

В. Г. Бахмутов, Д. В. Главацкий

Определение границы Матуяма–Брюнес по результатам палеомагнитных исследований разреза Роксоланы (западное Причерноморье)

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Местоположение границы Матуяма–Брюнес на разных разрезах лессово-почвенной формации северо-западного Причерноморья приурочено к разным стратиграфическим горизонтам и вызывает много дискуссий. По результатам новых палеомагнитных исследований 55-метрового стратотипического разреза четвертичных отложений на берегу Днестровского лимана вблизи с. Роксоланы определена граница Матуяма–Брюнес на глубине 46,6 м на стыке почв лубенского и мартоношского горизонтов. Это согласуется с современными представлениями коллектива украинских ученых о стратиграфии четвертичных толщ юга Украины и не соответствует результатам, по которым эта граница была установлена на глубине 34 м в лессах выше уровня РК₇. Высокоточные измерения, выполненные на современной аппаратуре, позволили выделить первичную компоненту намагниченности пород и надежно определить ее полярность как в лессовых, так и почвенных горизонтах.

В Институте геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины на протяжении многих лет проводятся палеомагнитные исследования с целью построения магнитостратиграфической шкалы территории Украины. В результате палеомагнитного изучения более 60 разрезов, представленных как типично континентальными, так и лиманно-морскими фациями в естественных обнажениях и кернах структурно-картировочных скважин, была предложена магнитостратиграфическая шкала плейстоцена [1–4]. При этом полевые работы и интерпретация полученных результатов выполнялись в тесном контакте с ведущими стратиграфами Украины (П. Ф. Гожик, М. Ф. Веклич, Ю. М. Веклич, Б. Д. Возгрин, А. И. Шевченко, В. Н. Семененко, В. Ю. Зосимович, В. А. Присяжнюк и др.).

Но с развитием аналитической базы и появлением нового фактического материала стало очевидно, что существуют весьма противоречивые толкования как стратиграфических, так и, соответственно, магнитостратиграфических схем. Во многих исследованиях, посвященных магнетизму евроазиатских лессово-почвенных толщ, отмечается “плавающее” положение границы Матуяма–Брюнес. Вероятно, последнее обусловлено процессами педогенеза, что приводит к “задержкам” фиксации направления остаточной намагниченности в породах и, соответственно, к определению положения этой границы как в интергляциальных палеопочвах Венгрии, Чехии, Польши, так и в лессах Австрии, Болгарии, Украины (см. ссылки в [5]).

Для территории Украины стратиграфическое положение границы Матуяма–Брюнес в разное время определяли и на уровне сульского, и на уровне мартоношского, и на уровне широкинского горизонтов [1–4]. Позднее, в серии междисциплинарных исследований лессово-почвенных формаций Западного Причерноморья, одним из ключевых разрезов которых является Роксоланы (46°10'N; 30°27'S), более новые результаты [6, 7] не просто дополнили

существующие педо- и магнито-стратиграфические схемы четвертичных субэаральных отложений, а в корне их изменили. При этом основной упор был сделан именно на результаты по идентификации местоположения границы Матуяма–Брюнес.

В результате работ, выполненных под руководством А. Н. Третьяка [2, 4], граница Матуяма–Брюнес в разрезе Роксоланы определена не была. Исследования разреза коллективом авторов [6, 7] на более современной аналитической базе позволили установить положение границы Матуяма–Брюнес в лессах, залегающих ниже почвы РК6 на глубине около 34 м (рис. 1), что противоречит предыдущим геологическим, палеонтологическим и палеомагнитным данным. Эти материалы легли в основу построения новой педостратиграфической схемы для Западного Причерноморья с последующей ее корреляцией с изотопно-кислородной шкалой [6]. Примечательно, что, несмотря на детальность выполненных работ (образцы отбирались с шагом 5–10 см), ни об одном событии обратной полярности внутри хрона Брюнес не упоминается. Между тем были проведены детальные исследования верхней части разреза Роксоланы и коллективом авторов Института физики земли РАН [8, 9]. На верхних 20-ти м разреза, охватывающих, по мнению авторов, последние ~300 тыс. лет, были выделены две аномальные зоны и соотнесены к экскурсам Моно и Блейк соответственно ~30 и 100 тыс. лет тому назад. Кроме того, резкое изменение угловых компонент поля в нижней части бугского леса проинтерпретировано как экскурс Ямайка, который датируется ~220 тыс. лет тому назад.

