

Граница Матуяма—Брюнес в лессово-почвенном разрезе Долинское, южная Украина

**В. Г. Бахмутов¹, Д. В. Главацкий¹, Ю. М. Веклич², В. В. Шпыра¹,
В. И. Якушно¹, 2021**

¹ Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

² Обособленное подразделение «Украинский геологоразведочный институт»
Государственного предприятия «Украинская геологическая компания»,
Киев, Украина

Поступила 5 июля 2021 г.

Представлены результаты палеомагнитных исследований отложений раннего—среднего плейстоцена, обнаженных на левом берегу р. Дунай в нижнем ее течении у с. Долинское, южная Украина. Мощные субаквальные отложения перекрыты стратиграфически полной лессово-почвенной серией (от крыжановского до днепровского горизонта) и представляют собой уникальный палеоклиматический архив в самой южной части Восточно-Европейской лессовой провинции. Граница Матуяма—Брюнес (МБ) определена в подошве нижнеширокинского горизонта (sh_{1b1}), а не в мартоношском горизонте, как предполагалось ранее. Новые данные хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными ранее на разрезах Роксоланы и Вязовок, где граница МБ была обнаружена на том же стратиграфическом уровне — в нижнеширокинском субклиматолите. В отличие от континентальных записей плейстоцена в Китае и Центральной Европе, где граница МБ часто определялась в лессовом горизонте (который соответствует холодному этапу), в украинской субаэральной формации граница МБ установлена в почвенном горизонте (представляющий теплый этап), при этом в хроне Брюнес выделено восемь, а не семь ледниково-межледниковых циклов. Это может свидетельствовать о стратиграфической полноте лессово-почвенных серий Украины, сравнимой с эталонными глобальными морскими и континентальными палеоклиматическими архивами. Дальнейшие палеомагнитные исследования лессово-почвенных серий других регионов Украины позволят пересмотреть и сопоставить до сих пор противоречивые стратиграфические и магнитостратиграфические схемы плейстоценовых отложений.

Ключевые слова: магнитостратиграфия, лессово-почвенная формация, плейстоцен, граница Матуяма—Брюнес, Дунай, палеомагнитный метод.

Введение. Хотя лессово-почвенная формация Украины является одной из наиболее мощных и полных континентальных «записей» изменений климата плейстоцена в Евразии [Веклич, 1982], она остается пока недостаточно исследованной методами геохронологии, включая магнитостратиграфию. В то же время петромагнитный и палеомагнитный методы успешно зарекомендовали себя и широко применяются при корреляции и датировании лессово-почвенных отложений Китайского лессового плато, Сибири, Европы, Северной

Америки и других регионов [Evans, Heller, 2003 и др.]. Особая роль здесь отводится определению местоположения границы смены эпох магнитной полярности Матуяма—Брюнес (МБ), возраст которой оценивается около 780 тыс. лет тому назад [Tauxe et al., 1996], а по изотопно-кислородной шкале эта граница соотносится со стадией MIS 19 (Marine oxygen isotope stage 19) [Shackleton et al., 1990]. Эта граница является ключевым хронологическим маркером, который позволяет, независимо от стратиграфического расчленения и гео-

графического положения плейстоценовых лессово-почвенных толщ, коррелировать их между собой в глобальном масштабе и, соответственно, вносить ограничения на оценку возраста пород.

Однако результаты палеомагнитных исследований, проведенных на лессово-почвенных разрезах Украины как отечественными, так и зарубежными коллективами, весьма противоречивы. Подобным образом в исследованиях, посвященных магнетизму евразийских лессово-почвенных толщ, отмечается «плавающее» положение этой границы. Так, положение границы МБ в лессово-почвенных толщах Китая и Центральной Европы определялось как в интергляциальных палеопочвах, так и в лессах (см. детальный обзор в работе [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020]). К возможным причинам такого несоответствия можно отнести: перерывы в осадконакоплении; процессы перемагничивания и «задержки» фиксации направления остаточной намагниченности в породе; сложности в выделении первичной компоненты намагниченности; противоречие в датировании лессово-почвенных толщ радиоуглеродным и термолюминесцентным методами. Как следствие, некорректное стратиграфическое расчленение и корреляция локальных разрезов. Поэтому проблема климатостратиграфического положения границы МБ была и остается одним из фундаментальных вопросов палеогеографии, хроностратиграфии и палеоклиматологии плейстоцена.

