

## Проблемы магнитостратиграфии плейстоценовых лесово-почвенных отложений юга Украины

© В. Г. Бахмутов, Д. В. Главацкий, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 21 июня 2016 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Викладено основні принципи магнітостратиграфії, палеомагнітного методу та його застосування у четвертинній стратиграфії. Наведено результати попередніх досліджень з визначення межі Матуяма—Брюнес (М/Б) у лесово-ґрунтових відкладах як України, так й інших територій. Закцентовано увагу на протиріччях щодо встановлення положення межі М/Б і епізодів оберненої полярності усередині хрона Брюнес за даними різних авторів. Особливо наочно показано ситуацію на прикладі розрізу Роксолани у Західному Причорномор'ї. Однією з причин може бути підвищення точності магнітометричної апаратури та якості вимірів, які тепер виключають ефекти підмагнічування. Інша причина — суперечності у стратиграфічному розчленуванні розрізів, що розташовані навіть у межах однієї лесової провінції. Отримано інформативні дані, згідно з якими можна робити висновки щодо проходження межі М/Б у розрізі Роксолани на глибині 46,6 м на стику ґрунтів редукованих лубенського й мартоносського горизонтів, що у цілому відповідає сучасним уявленням українських стратиграфів та узгоджується з попередніми дослідженнями у розрізі Долинське (межу М/Б було визначено на рівні мартоносського горизонту). Подальші комплексні палеомагнітні дослідження плейстоценових розрізів України допоможуть переглянути і скорелювати досі суперечливі магнітостратиграфічні схеми.

**Ключові слова:** магнітостратиграфія, межа Матуяма—Брюнес, палеомагнітний метод, плейстоцен, лесово-ґрунтова товща, розріз Роксолани.

**Введение.** Четвертичные покровные образования широко распространены на территории Украины и сопредельных регионов. Они самым тесным образом связаны с повседневной деятельностью человека, направленной на решение большого комплекса задач народно-хозяйственного, экологического и прогнозного характера. Существующие в настоящее время стратиграфические схемы осадочных отложений плейстоцена, несмотря на детальность, в своей основе имеют существенный изъян, который нельзя не игнорировать при каких бы то ни было стратиграфических обобщениях. Вследствие частой смены мощности реперных горизонтов и резких изменений условий седиментации (вплоть до полного отсутствия осадконакопления в определенные промежутки времени) даже в пределах сравнительно небольших провинций возникают трудности их корреляции, в том числе на близлежащих площадях. Кроме того, большинство континентальных плейстоценовых толщ Украины фаунистически немые, что существенно затрудняет выяснение их стратиграфических взаимоотношений.

На протяжении последних 50 лет для решения вопросов геологии и стратиграфии осадочных толщ широко применяется палеомагнитный метод. По мере развития палеомагнитная стратиграфия (магнитостратиграфия) трансформировалась в самостоятельную дисциплину со своей методологической базой и проблематикой. Использование палеомагнитного метода в стратиграфии базируется на том фундаментальном факте, что в ходе геологической истории магнитное поле Земли многократно изменяло свою полярность. Теоретическая сторона палеомагнитных исследований в их начальный период не привлекала особого внимания, но вскоре достижения современной геофизики заставили по-новому оценить перспективы палеомагнетизма в области стратиграфии. Магнитохронологическая шкала А. Кокса, шкала линейных магнитных аномалий и первые макеты палеомагнитной шкалы показали глобальные возможности нового метода и его способность к решению фундаментальных геологических проблем.

Привлечение для решения этих задач палеомагнитного метода в 1970-х годах и последую-

шие интенсивные палеомагнитные исследования субаэральных образований плейстоцена Украины, в первую очередь направленные на построение магнитостратиграфической шкалы, казалось, могли дать ответы на многие вопросы. Однако следует признать, что и сейчас существуют весьма противоречивые толкования как стратиграфических, так и магнитостратиграфических схем.

Развитие в последнее десятилетие аналитической базы и получение нового фактического материала по пространственно-временной структуре геомагнитного поля эпохи Брюнес и по стратотипическим разрезам лессово-почвенных толщ настоятельно требуют новой интерпретации ранее полученных результатов и, вероятно, пересмотра стратиграфических (и магнитостратиграфических) схем.

В данной работе представлено современное состояние наших знаний о структуре геомагнитной эпохи Брюнес, а также анализ результатов палеомагнитных исследований лессово-почвенной провинции территории юго-западной Украины, в частности по определению стратиграфического положения границы Матуяма—Брюнес — «золотого гвоздя» магнитостратиграфии четвертичного периода.

**Современные представления об эпохе магнитной полярности Брюнес.** Наверное, ни одна проблема, связанная с магнитостратиграфией, не является столь дискуссионной, как установление количества эпизодов обратной полярности в эпохе Брюнес. Этот важнейший и принципиальный вопрос заслуживает особого внимания, поскольку важность изучения феномена экскурсов трудно переоценить. Экскурсы, дополняя наши представления о колебаниях геомагнитного поля, весьма важны для познания природы магнитного поля и процессов, происходящих во внешней части ядра. Они, как хронологические и стратиграфические реперы, находят широкое применение в разных областях наук о Земле: в стратиграфии и геохронологии, в седиментологии и тектонике, в палеонтологии и климатологии и др.

Относительно терминологии — существуют разные формулировки понятия экскурс. В соответствии с работой [Петрова и др., 1992], экскурс — это кратковременное изменение направления геомагнитного поля, амплитуда которого не менее чем в 3 раза превышает уровень вековых вариаций для данного отрезка времени, а обратная полярность, если она достигается, неустойчива, т. е. охватывает меньший период, чем собственный период ди-

намомеханизма. Экскурсы не непрерывны, не синусоидальны, не гармоничны и представляют собой колебания в виде кратковременных выбросов (импульсные колебания), которые сменяются стационарным полем вековых вариаций.

В работе [Merrill et al., 1996] под термином геомагнитная экскурсия (geomagnetic excursion) подразумевается отклонение направления геомагнитного поля от своего среднего значения для данной местности, когда рассчитанный виртуальный геомагнитный полюс (VGP) отклоняется от географического полюса более чем на  $45^\circ$ , но это не связано с инверсией геомагнитного поля. Иногда бывает трудно определить, произошла ли экскурсия, поскольку в истории геомагнитного поля также известны неоднократные короткие интервалы смены полярности, определяемые как события обратной полярности (reversal events) продолжительностью около  $10^5$  лет.

Число экскурсов в эпохе Брюнес у разных авторов колеблется от восьми-десяти и более [Harrison, 1974; Гурарий и др., 1983; Champion et al., 1988; Третяк и др., 1989; Petrova, Pospelova, 1990; Петрова и др., 1992; Шкатова, 1998; Lund et al., 2001, 2005], в том числе от семи-восьми за последние 130—200 тыс. лет [Lovlie, 1989], до четырех-пяти [Verosub, 1982; Nowaczyk et al., 1994; Opdyke, Channell, 1996; Nowaczyk, Antonow, 1997] и менее, вплоть до их полного отрицания [Линькова, 1984]. Экскурсы зафиксированы в основном в морских глубоководных осадках и в озерных отложениях, но есть также «записи» в лавовых потоках и отдельные определения по археологическим объектам.

Одной из наиболее известных работ является обобщение [Champion et al., 1988], где, по мнению авторов, синтезированы обращения полярности (или субхроны) внутри хрона Брюнес, с возрастными привязками, полученными по изверженным породам. Авторами выделено восемь субхронов (Lashamp, Blake, Jamaica, Levantine, Biwa III, Emperior, Big Lost, Delta), а также ряд событий, которые из-за проблем возрастной привязки могут быть отнесены к тому или иному из перечисленных субхронов (см. [Champion et al., 1988], рис. 6). Это является следствием определения возраста калий-аргоновым методом, который здесь имеет погрешности до 20 %.

В работе [Langereis et al., 1997] в хроне Брюнес выделено 11 экскурсов, из которых шесть, по мнению авторов, выделены наиболее надежно и являются глобальными событиями.

Для возрастных привязок использовались изотопно-кислородные привязки по планктонным фораминиферам и данные астрохронологии.

Тринадцать экскурсов в эпохе Брюнес выделяют авторы в работе [Knudsen et al., 2003]. В работе [Кравчинский и др., 1998] на основе анализа детальных палеомагнитных исследований кернов донных отложений озера Байкал авторами был выделен 21 экскурс. В работе [Поспелова, 2004], обобщающей данные разных авторов по более чем 300 экскурсам, в хроне Брюнес как наиболее надежные выделено 17 эпизодов. Можно привести еще многие работы с авторскими обобщениями (см., например, [Большаков, 2007]), но в целом это не изменяет общей картины.

Все перечисленные работы по экскурсам были получены по результатам определений угловых элементов геомагнитного поля. Но также есть значительное количество работ, в которых авторы оперируют величинами виртуально аксиального дипольного магнитного момента Земли и сопоставляют экскурсы с минимумами кривой палеонапряженности геомагнитного поля. Критический обзор этих работ выполнен в работе [Большаков, 2007] и нельзя не согласиться с автором, указывающим на недостатки в изучении экскурсов хрона Брюнес: 1) отсутствие характерных особенностей в записи экскурсов, что необходимо для их идентификации; 2) неточность их датирования; 3) недостатки статистического обоснования глобальности экскурсов; 4) недостатки обоснования геомагнитной природы палеомагнитных аномалий, интерпретируемых как геомагнитные экскурсы. Отсюда и следует разное количество экскурсов, и разные их названия и положения у различных авторов.