Такие противоречивые результаты разных групп авторов обусловлены сложностью выделения первичной компоненты намагниченности (величина сигнала которого зачастую сопоставима с пороговой чувствительностью аппаратуры) и чрезвычайно пестрым составом магнитной фракции, включающей как аллотигенные, так и аутигенные магнитные минералы. Результаты петромагнитных и магнитно-минералогических исследований приведены в публикациях [8–11], притом в [11] указано, что степень педогенеза в разрезе Роксоланы существенно выше, чем в других разрезах Украины.

Для цели наших исследований важными являются выводы вышеперечисленных работ о том, что в лессах обнаружено присутствие терригенных псевдооднородных частиц магнетита, маггемита и местами гематита. Такие зерна являются потенциальными кандидатами для формирования седиментационной (постседиментационной) намагниченности в породах, и это может быть весомым аргументом в пользу возможности выделения первичной компоненты намагниченности. В почвах (насыщенных зернами ферримонтмориллонита, гетита, ферригидрита и гематита [11]) формируется химическая намагниченность, тесно связанная с глинистыми минералами, и магнитные характеристики почв, связанные с минералами железа в основном биохемогенного происхождения. Т. е. в отношении палеомагнитной информативности лессы выглядят более предпочтительными, чем почвы.

Анализ методик выделения первичной компоненты намагниченности, применяемых в перечисленных работах, указывает на следующее. В работе [2] результаты представлены после массовой чистки коллекции переменным магнитным полем (одно-два значения поля в диапазоне 20–30 мТл) и температурой (250–300 °С). При этом пилотная коллекция была размагничена достаточно детально, но ни одной диаграммы Зийдервельда (а это необходимый элемент современных палеомагнитных определений) не приведено.

Для выделения характеристической компоненты намагниченности в работе [8] применена процедура массовой температурной чистки до температур 200, 250, 300 и 350 °С. Для пилотной коллекции образцов было выполнено детальное терморазмагничивание, а компонентный анализ результатов показал, что естественная остаточная намагниченность (ЕОН)