Развитие в последнее десятилетие аналитической базы и получение нового фактического материала настоятельно требуют новой интерпретации ранее полученных результатов и пересмотра стратиграфических (и магнитостратиграфических) схем. С этой проблемой авторы настоящей статьи столкнулись в ходе проведения повторных палеомагнитных исследований ключевых разрезов плейстоцена Украины, которые выполнялись на новой аппаратуре. Граница МБ была определена нами в двух разрезах — Роксоланы и Вязовок (см. таблицу) — в подошве широкинского (sh)

почвенного комплекса. Ниже представлены новые результаты палеомагнитных исследований разреза Долинское и их интерпретация в свете наших магнитостратиграфических данных по разрезам Роксоланы и Вязовок [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020].

К истории определений границы Магуяма—Брюнес на разрезах украинской лессовой провинции. В ранних работах на территории Украины граница МБ определялась в березанском (br) лессовом горизонте [Третьяк, Волок, 1976], в кровле мартоношской (mr) почвы или в сульськом (sl) лессе [Третьяк, 1983]. Позднее в работах [Третьяк и др., 1987, 1989; Третьяк, Вигилянская, 1994; Вигилянская, Третьяк, 2000, 2002] положение границы МБ все чаще определялось в широкинском почвенном горизонте, что нашло свое отображение в Магнитостратиграфической шкале четвертичных отложений Украины [Третьяк, Вигилянская, 1994].

В 2000-х годах вышли работы коллектива авторов [Tsatskin et al., 2001; Gendler et al., 2006], в которых на основании палеомагнитных исследований двух разрезов — Роксоланы и Новая Этулия — была представлена новая педостратиграфическая схема Западного Причерноморья и выполнена ее корреляция с изотопнокислородной шкалой. Граница МБ была установлена в подошве характерного комплекса трех почв (так называемый «триплет»), соотносимого ранее с прилукским (pl) горизонтом в разрезе Роксоланы [Gozhik et al., 1995] либо с лубенским (lb) горизонтом в разрезе Этулия [Веклич, Веклич, 1993]. Схема [Tsatskin et al., 2001] кардинально отличается от всех предыдущих, разработанных украинскими исследователями, и весьма противоречива относительно украинской стратиграфии, в которой положение границы МБ принимается в кровле [Веклич и др., 1984, 1993; Gozhik et al., 1995] либо в подошве [Герасименко, 2010; Гожик, 2012] мартоношского климатолита.

В ходе палеомагнитных исследований разрезов Долинское [Бахмутов и др., 2005] и Аджамка [Сіренко та ін., 2008] граница

МБ была определена в верхней части мартоношского горизонта, что потом цитировалось во многих работах (см., например, [Бахмутов, Главацкий, 2016; Bondar et al., 2019]) как подтверждение существующих тогда стратиграфических схем [Веклич и др., 1984, 1993; Gozhik et al., 1995].

С началом нового этапа работ, при детальных исследованиях с привлечением новой измерительной магнитометрической аппаратуры, положение границы МБ было нами определено в подошве широкоинского климатолита. Ниже в таблице в хронологическом порядке приведены основные этапы этих исследований.

Геологическое описание и методика исследований. Лессово-почвенная толща разреза Долинское (45°30' с.ш.; 28°18' в.д.), расположенного между селом Долинское и городом Рени, в 4 км от левого берега Дуная, вскрывается серией оврагов, балок и карьеров на протяжении нескольких сот метров. Здесь мощные субаквальные отложения (более 17 м) перекрываются глинистыми почвами мощностью до 8 м, покрытые лессово-почвенной серией среднего плейстоцена мощностью более 17 м. В наших расчистках мы не вскрыли позднеплейстоценовых отложений.