В таблице приведены обобщенные данные из указанных выше источников, а также материалы из обобщений [Langereis et al., 1997; Поспелова, 2004], в целом отображающие современные представления об экскурсах эпохи Брюнес.

Объяснения феномена экскурсов можно разделить на две группы: они являются либо вековыми вариациями аномально большой амплитуды, либо несостоявшимися инверсиями геомагнитного поля.

Объяснение с точки зрения высокоамплитудных вековых вариаций предполагает наличие недипольного источника (источников), который может изменять интенсивность и местоположение вследствие следующих причин

(сценариев): а) резкое изменение направления дипольного поля; б) дипольное поле уменьшилось по величине и недипольное поле доминировало на большей части земного шара; в) интенсивность одного из недипольных источников резко возросла.

В первых двух случаях явление будет иметь планетарный характер.

Для первого случая в настоящее время нет данных, которые бы подтверждали его реализацию в каком-либо из временных отрезков. Для второго случая определяющим является выяснение, насколько дипольное поле может уменьшиться. Для второго и третьего сценариев также имеет важное значение соотношение дипольного и недипольного полей и превалирование последнего в пределах определенного региона. В случае реализации третьего сценария экскурс может быть ограничен некоторой локальной областью (с обратным наклоном в центре), на расстоянии  $15^\circ$  от центра которой поле будет иметь исходную полярность [Harrison, Ramirez, 1975].

Отличительная черта экскурсов — их реализация на фоне пониженных (относительно современного) значений главного геомагнитного поля. Большинство экскурсов сложно коррелировать в планетарном масштабе, в первую очередь за счет неопределенности их возрастных оценок. Однако наиболее молодые экскурсы — Моно (Mono Lake, 28000 лет тому назад [Denham, Cox, 1971; Liddicoat, Coe, 1979]), Лашамп (Laschamp, 41000 лет тому назад [Bonhommet, Zahringer, 1969]) и Блейк (125000 лет тому назад [Smith, Foster, 1969]) — установлены по независимым палеомагнитным «записям» из разных районов мира с разрешением около 500 лет.

Отдельно следует остановиться на особенностях «записи» экскурсов в субаэральных отложениях. Здесь основной проблемой является задержка палеомагнитной записи, характеризующаяся глубиной фиксации («lock in depth») намагниченности в лессово-почвенных толщах. Задержка объясняется тем, что вторичные процессы намагничивания (постседиментационные, химические, вязкие), связанные обычно с процессами педогенеза, смещают палеомагнитную «запись» вниз по разрезу, и происходит как ее удревнение, так и сглаживание (искажение) «записи» (см., например, [Большаков, 1995, 2004]). При большой глубине фиксации (первые метры), согласно предложенной В. А. Большаковым схеме, вариации направления намагниченности, отражающие

изменения магнитного поля, должны быть существенно сглажены или вообще исчезнуть. Возможность такого влияния на палеомагнитную запись показана на примере изучения геомагнитных экскурсов [Zhu et al., 1994b, 2007; Fang et al., 1997; Sun et al., 2013], запись которых сглаживалась или удревнялась в зонах развитого педогенеза. Тем не менее резкие изменения вектора остаточной намагниченности в записях экскурсов, обнаруженные в лессовых горизонтах [Zhu et al., 1994b, 2007; Sun et al., 2013], а также выделение вековых геомагнитных вариаций [Evans, Heller, 2001] указывают на намного меньшую глубину фиксации для лессов по сравнению с почвами.

Нельзя не упомянуть о недавней обобщающей работе по магнитостратиграфии лессовых разрезов Китая [Liu et al., 2015]. В ней приведен обзор почти 40-летних палеомагнитных и петромагнитных исследований и сделана попытка сопоставления континентальных палеоклиматических (на основе петромагнитных данных) записей с результатами, полученными по глубоководным отложениям. Несмотря на многолетние детальные исследования десятков разрезов лессово-почвенных толщ, авторы [Liu et al., 2015] отмечают, что помимо границы Матуяма—Брюнес, стратиграфическое положение других геомагнитных эпизодов (экскурсов) установлено ненадежно и нуждается в уточнении. Однако и анализ местоположения границы Матуяма—Брюнес на стратиграфических шкалах лессово-почвенных разрезов указывает на ее «плавающую» приуроченность то к почвенным горизонтам, то к лессам. Рассмотрим это проблему более детально.

**Граница Матуяма—Брюнес и ее идентификация в субаэральных отложениях.** Граница (а точнее, переходная зона) между эпохой обратной полярности геомагнитного поля Матуяма и эпохой прямой полярности Брюнес считается ключевым магнитостратиграфическим репером плейстоцена.

Возраст границы Матуяма—Брюнес, определенный по изверженным породам, составляет около 780 тыс. лет, а в осадочных отложениях ее положение сопоставляется с биостратиграфическими подразделениями, выделенными и в глубоководных, и в континентальных осадках. По изотопно-кислородной шкале эта граница попадает в 19-ю межледниковую изотопно-кислородную стадию глубоководных осадков MIS19 (Marine oxygen isotope stage 19) [Shackleton, Opdyke, 1973; Tauxe et al., 1996]. Методами орбитальной коррекции [Hays et

al., 1976; Shackleton et al., 1990; Bassinot et al., 1994] возраст границы неоднократно уточнялся и сейчас он находится в пределах 775—780 тыс. лет назад.

Стремление как можно более точно определить положение границы Матуяма—Брюнес в отложениях разного генезиса обусловлено желанием получить единый изохронный репер, который можно использовать для глобальной корреляции плейстоцена в мировом масштабе, а также для детальной корреляции палеоклиматических записей разных регионов. Однако неполнота геологической летописи и фрагментарность плейстоценовых разрезов, формирование различных отложений в разнообразных климатических условиях (оледенение—межледниковье), искажение палеомагнитной записи в процессе диагенеза и биотурбаций, а также процессы педогенеза и, как следствие, формирование метахронной намагниченности привели к противоречиям в определении границы Матуяма—Брюнес, прежде всего в континентальных отложениях.

Во многих исследованиях, посвященных магнетизму евразийских лессово-почвенных толщ, отмечается «плавающее» положение этой границы, обусловленное процессами намагничивания и «задержкой» фиксации направления остаточной намагниченности в породе. Вероятно, именно в связи с этим положение границы Матуяма—Брюнес в лессово-почвенных толщах Центральной Европы определялось как в интергляциальных палеопочвах (Венгрия [Pecsi et al., 1995], Чехия [Kukla, 1975; Forster et al., 1996], Польша [Nawrocki et al., 2002]), так и в лессах (Австрия [Fink, Kukla, 1977], Болгария [Hus et al., 1997], Украина [Tsatskin et al., 1998]).

Показательны в этом отношении работы по лессово-почвенным разрезам Китая. Здесь, начиная практически с первых работ, вопрос, где, в каком лессовом или почвенном горизонте проходит граница Матуяма—Брюнес, является ключевым и до сих пор весьма дискуссионным. Авторы публикаций [Heller, Liu, 1982, 1984] определили ее положение в палеопочве ПП8, что соответствовало изотопно-кислородной климатостратиграфии.

Однако в последующих работах было показано, что граница Матуяма—Брюнес в разрезах лессового плато Китая проходит в основном стратиграфически выше, на уровне лесса Л8 [Liu, 1985; Liu et al., 1991; Rolph et al., 1989; Zheng et al., 1992; Zhu et al., 1994a; Spassov et al., 2001]. Отсюда возникает противоречие,

поскольку накопление лессовых толщ приурочивают к эпохам оледенений, в то время как в глубоководных осадках граница Матуяма—Брюнес зафиксирована внутри межледниковой стадии MIS19 ([Forster, Heller, 1994; Tauxe et al., 1996]).

Такое несоответствие можно объяснить задержкой (удревнением) палеомагнитной записи, характеризуемой глубиной фиксации («lock in depth») намагниченности (см. [Большаков, 1995, 1999]). В предположении, что глубина фиксации может достигать 1—3 м (что по времени равносильно удревнению палеомагнитной записи на 10—30 тыс. лет), наличие такой задержки позволяло естественно передвинуть границу Матуяма—Брюнес в вышележащую по отношению к лессу Л8 почву ПП7. Однако в публикации [Большаков, 2004] были выдвинуты обоснованные возражения по поводу излишне большой глубины фиксации намагниченности в лессе. Позднее в других работах [Wang et al., 2006; Liu et al., 2008; Jin, Liu, 2011] было показано, что, по крайней мере, в лессе, где проходит граница Матуяма—Брюнес, глубина фиксации не может существенно превышать таковую для глубоководных осадков (10—20 см). В то же время для почв глубина фиксации может быть существенно больше. Таким образом, перенесение положения границы в вышележащую, относительно лесса Л8, межледниковую почву оказалось затруднительным.

С целью разрешения климатостратиграфического противоречия положения границы Матуяма—Брюнес разные исследователи стали снова рассматривать возможность ее совмещения с ПП8, на что указывалось в работах [Heller, Liu, 1982, 1984. В работе [Wang et al., 2006] граница Матуяма—Брюнес оказалась проходящей в почве. Это дало авторам основание утверждать, что несоответствие в положении этой границы в разрезах лессового плато Китая связано с региональной и/или местной климатической изменчивостью. Можно указать еще целый ряд публикаций относительно этого противоречия, в том числе [Jin, Liu, 2011; Liu et al., 2015], где отмечается, что переходная зона границы Матуяма—Брюнес локализуется вдоль педостратиграфического и климатостратиграфического перехода между ПП8 и Л8.