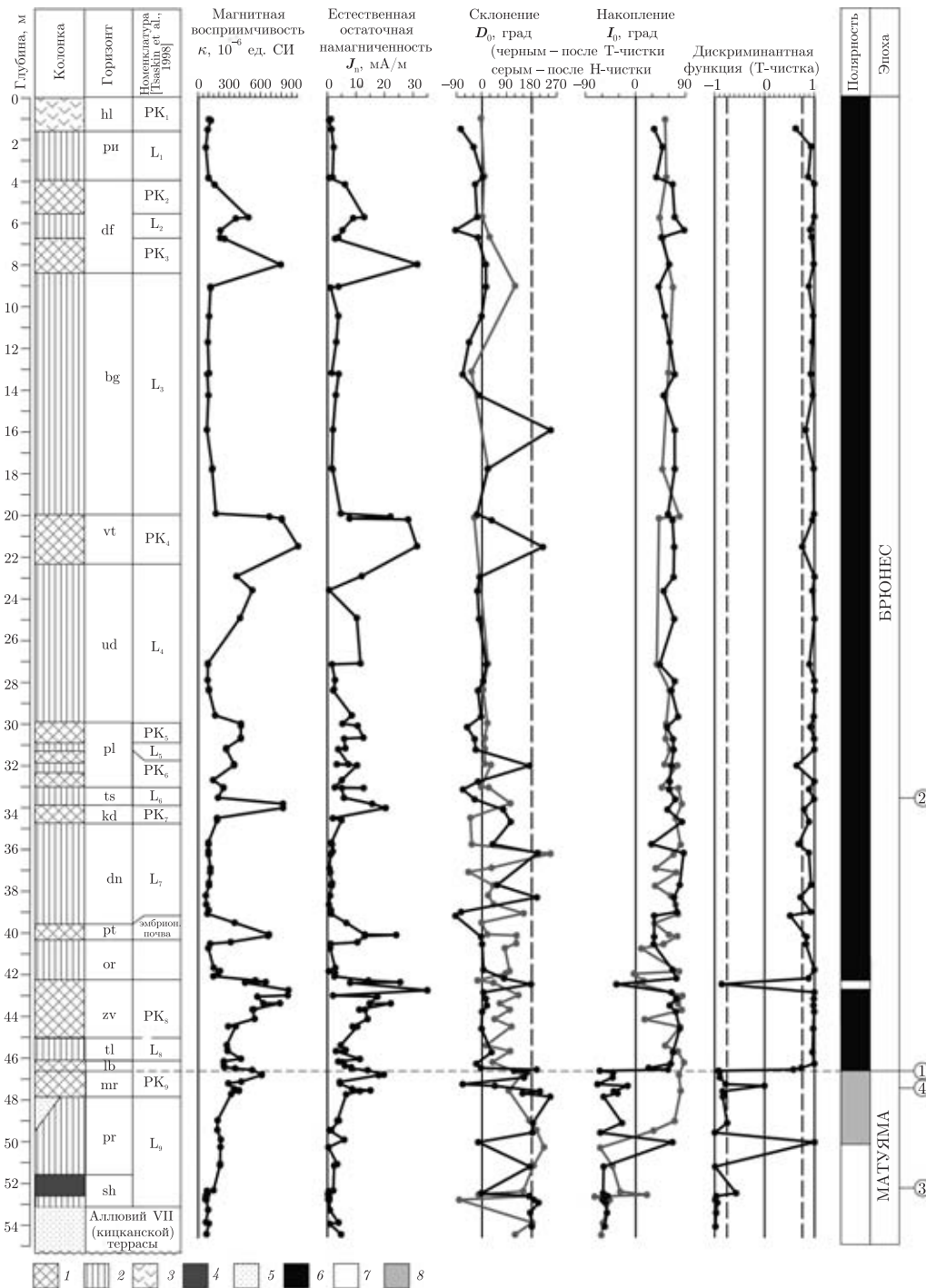


Рис. 1. Результаты палеомагнитного изучения разреза Роксоланы. Цифрами в кружках приведена граница Матуяма–Брюнес: 1 — по нашим данным; 2 — по данным Tsatskin et al. (1998); 3 — по сводной магнито-стратиграфической шкале Украины [Третяк, Вигилянская, 1994]; 4 — по существующим представлениям на основе исследований других разрезов юга Украины [Бахмутов и др., 2005; Гожик, 2013].
 Условные обозначения: 1 — погребенные почвы; 2 — лессы; 3 — современная почва; 4 — гидроморфная почва; 5 — пески; 6 — прямая полярность; 7 — обратная полярность; 8 — обратная полярность по Т-чистке, прямая — по Н-чистке

лессов и почв включает две компоненты — вязкую, которая достигает 80–90% и удаляется при нагреве до 150 °С, и характеристическую, идущую к нулю на диаграммах Зийдервельда в интервале температур 150–550 °С и, по мнению авторов [8, 9], являющуюся первичной.

В научных публикациях [7, 11] представлены магнитные параметры и изменения угловых компонент после магнитной чистки вдоль всего разреза, на основании чего и выделено местоположение границы Матуяма–Брюнес. Измерения были выполнены на высокочувствительном SQUID-магнитометре. Но ни одной диаграммы Зийдервельда в этих работах не приведено (соответствующие диаграммы для одного-двух образцов приведены в работах [12, 13]), что не позволяет оценить степень достоверности выделения обратной полярности на “хвостах” диаграмм.

В связи с этим нами были выполнены независимые детальные палеомагнитные исследования на разрезе Роксоланы с целью определения местоположения границы Матуяма–Брюнес.

Результаты палеомагнитных исследований. В наших исследованиях были сосредоточены усилия на выделении характеристической компоненты намагниченности по результатам детального размагничивания температурой и переменным магнитным полем коллекции образцов, охватывающих все горизонты разреза Роксоланы. Измерения остаточной намагниченности в процессе магнитных чисток выполнялись на магнитометрах JR-6 (Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины) и 2G-SQUID (Институт геофизики Польской академии наук).

Для всех образцов, представленных на рисунке, была выполнена температурная чистка (в печи ММТD80) до 300–350 °С (с шагом 30 °С), а для образцов дублей — размагничивание переменным магнитным полем (на размагничивающей установке LDA-3A) при 12–15 ступенях размагничивания до поля 100 мТл.

Выделяются две компоненты намагниченности: вязкая (составляет до 85–95% и до 80–60% от первоначальной величины намагниченности соответственно для почв и лессов) и высокотемпературная (характеристическая, ChRM). Вязкая компонента удаляется при нагревах до 210–240 °С, т. е. можно сделать предварительный вывод, что при 270–300 °С можно выделить ChRM.

К воздействию переменного магнитного поля (Н-чистка) лессы более стабильны, чем почвы, но соответствующие параметры стабильности для разных горизонтов почв различаются. После удаления вязкой компоненты в почвах (при воздействии поля 20–30 мТл) величина сигнала “высококоэрцитивной” компоненты составляла в среднем 3–5% от первоначальной. Для лессов после удаления вязкой компоненты (поля 20–40 мТл) величина магнитного момента составляла в среднем 10–30% от первоначального.

