” механизмом фиксации палеоклимата в магнетизме отложений Сибирской субаэральная формации.

Изученная часть опорного разреза Тологой формировалась в течение всего плейстоцена, с четкой границей между верхним, средним и нижним плейстоценом, граница Матуяма/Брюнес обнаружена внутри слоя 8 (отметка ~11.1 м). Возраст основания изученного разреза (отметка 20 м) можно ограничить верхней половиной калабрия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№ 19-17-00216, палеомагнитные исследования и исследования АМВ), РФФИ (№№ 15-05-01858, 18-05-00215), Интеграционной программы СО РАН (№ 0341-2017-0001) и гранта Правительства РФ (№ 075-15-2019-866, полевые работы).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту докт. геол.-мин. наук, проф. А.Ю. Гужикову и канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Костерову за ценные замечания и рекомендации, позволившие улучшить текст и рисунки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Н.В.* Эволюция природной среды Западного Забайкалья в позднем кайнозое (по данным фауны мелких млекопитающих) / Ред. Додонов А.В. М.: ГЕОС. 2005. 141 с.
- Базаров Д.Б.* Кайнозой Прибайкалья и Западного Забайкалья. Новосибирск: Наука. 1986. 179 с.
- Бибикова В.Н., Верещагин Н.К., Гарутт В.Е., Юрьев К.Б.* Новые материалы по четвертичной фауне Забайкалья (Ошурково, Тологой) // Материалы исслед. по археол. СССР. 1953. № 39. С. 26–39.
- Гнибиденко З.Н., Ербаева М.А., Поспелова Г.А.* Палеомагнетизм и биостратиграфия некоторых отложений верхнего кайнозоя Западного Забайкалья. Палеомагнетизм мезозоя и кайнозоя Сибири и Дальнего Востока / Под ред. Фотиади Э.Э. Новосибирск: ИГиГ СО РАН. 1976. С. 75–95.
- Гужиков А.Ю., Шкатова В.К.* О внесении изменений в Общую магнитостратиграфическую шкалу полярности четвертичной системы. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета. России и его постоянных комиссий. Вып. 44. СПб: изд-во ВСЕГЕИ. 2016. С. 35–37.
- Ербаева М.А.* История антропогенной фауны зайцеобразных и грызунов Селенгинского среднегорья. М.: Наука. 1970. 132 с.
- Жданова А.И., Казанский А.Ю., Зольников И.Д., Матасова Г.Г., Гуськов С.А.* Опыт фациально-генетического расчленения субаэральных отложений Новосибирского Приобья геолого-петромагнитными методами на примере опорного разреза “Огурцово” // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 4. С. 446–459.
- Зольников И.Д.* Генетические типы и геологическое картирование четвертичных отложений. Методическое пособие. Новосибирск: НГУ. 1998. 48 с.
- Иваньев Л.Н.* К вопросу стратиграфического расчленения кайнозойских красноцветов Западного Забайкалья по данным палеонтологии // Изв. Вост.-Сиб. отд. ВГО. 1966. Т. 65. С. 82–94.
- Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Шетников А.А., Филинов И.А., Ербаева М.А.* Палеомагнитные и гранулометрические характеристики четвертичных отложений опорного Разреза Тологой (Бурятия, Россия). Проблемы Геокосмоса. Материалы 12-й международной школы-конференции. Санкт-Петербург, Петергоф. 8–12 октября 2018 г, ООО “Издательство ВВМ” (Санкт-Петербург), 2018. С. 105–112.
- Казанский А.Ю., Рященко Т.Г., Матасова Г.Г., Акулова В.В., Ухова Н.Н.* Петромагнетизм субаэральных отложений Прибайкалья (опорный разрез у п. Новоразводная, р-н г. Иркутска // Геофизический журнал. 2006. Т. 28. № 5. С. 1035–1047.
- Матасова Г.Г.* Магнетизм позднелейстоценовых лесово-почвенных отложений Сибирской субаэральной формации. Дис. ...докт. геол.-мин. наук. Казань: Казанский государственный университет. 2006. 276 с.
- Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Зыкина В.С.* Наложение “аласкинской” и “китайской” моделей записи палеоклимата в магнитных свойствах отложений верхнего и среднего неоплейстоцена на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 7. С. 638–651.
- Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Шетников А.А., Филинов И.А.* Корреляция петромагнитных и гранулометрических параметров четвертичных отложений разреза Тагай (о. Ольхон, оз. Байкал). Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: Материалы международной школы-семинара “Проблемы палеомагнетизма и магнетизма горных пород” / Под ред. Щербакова В.П. ФГБУН Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, Филигрань, Ярославль. 2016. С. 103–110.
- Мац В.Д.* Стратиграфия отложений позднего мелакайнозоя Байкальского рифта // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2013. Т. 21. № 6. С. 72–87.
- Равский Э.И., Александрова Л.П., Вангенгейм Э.А., Гербова В.Г., Голубева Л.В.* Антропогенные отложения юга Восточной Сибири. Тр. ГИН АН СССР. Вып. 105. М.: Наука. 1964. 278 с.
- Andreeva D.B., Leiber K., Glaser B., Hambach U., Erbaeva M., Chimitdorzhieva G.D., Tashak V., Zech W.* Genesis and properties of black soils in Buryatia, southern Siberia, Russia // Quaternary International. 2011. V. 243. P. 313–326.
- Chlachula J., Evans M.E., Rutter N.W.* A magnetic investigation of a Late Quaternary loess/palaesol record in Siberia // Geophys. J. Int. 1998. V. 132. P. 128–132.
- Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. V. 13. P. 260–267.
- Dunlop D.J.* 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. Geophys. Res. Solid Earth. 2002. V. 107. Iss. B3. P. 2046–2067.
- Dunlop D.J., Özdemir Ö.* Rock magnetism: Fundamental and Frontier. New York: Cambridge Univ. Press, 1997. 573 p.
- Enkin R.J.* A computer program package for Analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. 1994. 16 p.
- Erbaeva M., Alexeeva N.* Pliocene and Pleistocene biostratigraphic succession of Transbaikalia with emphasis on small mammals // Quaternary International. 2000. V. 68. P. 67–75.
- Evans M.E., Heller F.* Environmental Magnetism. New York: Academic Press, 2003. 299 p.
- Fisher R.* Dispersion on sphere // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1953. V. 217. № 113. P. 295–305.
- Ivanova V.V., Erbaeva M.A., Shchetnikov A.A., Kazansky A.Yu., Matasova G.G., Alekseeva N.V., Filinov I.A.* Tologoi Key section: a unique archive for Pliocene-Pleistocene paleoenvironment dynamics of Transbaikalia, Baikal rift zone. Quaternary International. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.004>
- Jasonov P.G., Nourgaliev D.K., Bourov B.V., Heller F.* A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica. 1998. V. 49. № 3. P. 224–226.
- Kazansky A.Yu., Matasova G.G., Shchetnikov A.A., Filinov I.* A rock-magnetic and grain-size data on the Quaternary multy-layered key section Tologoy. Problems of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets, October 8–12, 2018. P. 72.
- Kirschvink J.L.* The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1980. V. 62. P. 699–718.

- Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for environmental reconstruction // *ARPN J. Earth Sciencess*. 2015. V. 4. № 1. P. 1–6.
- Lagroix F., Banerjee S.K. The regional and temporal significance of primary aeolian magnetic fabrics preserved in Alaskan loess // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 225. P. 379–395.
- Lagroix F., Banerjee S.K. Paleowind directions from the magnetic fabric of loess profiles in central Alaska // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 195(1–2). P. 99–112.
- Liu Q.S., Roberts A.P., Larrasoana J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Environmental magnetism: principles and applications // *Rev. Geophys.* 2012. V. 50. RG4002.
<https://doi.org/10.1029/2012rg000393>
- Maher B.A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance // *Aeolian Research*, 2011. V. 3. P. 87–144.
- Matasova G., Petrovsky E., Jordanova N., Zykina V., Kapicka A. Magnetic study of Late Pleistocene loess/palaeosol sections from Siberia: palaeoenvironmental implications // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 147. № 2. P. 367–380.
- Matasova G.G., Kazansky A.Yu. Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/palaeosol deposits along west-central Siberian transect and their palaeoclimatic implications. *Magnetic Fabric: Methods and Applications* / Eds. Martín-Hernández F., Lüneburg C.M., Aubourg C. and Jackson M. Geological Society, London, Special Publications. London. 2004. V. 238. P. 145–173.
- McFadden P.L., McElhinny M. Classification of reversal test in paleomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103. P. 725–729.
- Pillans B., Gibbard P. The Quaternary Period. In: *The Geological Time Scale 2012*. The Geological Time Scale, 2. Elsevier. 2012. P. 979–1010.
- Shao Y. Physics and Modelling of Wind Erosion. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*. V. 37. Springer. 2008. 452 p.
- Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall. 1993. 217 p.
- Tauxe L. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press, Berkeley., Ca. 2010. 512 p.
- Zech W., Andreeva D., Zech M., Bliedner M., Glaser B., Hambach U., Erbaeva M., Zech R. The Tologoi Record: a terrestrial key profile for the reconstruction of Quaternary environmental changes in semiarid Southern Siberia. The 3rd Asian Association for Quaternary Research. Conference Abstract book. 4–8 September, 2017, Jeju Island, Republic of Korea, Lotte City. 2017. P. 13.
- Zijderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. *Methods in paleomagnetism* / Eds. Collinson D.W., Creer K.M., Runkorn S., Elsevier, Amsterdam. 1967. P. 254–286.

New Rock- and Paleomagnetic Data on the Quarternary Deposits of the Tologoi Key Section (Western Transbaikalia) and Their Paleoclimatic Impications

G. G. Matasova^{a, c, *,}, A. Yu. Kazansky^{d, c,}, A. A. Shchetnikov^{c, d, e, g,},
 M. A. Erbaeva^{h,} and I. A. Filinov^{c, e, f}

^aTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^bFaculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^cGeological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

^dIrkutsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

^eInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

^fIrkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

^gGeological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^hGeological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047 Russia

*e-mail: matasovagg@ipgg.sbras.ru

A complex investigation including laser granulometry, rock-magnetic and paleomagnetic studies was carried out for the deposits of the Tologoi section (51°44'43.93" N, 107°28'20.93" E), a reference section for the late Cenozoic of Western Transbaikalia. Joint analysis of rock magnetic and granulometric data allowed to clarify in detail the stratigraphy of the section and to identify previously unknown horizons of fossil soils. The position of the Matuyama/Brunhes magnetic boundary was established from paleomagnetic data, which made it possible to create an age model for the deposition of sediments in the section. According to the rockmagnetic and granulometric data, the section is clearly subdivided into lower and upper part, which were formed in different conditions. Slope processes dominated in the upper part, while eolian processes dominated in the lower part of the section. Characteristics of the anisotropy of magnetic susceptibility allowed to determine prevailing wind directions, and the direction and angle of the slope during periods of sediment accumulation. From correlation analysis of all experimental data, a number of stratigraphic gaps was estimated. Based on the reconstructed sedimentation conditions, climatic fluctuations in the region during the Pleistocene were evaluated.

Keywords: laser granulometry, rock magnetic studies, stratigraphic gap, anisotropy of magnetic susceptibility