Нельзя не обратить внимание на дальнейшую детализацию исследований, в первую очередь на исследование переходной зоны инверсии Матуяма—Брюнес. В работе [Jin, Liu, 2010] изучалась запись переходной зоны по де-

сяти параллельным профилям, составленным по образцам, отобранным в разрезе Лочуань практически вплотную друг к другу. Однако изменения направления характеристической компоненты намагниченности в профилях отличны друг от друга, демонстрируя от одной до трех переполюсовок во время инверсии. Отсутствие стабильной записи переходной зоны может быть связано как со значительным уменьшением величины дипольного магнитного момента во время инверсии, так и с особенностями намагничивания лессов и почв в таком «слабом» геомагнитном поле.

В работе [Wang et al., 2014] по результатам исследований четырех окраинных разрезов китайского лессового плато высказываются сомнения в адекватности применения палеомагнитного метода для определения местоположения границы Матуяма—Брюнес, поскольку, например, в разрезе Фаншан верхняя часть подстилающего почву ПП8 лесса Л9 прямо намагничена, а почва ПП8 (при наличии двух обратно намагниченных уровней) также идентифицируется как прямонамагнитная. Интерпретация этих данных, наряду с данными по определению относительной палеонапряженности (хотя, по нашему мнению, определение вариаций палеонапряженности по лессово-почвенным отложениям весьма дискуссионное), приводит к выводу, что переходная зона инверсии Матуяма—Брюнес приходится на границу между ПП8 и Л8. В то же время по результатам палеомагнитных исследований этого же разреза коллективом других авторов [Xiong et al., 2001] указывается на положение границы в почве ПП8.

В работе [Большаков, 2004] для разрешения этого климатостратиграфического противоречия предлагается по результатам анализа положения границы Матуяма—Брюнес две гипотезы. Согласно первой, удревнение ее положения может быть связано с влиянием вторичных процессов намагничивания на палеомагнитную запись. Последние могут определять различные виды остаточной намагниченности (постдетритовую, (био)химическую) и их характеристики в зависимости от свойств осадка (литолого-минералогического состава, пористости, влажности и т.д.) которые, в свою очередь, определяются в основном местными климатическими, геохимическими и геоморфологическими условиями. Под характеристиками намагниченности здесь подразумевается ее величина, стабильность относительно разных методов размагничивания, глубина фик-

сации и интервал времени сглаживания палеомагнитной записи. Вторая гипотеза связывает обсуждаемое противоречие не с особенностями магнитной записи, а с особенностями палеоклиматической интерпретации условий формирования горизонтов лессов и почв в различных регионах. Предлагается обратить внимание на непопулярную точку зрения, что лессы в отдельных регионах могли формироваться в некоторые периоды времени в межледниковых условиях.

Таким образом, проблема климатостратиграфического положения границы Матуяма—Брюнес в разрезах китайского лессового плато однозначно до сих пор не решена — в разных разрезах положение границы устанавливается либо в лессе Л8, либо в почве ПП8, либо в переходной зоне ПП8—Л8. И как было отмечено выше, эта проблема остается актуальной для лессовых разрезов других регионов, в том числе для Западного Причерноморья.

**Граница Матуяма—Брюнес в лессово-почвенных разрезах Западного Причерноморья.** Палеомагнитные исследования в Западном Причерноморье активно проводились в 1970—1980-х годах [Третьяк, 1983; Третьяк и др., 1987, 1989; Третьяк, Вигилянская, 1994]. Частично эти результаты были использованы при составлении региональной магнитостратиграфической шкалы плейстоцена Украины [Третьяк, Вигилянская, 1994]. В то же время вопросы соотношения последней с основными климатическими циклами четвертичного периода во многом остаются невыясненными.

Согласно современным представлениям, граница Матуяма—Брюнес соответствует мартоношскому горизонту Стратиграфической схемы четвертичных отложений Украины [Гожик, 2013]. Однако, если проанализировать местоположение границы Матуяма—Брюнес в разных разрезах, очевидны кардинальные расхождения. Кроме того, есть расхождения и в определении границы в рамках одного разреза по данным разных авторов. Последнее наглядно демонстрирует серия работ на разрезе Роксоланы.

В работах под руководством А. Н. Третьяка [Третьяк, 1983; Третьяк и др., 1987] на этом разрезе был установлен ряд горизонтов прямой и обратной полярностей. Зона обратной полярности, определенная на уровне 36—39 м, была отнесена к магнитному событию Левантин (именуемому разными авторами как Бива II, Днепр, Чеган) с возрастом около 290 тыс. лет назад, а граница Матуяма—Брюнес определена

не была, поскольку при такой интерпретации она должна была бы располагаться намного ниже и, вероятно, выходить за нижнюю границу разреза. Исследовав десятки других разрезов на территории Украины, авторы [Третьяк, 1983; Третьяк и др., 1987; Третьяк, Вигилянская, 1994] пришли к выводу, что выявленные зоны обратной намагниченности являются эпизодами (экскурсами) в эпохе Брюнес.

В середине 90-х годов XX ст. междисциплинарные исследования разреза Роксоланы выполнялись коллективом других авторов [Tsatskin et al., 1998, 2001; Gendler et al., 2006]. Положение границы Матуяма—Брюнес было установлено в лессах, залегающих ниже почвы РК<sub>6</sub> на глубине около 34 м, что противоречит предыдущим геологическим, палеонтологическим и палеомагнитным данным. Ниже, до аллювия VII днестровской террасы, были описаны еще три почвы — РК<sub>7</sub>, РК<sub>8</sub> и РК<sub>9</sub>. В этом же регионе на разрезе Новая Этулия граница Матуяма—Брюнес была определена на уровне почвы РК<sub>7</sub> [Tsatskin et al., 2001]. В то же время в разрезах Колкотова Балка [Tsatskin et al., 2001] и Приморское [Nawrocki et al., 1999], первый из которых подстилается аллювием V днестровской террасы, а второй — почвами мартоношского горизонта, граница Матуяма—Брюнес выделена не была.

Эти материалы легли в основу построения новой педостратиграфической схемы для Западного Причерноморья с последующей ее корреляцией с изотопно-кислородной шкалой [Tsatskin et al., 2001]. Примечательно, что, несмотря на детальность выполненных работ (отбор образцов проведен с шагом 5—10 см), ни об одном эпизоде либо экскурсе обратной полярности внутри хрона Брюнес не упоминается. Кроме того, авторы не проводят корреляцию своих результатов со стратиграфической шкалой четвертичных отложений Украины [Веклич и др., 1984].

По результатам палеомагнитных исследований разреза Роксоланы авторы работы [Dodonov et al., 2006] выделяют границу Матуяма—Брюнес в основе педокомплекса трех почв (под прилуцким горизонтом), что согласуется с результатами [Tsatskin et al., 1998, 2001]. Однако, каким методом магнитной чистки и на какой аппаратуре получены результаты, авторы [Dodonov et al., 2006] не указывают, что создает впечатление, что анализировались те же данные, которые легли в основу работы [Tsatskin et al., 2001], а именно, материал, представленный в работах [Du Pasquier, 1999; Sartori, 2000].

Несмотря на одинаковую трактовку местоположения границы Матуяма—Брюнес, есть различия в стратиграфическом расчленении толщ в работе [Dodonov et al., 2006], с одной стороны, и в [Tsatskin et al., 1998, 2001; Gendler et al., 2006], с другой. В последних верхняя погребенная почва сопоставляется с брянским и мезинским комплексами, а нижезалегающая — с роменской, каменной и инжавинской почвами. Под ними на стыке между двумя мощными горизонтами лесса указана воронская почва. А в работе [Dodonov et al., 2006] верхнюю почву сопоставляют только с брянским, а нижезалегающую — с мезинским комплексами. Соответственно, под ними инжавинская почва [Гожик, 2013].

Детальные исследования верхней части разреза Роксоланы с целью получения информации о тонкой структуре древнего магнитного поля (эпизоды, экскурсы, палеоциклические вариации) были проведены коллективом авторов Института физики земли РАН [Шаронова и др., 2004; Пилипенко и др., 2005]. На верхних 20 м разреза, охватывающих, по мнению авторов, последние примерно 300 тыс. лет, были выделены две аномальные зоны, которые были соответственно соотнесены к экскурсам Моно и Блейк (около 30 и 100 тыс. лет назад). Кроме того, резкое изменение направления вектора остаточной намагниченности в нижней части бугского лесса было проинтерпретировано как экскурс Ямайка, который датируется приблизительно 220 тыс. лет назад.

Недавние палеомагнитные исследования разреза Роксоланы авторами настоящей статьи [Бахмутов, Главацкий, 2014] определили границу Матуяма—Брюнес на глубине 46,6 м, на стыке погребенных почв лубенского и мартоношского горизонтов. В целом это согласуется с представлениями о стратиграфии четвертичных толщ юга Украины [Гожик, 2013] и не подтверждает данные, по которым границы Матуяма—Брюнес находится на глубине около 34 м в лессах выше кайдакского (в соответствии со стратиграфической схемой четвертичных отложений Украины [Гожик, 2013]) горизонта (PK<sub>7</sub>) [Tsatskin et al., 1998, 2001; Dodonov et al., 2006]. Другими словами, в данном случае, при разногласиях в определении местоположения границы Матуяма—Брюнес, попытки проводить корреляции разных педостратиграфических схем Западного Причерноморья (с последующей их корреляцией с изотопнокислородной шкалой) на основе палеомагнитных данных не приведут к успеху.