Для всех подвергшихся магнитной чистке образцов были рассчитаны направления ChRM-компоненты методом компонентного анализа. Для некоторых образцов ортогональные проекции (диаграммы Зийдервельда) при размагничивании в высоких полях не идут к началу координат, в таких случаях направление ChRM-компоненты рассчитывалось с привязкой к конечной точке и началу координат.

Поскольку для каждого уровня имелись результаты размагничивания по нескольким образцам, у нас была возможность проведения объективного контроля для случаев, когда по каким-либо причинам отдельные образцы на некоторых ступенях размагничивания показывали аномальные значения. Особое внимание было уделено зоне от 30,0 до 54,5 м, где на уровне 34,0 м, по данным [6, 7], ожидалась смена полярности геомагнитного поля на границе Матуяма–Брюнес. Отметим, что по результатам Т-чистки характеристическая

компонента выделялась более надежно, чем по результатам размагничивания переменным магнитным полем, и на рисунок вынесены результаты по размагничиванию образцов температурой на 74 уровнях и переменным магнитным полем на 57 уровнях.

На рисунке слева (от литологической и стратиграфической колонок) направо представлены: скалярные магнитные параметры (величины магнитной восприимчивости и ЕОН); величины склонения и наклонения ChRM-компоненты намагниченности, рассчитанной по результатам компонентного анализа после Т- и Н-чистки образцов из одного уровня отбора; дискриминантная функция, расчет которой выполнен по алгоритму, представленному в работе [14], что позволяет более точно выделить зоны прямой и обратной полярности. Последняя процедура выполнена по результатам Т-чистки, как более информативной.

Величины скалярных магнитных параметров полностью согласуются с результатами предыдущих исследований [6, 10, 11], указывающих на их большие значения в почвах вследствие химически контролируемых педогенетических процессов. Почвы характеризуют намного более высокие по сравнению с лессами величины магнитной восприимчивости, достигающие $900 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ в суглинках витачевского горизонта (почва РК₄). В лессах бугского и днепровского горизонтов, и в песках аллювия в подошве разреза величины магнитной восприимчивости минимальны ($70 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ). Величины ЕОН также максимальны в почвах (до 35 мА/м в завадовском горизонте) и минимальны (на два порядка ниже) в лессах и аллювии.

В правой части рисунка представлен палеомагнитный разрез, построенный по результатам Т- и Н-чистки. Граница Матуяма–Брюнес определяется нами на стыке лубенского и мартоношского горизонтов на глубине 46,6 м. Ниже по данным Т-чистки все образцы (за исключением одного на глубине 50,0 м) показывают обратную полярность. Но по данным Н-чистки границу Матуяма–Брюнес следует проводить на глубине 49,5 м, на уровне верхней части приазовского горизонта. Т. е. на участке 46,6–49,5 м результаты Т- и Н-чистки, в отличие от большей части разреза, не согласуются между собой. Также не совсем согласуются результаты на уровне 42–43 м в верхней части завадовского горизонта, где три образца после Н-чистки показывают близкую к обратной полярность, в то время как после Т-чистки обратная полярность выделяется только на одном образце. Соответствующая этому уровню зона обратной полярности выделена на палеомагнитном разрезе.

Таким образом, разное местоположение границы Матуяма–Брюнес по результатам Н- и Т-чистки может быть объяснено образованием аутигенных магнитных минералов био-хемогенного происхождения в процессе педогенеза, характеризующихся разной палеомагнитной стабильностью к воздействию переменного магнитного поля и температуры. Окончательный ответ может быть получен после дополнительных исследований. Тем не менее, отдавая предпочтение результатам Т-чистки, граница Матуяма–Брюнес в разрезе Роксоланы определяется нами на глубине 46,6 м, которая соответствует почве РК₉, по [6], а по Стратиграфической схеме четвертичных отложений Украины — между почвами лубенского и мартоношского горизонтов. В целом это согласуется с современными представлениями о стратиграфии четвертичных толщ юга Украины [15], и опровергает результаты, по которым границы Матуяма–Брюнес определяется на глубине 34 м в лессах выше кайдацкого горизонта (РК₇) [6, 7].

1. Третьяк А. Н., Вигилянская Л. И. Магнито-стратиграфическая шкала плейстоцена Украины // Геофиз. журн. – 1994. – 16, № 2. – С. 3–14.
2. 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.