Если проанализировать фактический материал, представленный в статье [Бахмутов и др., 2005] по исследованию лессово-почвенного разреза вблизи с. Долинское, расположенного в 180 км к западу — юго-западу от разреза Роксоланы, то ситуация в целом повторится. Здесь для верхней части разреза, при предложенном авторами расчленении лессово-почвенных горизонтов на основе палеомагнитных данных, которое в верхней части разреза согласуется с расчленением относительно региональной стратиграфической шкалы четвертичных отложений северо-западной части Черного моря и побережья, граница Матуяма—Брюнес попадает в верхнюю часть мартоношского горизонта. Кроме того, здесь же несколько выше, в завадовской почве, выделяется зона аномальной полярности, где чередуются несколько уровней с прямой и обратной полярностью (см. рис. 6 в работе [Бахмутов и др., 2005]). Такая же зона с чередованием нескольких уровней с прямой и обратной полярностью выделяется на уровне верхней части завадовской почвы и в вышезалегающем орельском лессе разреза Роксоланы [Бахмутов, Главацкий, 2014].

**Обсуждение результатов.** В предыдущих разделах нигде не была упомянута чисто техническая проблема выделения характеристической компоненты намагниченности (ChRM).

Во-первых, во многих публикациях вопросу процедуры выполнения магнитных чисток с минимизацией (исключением) эффектов подмагничивания вообще не уделяется внимания, а просто констатируется факт выделения первичной (?) компоненты намагниченности. Однако значения остаточной намагниченности после магнитных чисток, при которых удаляется до 90—95 % начальной намагниченности, в образцах лессов и почв западного Причерноморья составляют порядка  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  мА/м, и выделять такой слабый сигнал на «хвостах» диаграмм Зийдверельда даже на современной аппаратуре (SQUID-магнитометре) зачастую проблематично. В этой связи доверие к палеомагнитным данным 70—80-х годов прошлого столетия, с учетом параметров соответствующей тому времени магнитометрической аппаратуры, вызывает сомнение. К тому же присутствие суперпарамагнитных зерен в палеопочвах затрудняет выполнение процедуры магнитной чистки и последующих измерений без размещения аппаратуры в изолирующем геомагнитное поле экране.

Во-вторых, многие авторы подчеркивают большую эффективность температурного

размагничивания по сравнению с размагничиванием переменным магнитным полем для выделения первичной намагниченности (см., например, [Heller, Liu, 1984; Большаков, 1996; Fang et al., 1997; Sartori, 2000; Бахмутов, Главацкий, 2014]). Но здесь также возникает чисто техническая проблема нагревания образцов выше 270—300 °С, когда в лессах и особенно в почвах начинаются минералогические изменения с образованием новых минералов железа, что приводит к возрастанию (в разы) значений остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости. При этом образцы во многих случаях разрушаются, и несмотря на то, что температуры 200—250 °С считаются достаточными для удаления вязкой компоненты, полное размагничивание образцов до высоких температур (580—680 °С) зачастую невозможно.

В-третьих, задержка палеомагнитной записи (проблема «lock in depth», о которой упоминалось выше) в лессово-почвенных разрезах может достигать десятков сантиметров — первых метров, равносильно «удревнению» палеомагнитной записи на 10—30 тыс. лет [Forster, Heller, 1994; Heller, Evans, 1995; Spassov et al., 2001; Большаков, 2007]. Вследствие этого «сглаживание» палеомагнитной записи может привести к тому, что даже при «сплошном» отборе экскурс может быть пропущен, либо его «запись» может быть искажена. Это же относится и к записи «переходной зоны» инверсии Матуяма—Брюнес, которая в большинстве разрезов лессово-почвенных толщ отсутствует. Здесь также следует вернуться к началу этого раздела и еще раз подчеркнуть, что точность определение направления ChRM-компоненты в отдельном образце при весьма низких значениях остаточной намагниченности (при радиусе круга доверия при 95%-ной вероятности 20—30° и более) соизмерима с амплитудой вековой вариации.

Отсюда можно сделать вывод, что форма «записи» экскурсов в лессово-почвенных разрезах в большой степени зависит от процессов формирования в породе намагниченности, которые, в свою очередь, зависят от множества факторов, в разной степени искажающих палеомагнитную запись. Учитывая современные противоречия в идентификации экскурсов эпохи Брюнес [Большаков, 2007], следует признать, что на современном этапе при палеомагнитных исследованиях лессово-почвенных толщ нельзя рассчитывать на экскурсы (даже при их гипотетическом выделении в разных разрезах) как на возможные маркеры для кор-

реляции отложений даже в пределах отдельных регионов. Если с этих позиций дать оценку данным, приведенным в ранних работах по исследованию лессово-почвенных отложений юга Украины, где в эпохе Брюнес выделяются эпизоды и экскурсы [Третьяк, 1983; Третьяк и др., 1987, 1989; Третьяк, Вигилянская, 1994] а также вековые вариации [Шаронова и др., 2004; Пилипенко и др., 2005], то следует признать, что эти результаты нельзя принимать как достоверные и, соответственно, делать какие-либо стратиграфические построения на их основе. Кроме того, в работах других авторов на этих же разрезах, с использованием более высокочувствительной современной аппаратуры, экскурсы не выделялись. Это же относится и к самой нижней части разреза, где авторами [Dodonov et al., 2006] выделен экскурс Харамильо, хотя по результатам авторов других работ он в этой части не выделяется.

Другой проблемой является привязка палеомагнитных результатов к стратиграфическим схемам на основе определения местоположения границы Матуяма—Брюнес. В этом отношении показателен разрез Роксоланы, неоднократно упоминавшийся выше и исследуемый разными авторами на протяжении многих лет. Здесь, во-первых, у разных авторов местоположение границы определяется на разных уровнях, и на основе этих данных выполняется разная стратиграфическая привязка лессово-почвенных горизонтов (см. выше). Во-вторых, при отсутствии других надежных данных по датированию разреза (радиоуглеродный и термолюминесцентный методы) вопрос о привязке его почвенных горизонтов в средней — нижней части разреза остается дискуссионным. Получается замкнутый круг — в зависимости от того, палеомагнитные результаты каких авторов принимать как более достоверные, выполняется коррекция стратиграфических схем, которые, в свою очередь, служат основой как для привязки палеомагнитных данных, так и для проведения межрегиональных корреляций.

Очевидно, что выходом из создавшейся ситуации может быть комплексное изучение лессово-почвенных разрезов западного Причерноморья, направленное в первую очередь на достоверное определение местоположения в разрезах границы Матуяма—Брюнес. Для проведения межрегиональных корреляций необходимо получение новых надежных палеомагнитных результатов на других разрезах, формировавшихся в разных природных (и

климатических) поясах. Идеальным было бы проведение комплексных исследований ключевых разрезов вдоль широтных и долготных профилей единым коллективом специалистов с опорой на данные современных аналитических методов, с детальным описанием методик исследований по каждому методу, его возможностей и результатов в пределах каждого из объектов. К последним должно быть поставлено еще одно условие — предварительная оценка возраста объекта, которая должна указывать на временной диапазон, охватывающий период инверсии Матуяма—Брюнес.

Как пример можно привести комплексные исследования разреза Роксоланы, предварительные результаты по которому [Бахмутов, Главацкий, 2014], несмотря на более чем столетнюю историю исследований, по-новому осветили ряд проблем и нерешенных вопросов стратиграфии лессово-почвенных разрезов западного Причерноморья, палеогеографических условий накопления лессов, корреляции стратиграфических схем, неоднозначности палеомагнитных результатов и др. Аналитические исследования разных научных коллективов до сих пор продолжаются, но очевидно, что это начало качественно нового этапа, который должен получить дальнейшее развитие и реализацию на других лессово-почвенных разрезах Украины.

**Заключение.** Несмотря на выполненный выше критический анализ, у нас есть все основания полагать, что у палеомагнитного метода в решении вопросов стратиграфии четвертичного периода хорошие перспективы. В методике палеомагнитных исследований в начале 1990-х годов произошел качественный скачок, обусловленный, во-первых, появлением принципиально новой измерительной аппаратуры — высокочувствительных криогенных магнитометров, во-вторых, развитием компьютерной техники и разработкой программного обеспечения. Это позволило разным авторам на некоторых плейстоценовых разрезах юга Украины получить новые результаты, которые не всегда укладываются в принятые стратиграфические схемы и зачастую не подтверждают результаты более ранних работ.

Интерпретация этих результатов в рамках существующих педостратиграфических схем западного Причерноморья может загнать исследователя в тупик при попытке разобраться, что же брать за основу. Вероятно, в настоящее время новые результаты и старые схемы не могут дополнять друг друга по простой причине:

ранее, при составлении педостратиграфических схем, активно использовалась аналитическая база, результаты которой уже устарели и не только не подлежат переинтерпретации, но и должны быть преданы забвению. Однако схемы, составленные на этой основе, остались, и попытки примерять к ним новые, несомненно, более достоверные результаты аналитических методов обречены на провал.

Решение проблемы видится в комплексности исследований серии стратотипических разрезов плейстоцена на принципиально новой аналитической базе. При этом, как показывает практика, палеомагнитным исследованиям отводится ведущая роль. Последнее относится только к достоверному установлению границы Матуяма—Брюнес на отдельных разрезах, поскольку проведение корреляций на основе «гипотетического» выявления экскурсов, либо «палеоклиматического» показателя вариаций значений магнитной восприимчивости, якобы напрямую связанного с палеоклиматическими факторами, в результате многочисленных попыток разных авторов в итоге не привело к успеху. Для последнего параметра следует дать некоторое пояснение.

На магнитную восприимчивость лессово-почвенных отложений, несомненно, влияют климатические факторы, но не меньшую роль играют другие факторы, например местные геоморфологические условия, расположение источников магнитного материала, скорости седиментации эолового материала, процессы диагенеза и др. В каждом конкретном случае связь вариаций значений магнитной восприимчивости с палеоклиматической компонентой должна устанавливаться отдельно. Другими словами, эту величину нельзя использовать как климатический параметр, однозначно указывающий на климатические изменения в прошлом.

Относительно конкретного механизма «усиления магнитного сигнала» — значений магнитной восприимчивости в почвах — здесь необходима более детальная разработка конкретного механизма с определением степени воздействия природных факторов на качественные изменения магнитной фракции в почвах (подчеркнем, что речь идет о «китайской педогенной модели», к которой относятся разрезы западного Причерноморья, поскольку в «аляскинской» модели связь обратная — уменьшение значений магнитной восприимчивости в палеопочвах по отношению к лессам [Матасова, 2006]). Необходимо определить как

химический состав новообразованных магнитных минералов в почвах, так и построить адекватную модель процесса химического вторичного намагничивания. В некоторых работах, приведенных выше, эта проблема рассматривается (в частности, по разрезу Роксоланы можно привести работу [Gendler et al., 2006]).

Установление границы Матуяма—Брюнес в серии разрезов западного Причерноморья и близлежащих регионов, несмотря на ее «плавающее» положение, вероятно, обусловленное рядом технических причин палеомагнитного метода, позволяет говорить о надежном физическом репере и о его ключевой роли в решении вопросов корреляции лессово-почвенных толщ.

Однако не следует рассчитывать на легкость ее определения в лессово-почвенных толщах

западного Причерноморья. Существенный вклад суперпарамагнитной фракции в намагниченность почв, пестрый состав магнитной фракции, представленной набором аутигенных магнитных минералов (с которыми, вероятно, связано формирование химической намагниченности в породах), малые величины ChRM-компоненты намагниченности (ненамного превышающие пороговую чувствительность даже современной высокоточной аппаратуры) во многом тормозят и затрудняют получение надежных результатов. В то же время оценки палеомагнитной стабильности пород указывают на лессы как на более предпочтительный объект для выделения ChRM-компоненты намагниченности, в первую очередь по результатам термомагнитной чистки.

### Современные представления о структуре геомагнитной эпохи Брюнес

Геомагнитный эпизод по [Langereis et al., 1997] (возраст, тыс. лет назад)	Геомагнитный эпизод по [Champion et al., 1988] (возраст тыс. лет назад)	Геомагнитный эпизод по [Поспелова, 2004] (возраст тыс. лет назад)
—	—	Этруссия (2,8)
—	—	Соловки (6,0)
—	—	<b>Гетенбург (13)</b>
<b>Laschamp (40—45)</b>	<b>Laschamp (40—45)</b>	<b>Каргаполово (45)</b>
Norwegian-Greenland Sea (70—80)	—	Хаджимус (80)
<b>Blake (110—120)</b>	<b>Blake (110—120)</b>	<b>Блейк (128)</b>
Albuquerque/Fram Strait (155—165)	Laguna Datong	—
<b>Jamaica/Pringle Falls (205—215)</b>	<b>Jamaica (180)</b>	Ямайка (180)
—	Biwa I	Бива I (220)
—	Albuquerque	—
—	Old Crow	—
Fram Strait/CRO? (255—265)	—	Днепр (270)
<b>Calabrian Ridge 1 (315—325)</b>	Levantine (280—290)	—
Levantine (360—370)	Biwa II, Alpha, Saala-Dnieper	<b>Бива II (300)</b>
—	Chegan, Paoha, Summer Lake	—
—	<b>Biwa III (380—390)</b>	<b>Бива III (370)</b>
—	Beta, Kikhvin	Н.Коропец (410)
—	Kasuri	—
Unknown? (400—420)	Emperior (450—460)	Елунино-V, Эмперор (460)
<b>Calabrian Ridge 2/West Eifel (515—525)</b>	Elster II — Dainav	—
<b>Emperor/Big Lost/Cr3 (560—570)</b>	<b>Big lost (560—570)</b>	Елунино-VI (560)
—	Gamma	<b>Елунино-VII</b>
—	Humboldt River	<b>Уреки-VII (620)</b>
—	Delta (640)	—
—	Lishi	Елунино-VIII (710)
Граница Матуяма—Брюнес (778)		

Примечание: жирным шрифтом в первой колонке [Langereis et al., 1997] выделены экскурсы, которые авторы считают хорошо датированными и глобальными, во второй колонке [Champion et al., 1988] — предпочтительные названия наиболее достоверно установленных субхронов; в колонке [Поспелова, 2004] — наиболее надежно установленные экскурсы глобального масштаба.

## Список литературы

- Бахмутов В. Г., Главацкий Д. В. Новые данные по границе Матуяма—Брюнес в разрезе Роксоланы. *Геолог. журн.* 2014. № 2. С. 73—84.
- Бахмутов В. Г., Мокряк И. Н., Скарбовичук Т. В., Якушно В. Н. Результаты палеомагнитных исследований разреза дунайских террас и проблемы магнитостратиграфии плейстоцена Западного Причерноморья. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 980—991.
- Большаков В. А. Геномагнитные экскурсы — надежное средство корреляции геологических отложений? *Физика Земли.* 2007. № 9. С. 68—78.
- Большаков В. А. Использование методов магнетизма горных пород при изучении новейших отложений. Москва: ГЕОС, 1996. 192 с.
- Большаков В. А. О глубине фиксации палеомагнитной записи и климатостратиграфическом положении инверсии Матуяма—Брюнес в глубоководных осадках. *Физика Земли.* 1999. № 6. С. 93—96.
- Большаков В. А. Определение климатостратиграфического положения инверсии Матуяма—Брюнес в отложениях лессовой формации как комплексная проблема наук о Земле. *Физика Земли.* 2004. № 12. С. 58—76.
- Большаков В. А. Палеомагнитная запись геомагнитных экскурсов и вторичная намагниченность пород. *Физика Земли.* 1995. № 1. С. 66—70.
- Веклич М. Ф., Сиренко Н. А., Матвиюшина Ж. Н. Палеогеографические этапы и детальное стратиграфическое расчленение плейстоцена Украины. Киев: Наук. думка, 1984. 32 с.
- Гожик П. До питання вивчення розрізу Роксолани. Лесовий покрив Північного Причорномор'я. Люблін: KARTPOL s.c. Lublin, 2013. С. 17—33.
- Гурарий Г. З., Петрова Г. Н., Поспелова Г. А. Тонкая структура геомагнитного поля. Современное состояние исследований в области геомагнетизма. Москва: Наука, 1983. С. 42—62.
- Кравчинский В. А., Пек Дж., Сакаи Х. Магнитостратиграфическая шкала позднего кайнозоя Центральной Азии по данным глубоководного бурения на Байкале. Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: НИЦ ОИГМ СО РАН, 1998. С. 73—77.
- Линькова Т. И. Палеомагнетизм верхнекайнозойских осадков Мирового океана. Москва: Наука, 1984. 130 с.
- Матасова Г. Г. Магнетизм позднеплейстоценовых лессово—почвенных отложений Сибирской субэаральной формации: Дис. канд. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, 2006. 386 с.
- Петрова Г. Н., Нечаева Т. Б., Поспелова Г. А. Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом. Москва: Наука, 1992. 175 с.
- Пилипенко О. В., Шаронова З. В., Трубихин В. М., Дигенко А. Н. Тонкая структура и эволюция геомагнитного поля 75—10 тыс. лет тому назад на примере лессово-почвенного разреза Роксоланы (Украина). *Физика Земли.* 2005. № 1. С. 66—73.
- Поспелова Г. А. Геомагнитные экскурсы. Краткая история и современное состояние геомагнитных исследований в Институте физики Земли РАН. Москва: Изд-во ИФЗ РАН, 2004. С. 44—55.
- Третьяк А. Н. Естественная остаточная намагниченность и проблема палеомагнитной стратификации осадочных толщ. Киев: Наук. думка, 1983. 256 с.
- Третьяк А. Н., Вигилянская Л. И. Магнитостратиграфическая шкала плейстоцена Украины. *Геофиз. журн.* 1994. Т. 16. № 2. С. 3—14.
- Третьяк А. Н., Вигилянская Л. И., Макаренко В. Н., Дудкин В. П. Тонкая структура геомагнитного поля в позднем кайнозое. Киев: Наук. думка, 1989. 156 с.
- Третьяк А. Н., Шевченко А. И., Дудкин В. П., Вигилянская Л. И. Палеомагнитная стратиграфия опорных разрезов позднего кайнозоя юга Украины. Киев, 1987. 50 с. (Препринт Ин-та геолог. наук АН УССР 87-46).
- Шаронова З. В., Пилипенко О. В., Трубихин В. М., Дигенко А. Н., Фейн А. Г. Восстановление геомагнитного поля по палеомагнитным записям в лессово-почвенном разрезе Роксоланы (р. Днестр, Украина) за последние 75 000 лет. *Физика Земли.* 2004. № 1. С. 4—13.
- Шкатова В. К. Магнитостратиграфическая шкала квартера: Тез. докл. Всерос. совещания «Главнейшие итоги в изучении четвертичного периода и основные направления исследований в XXI веке». Санкт Петербург: ВСЕГЕИ, 1998. С. 58—59.
- Bassion F. C., Labeyrie L. D., Vincent E., 1994. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes—Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 91—108.
- Bonhommet N., Zahringer J., 1969. Paleomagnetism and potassium-argon age determinations of the Laschamp geomagnetic polarity event. *Earth Planet. Sci. Lett.* 6, 43—46.