3. *Третьяк А. Н.* Естественная остаточная намагниченность и проблема палеомагнитной стратификации осадочных толщ. – Киев: Наук. думка, 1983. – 256 с.
4. *Третьяк А. Н., Шевченко А. И., Дудкин В. П., Вигилянская Л. И.* Палеомагнитная стратиграфия опорных разрезов позднего кайнозоя юга Украины. – Киев: АН УССР, Ин-т геол. наук, 1987. – 50 с.
5. *Бахмутов В. Г., Мокряк И. Н., Скарбовийчук Т. В., Якухно В. И.* Результаты палеомагнитных исследований разреза дунайских террас и проблемы магнитостратиграфии плейстоцена Западного Причерноморья // Геофиз. журн. – 2005. – **27**, № 6. – С. 980–991.
6. *Tsatskin A., Heller F., Gendler T. S. et al.* 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 (A). – 2001. – **26**, No 11. – /12. – P. 911–916.
7. *Tsatskin A., Heller F., Hailwood E. et al.* Pedosedimentary division, rock magnetism and chronology of the loess/palaeosol sequence at Roxolany (Ukraine) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 1998. – **143**. – P. 111–133.
8. *Пилипенко О. В., Шаронова З. В., Трубишин В. М., Диденко 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.
9. *Шаронова З. В., Пилипенко О. В., Трубишин В. М. и др.* Восстановление геомагнитного поля по палеомагнитным записям в лессово-почвенном разрезе Роксоланы (р. Днестр, Украина) за последние 75000 лет // Физика Земли. – 2004. – № 1. – С. 4–13.
10. *Evans M., Heller F.* Environmental magnetism. – San Diego: Acad. Press, 2003. – 294 p.
11. *Gendler T. S., Heller F., Tsatskin A. et al.* Roxolany and Novaya Etuliya – key sections in the western Black Sea loess area: Magnetostratigraphy, rock magnetism, and paleopedology // Quaternary International. – 2006. – No 152–153. – P. 78–93.
12. *Du Pasquier J.* Environmental paleomagnetic study of the loess/paleosol sequence from Roxolany (Ukraine). Diploma Thesis, Institute für Geophysik, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. – 1999. – 59 p.
13. *Sartori M.* The quaternary climate in loess sediments: Evidence from rock and mineral magnetic and geochemical analysis. Doctor of Natural Sciences Thesis. – Zürich. – Institute für Geophysik, Swiss Federal Institute of Technology, 2000. – 231 p.
14. *Man O.* On the identification of magnetostratigraphic polarity zones // Studia Geoph. Geodaetica. – 2008. – No 52. – P. 173–186.
15. *Гожиш П.* До питання вивчення розрізу Роксолани // Лесовий покрив Північного Причорномор'я: Зб. наук. праць (до XVIII українсько-польського семінару. Роксолани, 8–13 верес. 2013 р.). – Люблін: KARTPOL s. c. Lublin, 2013. – С. 17–33.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 23.04.2014

В. Г. Бахмутов, Д. В. Главацкий

Визначення границі Матуяма–Брюнес за результатами палеомагнітних досліджень розрізу Роксолани (західне Причорномор'я)

Місцерозташування границі Матуяма–Брюнес на різних розрізах лессово-грунтової формації північно-західного Причорномор'я відповідає різним стратиграфічним горизонтам і викликає багато дискусій. За результатами нових палеомагнітних досліджень 55-метрового стратотипового розрізу четвертинних відкладів на березі Дністровського лиману поблизу с. Роксолани визначено границю Матуяма–Брюнес на глибині 46,6 м на межі ґрунтів лубенського і мартоносського горизонтів. Це узгоджується із сучасними уявленнями українських учених про стратиграфію четвертинних товщ півдня України і не збігається

з результатами, за якими цю межу було встановлено на глибині 34 м у лесах вище рівня PK₇. Високоточні вимірювання, що виконані на сучасній апаратурі, дозволили виділити первинну компоненту намагніченості порід і надійно визначити її полярність як у лесових, так і ґрунтових горизонтах.

V. G. Bakhmutov, D. V. Hlavatskyi

Identification of the Matuyama-Brunhes boundary by paleomagnetic studies of the Roxolany profile (Western Black Sea region)

The position of the Matuyama-Brunhes boundary in different sections of the northwestern Black Sea loess-soil formation is located in the different stratigraphic horizons, which causes a lot of discussion. New paleomagnetic studies of the 55-meter Quaternary key section on the Dniester estuary near the village of Roxolany determine the Matuyama-Brunhes boundary at a depth of 46.6 m between the Lubny and Martonosha soil horizons. This agrees with modern knowledge of Ukrainian scientists about Quaternary records in south Ukraine and is not consistent with the results, which identified this boundary at a depth of 34 m in loesses above the level of PK₇. The primary component of the natural remanent magnetization and their polarity were identified both in loess and soil horizons due to the detailed measurements on modern equipments.