- Champion D., Lanphere M., Kuntz M., 1988. Evidence for a new geomagnetic reversal from lava flows in Idaho: discussion of short polarity reversals in the Brunhes and Late Matuyama polarity chrons. *J. Geophys. Res.* 93(B10), 11667—11680.
- Denham C. E., Cox A., 1971. Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13300—30400 years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.* 13, 181—190.
- Dodonov A. E., Zhou L. P., Markova A. K., Tchepalyga A. L., Trubikhin V. M., Aleksandrovski A. L., Simakova A. N., 2006. Middle-Upper Pleistocene bioclimatic and magnetic records of the northern Black Sea coastal area. *Quat. Int.* 149, 44—54.
- Du Pasquier J., 1999. Environmental paleomagnetic study of the loess/paleosol sequence from Roxolany (Ukraine). Diploma Thesis. Zürich. 59 p.
- Evans M., Heller F., 2001. Magnetism of loess/paleosol sequences: recent development. *Earth Sci. Rev.* 54, 129—144.
- Fang X. M., Li J. J., Van der Voo R., MacNiocaill C., Dai R. X., Kemp R. A., Derbyshire E., Cao J. X., Wang J. M., Wang G., 1997. A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 146, 73—82.
- Fink J., Kukla G. J., 1977. Pleistocene climate in central Europe: at least 17 interglacial after the Olduvai event. *Quat. Res.* 7, 363—371.
- Forster T., Heller F., 1994. Paleomagnetism of loess deposits from the Tajik depression (central Asia). *Earth Planet. Sci. Lett.* 128, 501—512.
- Forster T., Heller F., Evans M. E., Havlicek P., 1996. Loess in the Czech Republic: magnetic properties and paleoclimate. *Stud. Geophys. Geodyn.* 40, 243—261.
- Gendler T. S., Heller F., Tsatskin A., Spassov S., Du Pasquier J., Faustov S. S., 2006. Roxolany and Novaya Etuliya — key sections in the western Black Sea loess area: Magnetostratigraphy, rock magnetism, and paleopedology. *Quat. Int.* 152-153, 78—93.
- Harrison C. G. A., 1974. The paleomagnetic record from deep-sea sediment cores. *Earth Sci. Rev.* 10, 1—36.
- Harrison C. G. A., Ramirez E., 1975. Areal coverage of spurious reversals of the earth's magnetic field. *J. Geomagn. Geoelectr.* 27, 139—151.
- Hays J. D., Imbrie J., Shackleton N., 1976. Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science* 194, 1121—1132.
- Heller F., Evans M., 1995. Loess magnetism. *Rev. Geophys.* 33, 211—240.
- Heller F., Liu T., 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 77, 125—141.
- Heller F., Liu T., 1982. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature* 300, 431—433.
- Hus J., Geeraerts R., Jordanova D., Evlogiev J., 1997. Magnetostratigraphy of loess-paleosol sequence in Viatovo, near Russe (Bulgaria). IAGA. Abstract Book. 65 p.
- Jin C. S., Liu Q. S., 2010. Reliability of the natural remanent magnetization recorded in Chinese loess. *J. Geophys. Res.* 115, B04103. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006703>.
- Jin C. S., Liu Q. S., 2011. Revisiting the stratigraphic position of the Matuyama–Brunhes geomagnetic polarity boundary in Chinese loess. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 299, 309—317.
- Knudsen M. F., Abrahamsen N., Riisager P., 2003. Paleomagnetic evidence from Cape Verde Islands basalts for fully reversed excursions in the Brunhes Chron. *Earth Planet. Sci. Lett.* 206, 199—214.
- Kukla G. J., 1975. Loess stratigraphy of Central Europe. In: *After the Australopithecines*. Mouton, The Hague, P. 99—188.
- Langereis C. G., Dekkers M. J., de Lange G. J., Paterne M., van Santvoort P. J. M., 1997. Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophys. J. Int.* 129, 75—94.
- Liddicoat J., Coe R., 1979. Mono Lake geomagnetic excursion. *J. Geophys. Res.* 84, 261—271.
- Liu Q., Jin C., Hu P., Jiang Z., Ge K., Roberts A. P., 2015. Magnetostratigraphy of Chinese loess-paleosol sequences. *Earth Sci. Rev.* 150, 139—167.
- Liu Q. S., Roberts A. P., Rohling E. J., Zhu R. X., Sun Y. B., 2008. Post-depositional remanent magnetization lock-in and the location of the Matuyama–Brunhes geomagnetic reversal boundary in marine and Chinese loess sequences. *Earth Planet. Sci. Lett.* 275, 102—110.
- Liu T. S., 1985. Loess and the Environment. Beijing: China Ocean Press, 251 p.
- Liu X., Liu T., Shaw J., Heller F., Xu T., Yuan B., 1991. Paleomagnetic and paleoclimatic studies of Chinese loess. Loess, Environment and Global Change (the series of the XIII INQUA Congress). Beijing: Science Press, P. 61—81.
- Lovlie R., 1989. Paleomagnetic stratigraphy: a correlation method. *Quat. Int.* 1, 129—149.
- Lund S. P., Schwartz M., Keigwin L., Johnson T., 2005. High-resolution records of the Laschamp geomagnetic field excursion. *J. Geophys. Res.* 110, B04101.

- Lund S. P., Williams T., Acton G., Clement B., Okada M., 2001. Brunhes Epoch magnetic field excursions recorded in ODP Leg 172 sediments. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Project. Scientific Results*. 172.
- Merrill R. T., McElhinny M. W., McFadden P. L., 1996. The magnetic field of the Earth: paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle. USA: Academic press, 531 p.
- Nawrocki J., Bakhmutov V., Bogucki A., Dolecki L., 1999. The Paleo- and Petromagnetic record in the Polish and Ukrainian Loess-Paleosol Sequences. *Phys. Chem. Earth* 24(9), 773—777.
- Nawrocki J., Bogucki A., Lanczont M., Nowaczek N. R., 2002. The Matuyama—Brunhes boundary and the nature of magnetic remanence acquisition in the loess-palaeosol sequence from the western part of the East European loess province. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 188, 39—50.
- Nowaczyk N. R., Antonow M., 1997. High-resolution magnetostratigraphy of four sediment cores from the Greenland Sea. I. Identification of the Mono Lake excursion, Laschamp and Biwa I/Jamaica geomagnetic polarity events. *Geophys. J. Int.* 131, 310—324.
- Nowaczyk N. R., Frederichs T. W., Eisenhauer A., Gard G., 1994. Magnetostratigraphic data from late Quaternary sediments from the Yermak Plateau, Arctic Ocean: evidence for four geomagnetic polarity events within the last 170 Ky of the Brunhes Chron. *Geophys. J. Int.* 117, 453—471.
- Opdyke N. D., Channell J. E. T., 1996. Magnetic stratigraphy. London: Acad. Press, 341 p.
- Pecsi M., Schweitzer F., Balogh J., Balogh M., Havas J., Heller F., 1995. A new loess-paleosol lithostratigraphical sequence at Paks (Hungary). *Loess in Form* 3, 63—78.
- Petrova G. N., Pospelova G. A., 1990. Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron. *Phys. Earth Planet. Int.* 63, 135—143.
- Rolph T. C., Shaw J., Derbyshire E., Wang J. T., 1989. A detailed geomagnetic record from Chinese loess. *Phys. Earth Planet. Int.* 56, 151—164.
- Sartori M., 2000. The Quaternary climate in loess sediments: Evidence from rock and mineral magnetic and geochemical analysis. Doctor of Natural Sciences Thesis, Zürich, 231 p.
- Shackleton N., Berger A., Peltier W., 1990. An alternative astronomical calibration of the Lower Pleistocene time scale based on ODP Site 677. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 81, 251—261.
- Shackleton N., Opdyke N., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10<sup>5</sup> year and 10<sup>6</sup> year scale. *Quat. Res.* 3, 39—55.
- Smith J. D., Foster J., 1969. Geomagnetic reversal in Brunhes normal polarity epoch. *Science* 163, 565—567.
- Spassov S., Heller F., Evance M., Yue L. P., Ding Z. L., 2001. The Matuyama/Brunhes Geomagnetic polarity transition at Lingtai and Baoji, Chinese Loess Plateau. *Phys. Chem. Earth* 26, 899—904.
- Sun Y. B., Qiang X. K., Liu Q. S., Bloemendal J., Wang X. L., 2013. Timing and lock-in effect of the Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14, 4952—4961. <http://dx.doi.org/10.1002/2013gc004828>
- Tauxe L., Herbert T., Shackleton N. J., Kok Y. S., 1996. Astronomical calibration of the Matuyama Brunhes Boundary: consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates. *Earth Planet. Sci. Lett.* 140, 133—146.
- Tsatskin A., Heller F., Gendler T. S., Virina E. I., Spassov S., Pasquier J. Du., Hus J., Hailwood E. A., Bagin V. I., Faustov S. S., 2001. A New Scheme of Terrestrial Paleoclimate Evolution During the Last 1.5 Ma in the Western Black Sea Region: Integration of Soil Studies and Loess Magmatism. *Phys. Chem. Earth* 26(11-12), 911—916.
- Tsatskin A., Heller F., Hailwood E. A., Gendler T. S., Hus J., Montgomery P., Sartori M., Virina E. I., 1998. Pedosedimentary division, rock magnetism and chronology of the loess/palaeosol sequence at Roxolany (Ukraine). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 143, 111—133.
- Verosub K. L., 1982. Geomagnetic excursions: a critical assessment of the evidence as recorded in sediments of the Brunhes Epoch. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* A306(149a), 161—168.
- Wang X., Lovlie R., Chen Y., Yang Z., Pei J., Tang L., 2014. The Matuyama—Brunhes polarity reversal in four Chinese loess records: high fidelity recording of geomagnetic field behavior or a less than reliable chronostratigraphic marker. *Quat. Sci. Rev.* 101, 61—76.
- Wang X., Yang Z., Lovlie R., Sun Z., Pei J., 2006. A magnetostratigraphic reassessment of correlation between Chinese loess and marine oxygen isotope records over the last 1.1 Ma. *Phys. Earth Planet. Int.* 159, 109—117.
- Xiong S. F., Ding Z. L., Liu T. S., 2001. Climatic implications of loess deposits from the Beijing region. *J. Quat. Sci.* 16, 575—582.

- Zheng H. B., An Z. S., Shaw J., 1992. New contributions to Chinese Plio-Pleistocene magnetostratigraphy. *Phys. Earth Planet. Int.* 70, 146—153.
- Zhu R. X., Laj C., Mazaud A., 1994a. The Matuyama—Brunhes and Upper Jaramillo transitions recorded in a loess section at Weinan, north-central China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 125, 143—158.
- Zhu R. X., Zhang R., Deng C. L., Pan Y. X., Liu Q. S., Sun Y. B., 2007. Are Chinese loess deposits essentially continuous. *Geophys. Res. Lett.* 34(17), L17306. doi:10.1029/2007GL030591.
- Zhu R. X., Zhou L. P., Laj C., Mazaud A., Ding Z. L., 1994b. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophys. Res. Lett.* 21, 697—700.

## Problems of magnetostratigraphy of Pleistocene loess-soil deposits of the South of Ukraine

© V. G. Bakmutov, D. V. Glavatskiy, 2016

Main principles of magnetostratigraphy, paleomagnetic method of measurement and its applying in Quaternary stratigraphy is investigated. Results of Matuyama—Brunhes (M/B) boundary detection in loess-soil sediments of Ukraine and other territories in previous studies are presented. Attention pays on contradictions in determination of M/B boundary position and episodes within Brunhes chron according to data of different authors. Notably situation is shown on example of Roxolany section in Western Black Sea region. One of reasons there can be increase of magnetometric equipments precision and quality of measurements which exclude the bias effects nowadays. Another reason is the contradictions in stratigraphic partition of sections that are located even within one loess province. We have got instructive data that allow to detect M/B boundary in Roxolany section at 46.6 m depth between Lubny and Martonosha soil horizons which corresponds to modern point of view of Ukrainian stratigraphers and consists to previous investigation of Dolynske section (M/B boundary was found in Martonosha horizon). Further complex paleomagnetic studies of Pleistocene sections of Ukraine will help to review and correlate still conflicting magnetostratigraphic charts.

**Key words:** magnetostratigraphy, Matuyama—Brunhes boundary, palaeomagnetic method, Pleistocene, loess-soil sequence, Roxolany section.

### References

- Bakmutov V. G., Glavatskiy D. V., 2014. New data about Matuyama—Brunhes boundary in Roxolany section. *Geologicheskii zhurnal* (2), 73—84 (in Russian).
- Bakmutov V. G., Mokryak I. N., Skarbovychuk T. V., Yakukhno V. N., 2005. Results of paleomagnetic study of Danube terrace section and problems of Pleistocene magnetostratigraphy of Western Black Sea region. *Geofizicheskii zhurnal* 27(6), 980—991 (in Russian).
- Bolshakov V. A., 2007. Are geomagnetic episodes reliable for geological sediments correlation? *Fizika Zemli* (9), 68—78 (in Russian).
- Bolshakov V. A., 1996. Applying of magnetic methods in young sediments. Moscow: GEOS, 192 p. (in Russian).
- Bolshakov V. A., 1999. About depth of paleomagnetic record fixation and climate-stratigraphic position of Matuyama—Brunhes inversion in deep-sea sediments. *Fizika Zemli* (6), 93—96 (in Russian).
- Bolshakov V. A., 2004. Determination of climate-stratigraphical position of Matuyama—Brunhes inversion in loess formation sediments as a complex problem of Earth sciences. *Fizika Zemli* (12), 58—76 (in Russian).
- Bolshakov V. A., 1995. Paleomagnetic record of geomagnetic episodes and secondary magnetization of rocks. *Fizika Zemli* (1), 66—70 (in Russian).
- Veklich M. F., Sirenko N. A., Matviishina Zh. N., 1984. Paleogeographic phases and detail stratigraphic partition of Pleistocene of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 32 p. (in Russian).
- Hozhyk P., 2013. Study questions of Roxolany section. Loess-covering of the North Black Sea Region. Lublin: KARTPOL s.c. Lublin, P. 17—33 (in Ukrainian).
- Gurariy G. Z., Petrova G. N., Pospelova G. A., 1983. Thin structure of geomagnetic field. Modern status of investigation in sphere of geomagnetism. Moscow: Nauka, P. 42—62 (in Russian).
- Kravchinskiy V. A., Pek Dzh., Sakai Kh., 1998. Magnetostratigraphic scale of late Cenozoic of Central Asia according to data of deep-sea drilling in Baykal. Global changes of the natural environment. Novosibirsk: Research Center Branch of the RAS, P. 73—77 (in Russian).

- Linkova T. I., 1984. Paleomagnetism of Upper Cenozoic sediments of world Ocean. Moscow: Nauka, 130 p. (in Russian).
- Matasova G. G., 2006. Late Pleistocene magnetism of loess-soil sediments of Siberia subareal formation: Diss. Dr. Geol. and Min. Sci. Novosibirsk, 386 p. (in Russian).
- Petrova G. N., Nechaeva T. B., Pospelova G. A., 1992. Characteristic changes in the geomagnetic field in the past. Moscow: Nauka, 175 p. (in Russian).
- Pilipenko O. V., Sharonova Z. V., Trubikhin V. M., Didenko A. N., 2005. Thin structure and evolution geomagnetic field 75—100 thousand y. for example loess-soil section Roxolany (Ukraine). *Fizika Zemli* (1), 66—73 (in Russian).
- Pospelova G. A., 2004. Geomagnetic episodes. Short history and current status of geomagnetic investigation in Institute of Earth's physics RAN. Moscow: Publ. IPE RAS, 44—55 (in Russian).
- Tretyak A. N., 1983. Natural remnant magnetization and problem of sediments paleomagnetic stratification. Kiev: Naukova Dumka, 256 p. (in Russian).
- Tretyak A. N., Vigilyanskaya L. I., 1994. Magnetostratigraphic scale of Pleistocene of Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal* 16(2), 3—14 (in Russian).
- Tretyak A. N., Vigilyanskaya L. I., Makarenko V. N., Dudkin V. P., 1989. Thin structure of geomagnetic field in Late Cenozoic. Kiev: Naukova Dumka, 156 p. (in Russian).
- Tretyak A. N., Shevchenko A. I., Dudkin V. P., Vigilyanskaya L. I., 1987. Paleomagnetic stratigraphy of key Late Cenozoic sections of the south of Ukraine. Working paper 87-46. Kiev, Institute of geological sciences of AS USSR, 50 p. (in Russian).
- Sharonova Z. V., Pilipenko O. V., Trubikhin V. M., Didenko A. N., Feyn A. G., 2004. Restoration of geomagnetic field according to paleomagnetic records in loess—soil section Roxolany (Dnestr river, Ukraine) for last 75 000 years. *Fizika Zemli* (1), 4—13 (in Russian).
- Shkatova V. K., 1998. Magnetostratigraphic scale of Quarter: Theses of reports All-Russian Conference "Main results in study of Quaternary period and main investigation directions in XXI century", St. Petersburg: VSEGEI Publ., P. 58—59 (in Russian).
- Bassion F. C., Labeyrie L. D., Vincent E., 1994. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes—Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 91—108.
- Bonhommet N., Zahringer J., 1969. Paleomagnetism and potassium-argon age determinations of the Laschamp geomagnetic polarity event. *Earth Planet. Sci. Lett.* 6, 43—46.
- Champion D., Lanphere M., Kuntz M., 1988. Evidence for a new geomagnetic reversal from lava flows in Idaho: discussion of short polarity reversals in the Brunhes and Late Matuyama polarity chrons. *J. Geophys. Res.* 93(B10), 11667—11680.
- Denham C. E., Cox A., 1971. Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13300—30400 years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.* 13, 181—190.
- Dodonov A. E., Zhou L. P., Markova A. K., Tchepalyga A. L., Trubikhin V. M., Aleksandrovski A. L., Simakova A. N., 2006. Middle-Upper Pleistocene bioclimatic and magnetic records of the northern Black Sea coastal area. *Quat. Int.* 149, 44—54.
- Du Pasquier J., 1999. Environmental paleomagnetic study of the loess/paleosol sequence from Roxolany (Ukraine). Diploma Thesis. Zürich. 59 p.
- Evans M., Heller F., 2001. Magnetism of loess/paleosol sequences: recent development. *Earth Sci. Rev.* 54, 129—144.
- Fang X. M., Li J. J., Van der Voo R., MacNiocail C., Dai R. X., Kemp R. A., Derbyshire E., Cao J. X., Wang J. M., Wang G., 1997. A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 146, 73—82.
- Fink J., Kukla G. J., 1977. Pleistocene climate in central Europe: at least 17 interglacial after the Olduvai event. *Quat. Res.* 7, 363—371.
- Forster T., Heller F., 1994. Paleomagnetism of loess deposits from the Tajik depression (central Asia). *Earth Planet. Sci. Lett.* 128, 501—512.
- Forster T., Heller F., Evans M. E., Havlicek P., 1996. Loess in the Czech Republic: magnetic properties and paleoclimate. *Stud. Geophys. Geodyn.* 40, 243—261.
- Gendler T. S., Heller F., Tsatskin A., Spassov S., Du Pasquier J., Faustov S. S., 2006. Roxolany and Novaya Etuliya — key sections in the western Black Sea loess area: Magnetostratigraphy, rock magnetism, and paleopedology. *Quat. Int.* 152-153, 78—93.
- Harrison C. G. A., 1974. The paleomagnetic record from deep-sea sediment cores. *Earth Sci. Rev.* 10, 1—36.
- Harrison C. G. A., Ramirez E., 1975. Areal coverage of spurious reversals of the earth's magnetic field. *J. Geomagn. Geoelectr.* 27, 139—151.
- Hays J. D., Imbrie J., Shackleton N., 1976. Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science* 194, 1121—1132.
- Heller F., Evans M., 1995. Loess magnetism. *Rev. Geophys.* 33, 211—240.

- Heller F., Liu T., 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 77, 125—141.
- Heller F., Liu T., 1982. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature* 300, 431—433.
- Hus J., Geeraerts R., Jordanova D., Evlogiev J., 1997. Magnetostratigraphy of loess-paleosol sequence in Viatovo, near Russe (Bulgaria). IAGA. Abstract Book. 65 p.
- Jin C. S., Liu Q. S., 2010. Reliability of the natural remanent magnetization recorded in Chinese loess. *J. Geophys. Res.* 115, B04103. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006703>.
- Jin C. S., Liu Q. S., 2011. Revisiting the stratigraphic position of the Matuyama–Brunhes geomagnetic polarity boundary in Chinese loess. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 299, 309—317.
- Knudsen M. F., Abrahamsen N., Riisager P., 2003. Paleomagnetic evidence from Cape Verde Islands basalts for fully reversed excursions in the Brunhes Chron. *Earth Planet. Sci. Lett.* 206, 199—214.
- Kukla G. J., 1975. Loess stratigraphy of Central Europe. In: *After the Australopithecines*. Mouton, The Hague, P. 99—188.
- Langereis C. G., Dekkers M. J., de Lange G. J., Paterne M., van Santvoort P. J. M., 1997. Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophys. J. Int.* 129, 75—94.
- Liddicoat J., Coe R., 1979. Mono Lake geomagnetic excursion. *J. Geophys. Res.* 84, 261—271.
- Liu Q., Jin C., Hu P., Jiang Z., Ge K., Roberts A. P., 2015. Magnetostratigraphy of Chinese loess-paleosol sequences. *Earth Sci. Rev.* 150, 139—167.
- Liu Q. S., Roberts A. P., Rohling E. J., Zhu R. X., Sun Y. B., 2008. Post-depositional remanent magnetization lock-in and the location of the Matuyama–Brunhes geomagnetic reversal boundary in marine and Chinese loess sequences. *Earth Planet. Sci. Lett.* 275, 102—110.
- Liu T. S., 1985. Loess and the Environment. Beijing: China Ocean Press, 251 p.
- Liu X., Liu T., Shaw J., Heller F., Xu T., Yuan B., 1991. Paleomagnetic and paleoclimatic studies of Chinese loess. Loess, Environment and Global Change (the series of the XIII INQUA Congress). Beijing: Science Press, P. 61—81.
- Lovlie R., 1989. Paleomagnetic stratigraphy: a correlation method. *Quat. Int.* 1, 129—149.
- Lund S. P., Schwartz M., Keigwin L., Johnson T., 2005. High-resolution records of the Laschamp geomagnetic field excursion. *J. Geophys. Res.* 110, B04101.
- Lund S. P., Williams T., Acton G., Clement B., Okada M., 2001. Brunhes Epoch magnetic field excursions recorded in ODP Leg 172 sediments. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Project*. Scientific Results. 172.
- Merrill R. T., McElhinny M. W., McFadden P. L., 1996. The magnetic field of the Earth: paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle. USA: Academic press, 531 p.
- Nawrocki J., Bakhmutov V., Bogucki A., Dolecki L., 1999. The Paleo- and Petromagnetic record in the Polish and Ukrainian Loess-Paleosol Sequences. *Phys. Chem. Earth* 24(9), 773—777.
- Nawrocki J., Bogucki A., Lanczont M., Nowaczek N. R., 2002. The Matuyama–Brunhes boundary and the nature of magnetic remanence acquisition in the loess-paleosol sequence from the western part of the East European loess province. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 188, 39—50.
- Nowaczyk N. R., Antonow M., 1997. High-resolution magnetostratigraphy of four sediment cores from the Greenland Sea. I. Identification of the Mono Lake excursion, Laschamp and Biwa I/Jamaica geomagnetic polarity events. *Geophys. J. Int.* 131, 310—324.
- Nowaczyk N. R., Frederichs T. W., Eisenhauer A., Gard G., 1994. Magnetostratigraphic data from late Quaternary sediments from the Yermak Plateau, Arctic Ocean: evidence for four geomagnetic polarity events within the last 170 Ky of the Brunhes Chron. *Geophys. J. Int.* 117, 453—471.
- Opdyke N. D., Channell J. E. T., 1996. Magnetic stratigraphy. London: Acad. Press, 341 p.
- Pecsi M., Schweitzer F., Balogh J., Balogh M., Havas J., Heller F., 1995. A new loess-paleosol lithostratigraphical sequence at Paks (Hungary). *Loess in Form* 3, 63—78.
- Petrova G. N., Pospelova G. A., 1990. Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron. *Phys. Earth Planet. Int.* 63, 135—143.
- Rolph T. C., Shaw J., Derbyshire E., Wang J. T., 1989. A detailed geomagnetic record from Chinese loess. *Phys. Earth Planet. Int.* 56, 151—164.
- Sartori M., 2000. The Quaternary climate in loess sediments: Evidence from rock and mineral magnetic and geochemical analysis. Doctor of Natural Sciences Thesis, Zürich, 231 p.
- Shackleton N., Berger A., Peltier W., 1990. An alternative astronomical calibration of the Lower Pleistocene time scale based on ODP Site 677. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 81, 251—261.

- Shackleton N., Opdyke N., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale. *Quat. Res.* 3, 39—55.
- Smith J. D., Foster J., 1969. Geomagnetic reversal in Brunhes normal polarity epoch. *Science* 163, 565—567.
- Spassov S., Heller F., Evance M., Yue L. P., Ding Z. L., 2001. The Matuyama/Brunhes Geomagnetic polarity transition at Lingtai and Baoji, Chinese Loess Plateau. *Phys. Chem. Earth* 26, 899—904.
- Sun Y. B., Qiang X. K., Liu Q. S., Bloemendal J., Wang X. L., 2013. Timing and lock-in effect of the Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 14, 4952—4961. <http://dx.doi.org/10.1002/2013gc004828>
- Tauxe L., Herbert T., Shackleton N. J., Kok Y. S., 1996. Astronomical calibration of the Matuyama Brunhes Boundary: consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates. *Earth Planet. Sci. Lett.* 140, 133—146.
- Tsatskin A., Heller F., Gendler T. S., Virina E. I., Spassov S., Pasquier J. Du., Hus J., Hailwood E. A., Vagin V. I., Faustov S. S., 2001. A New Scheme of Terrestrial Paleoclimate Evolution During the Last 1.5 Ma in the Western Black Sea Region: Integration of Soil Studies and Loess Magnetism. *Phys. Chem. Earth* 26(11-12), 911—916.
- Tsatskin A., Heller F., Hailwood E. A., Gendler T. S., Hus J., Montgomery P., Sartori M., Virina E. I., 1998. Pedosedimentary division, rock magnetism and chronology of the loess/palaeosol sequence at Roxolany (Ukraine). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 143, 111—133.
- Verosub K. L., 1982. Geomagnetic excursions: a critical assessment of the evidence as recorded in sediments of the Brunhes Epoch. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* A306(149a), 161—168.
- Wang X., Lovlie R., Chen Y., Yang Z., Pei J., Tang L., 2014. The Matuyama—Brunhes polarity reversal in four Chinese loess records: high fidelity recording of geomagnetic field behavior or a less than reliable chronostratigraphic marker. *Quat. Sci. Rev.* 101, 61—76.
- Wang X., Yang Z., Lovlie R., Sun Z., Pei J., 2006. A magnetostratigraphic reassessment of correlation between Chinese loess and marine oxygen isotope records over the last 1.1 Ma. *Phys. Earth Planet. Int.* 159, 109—117.
- Xiong S. F., Ding Z. L., Liu T. S., 2001. Climatic implications of loess deposits from the Beijing region. *J. Quat. Sci.* 16, 575—582.
- Zheng H. B., An Z. S., Shaw J., 1992. New contributions to Chinese Plio-Pleistocene magnetostratigraphy. *Phys. Earth Planet. Int.* 70, 146—153.
- Zhu R. X., Laj C., Mazaud A., 1994a. The Matuyama—Brunhes and Upper Jaramillo transitions recorded in a loess section at Weinan, north-central China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 125, 143—158.
- Zhu R. X., Zhang R., Deng C. L., Pan Y. X., Liu Q. S., Sun Y. B., 2007. Are Chinese loess deposits essentially continuous. *Geophys. Res. Lett.* 34(17), L17306. doi:10.1029/2007GL030591.
- Zhu R. X., Zhou L. P., Laj C., Mazaud A., Ding Z. L., 1994b. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophys. Res. Lett.* 21, 697—700.