В 10 км к северо-востоку на террито-

Определение положения границы Матуяма—Брюнес с участием авторов статьи. Месторасположение исследованных разрезов приведено на рис. 1

Разрез	Начало исследований	Положение границы МБ (горизонт)	Ссылки
Курортное (Приморское)	1999	не определено	Nawrocki et al., 1999
Долинское	2005	в подошве «триплета» почв, интерпретированных как mg (ранее считавшиеся lb)	Бахмутов и др., 2005
Аджамка	2008	в кровле почвы mg	Сіренко та ін., 2008
Роксоланы	2014	на стыке почв lb и mg согласно расчленению [Gozhik et al., 1995]	Бахмутов, Главацкий, 2014; Bakhmutov et al., 2017; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2019
Боянычи, Коршев	2016	не определено	Главацкий та ін., 2016; Bakhmutov et al., 2017
Вязовок	2016	в кровле почвы sh _{1b1}	Главацкий и др., 2016; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020
Меджибож, Головчинцы	2019	не определено; mg, sh ₃ — прямой полярности	Hlavatskyi, 2019; Главацкий и др., 2021
Старые Кайдаки	2019	не определено; mg, sh ₃ — прямой полярности	Hlavatskyi, 2019; Hlavatskyi et al., 2021
Роксоланы	2020	стратиграфическое расчленение было пересмотрено: граница МБ приурочена к подошве почвы sh _{1b1} (ранее считавшейся lb); «триплет» интерпретируется как zv ₃	Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020
Долинское	2021	обнаружена на 13,5 м ниже от [Бахмутов и др., 2005] в подошве почвы sh _{1b1} ; «триплет» интерпретируется как zv ₃	эта статья

Примечание: жирным шрифтом выделен год, когда впервые была определена граница МБ.



Рис. 1. Местоположение разрезов Долинское (и других разрезов, изученных авторами) на карте Украины (а) и Причерноморской низменности (б): 1 — местоположение разрезов.

Fig. 1. Location of the Dolynske section (and other sections studied formerly by the authors of the present study) on the map of Ukraine (а) and the Black Sea Lowland (б): 1 — location of outcrops.

рии Молдовы расположены два известных лессово-почвенных разреза: Этулия [Веклич, Веклич, 1993] и Новая Этулия [Tsatskin et al., 2001]. Аллювиальные отложения и фауна млекопитающих разреза Долинское достаточно хорошо изучены [Константинова, 1967; Matoshko et al., 2019].

Полевые работы на разрезе Долинское, проводимые в 2020 г., включали глубокую расчистку, геолого-стратиграфическое описание, фиксацию координат секций разреза GPS-приемником, отбор образцов. Ориентированные относительно магнитного меридиана монолитные блоки пород отбирались сверху вниз по разрезу сплошными секциями, из которых в лабораторных условиях изготавливались стандартные ориентированные образцы кубической формы с ребром 20 мм. Всего было отобрано 85 штучков и 296 неориентированных образцов. Более полная нижняя часть разреза была обнаружена и отображена в 200 м западнее предыдущего профиля Долинское-1 [Бахмутов и др., 2005].

В статье [Бахмутов и др., 2005] приведены две версии расчленения разреза До-

линское: первоначальная по геологическим данным (рис. 2, а) и окончательная (рис. 2, б), которая отличается от первой существенным удревнением отложений согласно установленному положению границы МБ (рис. 2, слева). Также приводилось сопоставление с номенклатурой [Tsatskin et al., 2001] из разрезов Роксоланы и Новая Этулия (рис. 2, в). Во избежание путаницы в настоящей статье применена китайская лессовая номенклатура [Liu, 1985; Kukla, 1987], которая хорошо зарекомендовала себя в четвертичных исследованиях всего мира (см. [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020]). В этой системе названия горизонтов образованы буквами S и L с последующими номерами горизонтов, а префикс D обозначает первую букву названия разреза Долинское (рис. 2, г).

В ходе полевых работ в 2020 г. на основе литолого-палеопедагогических характеристик было предложено новое стратиграфическое расчленение. С нашей точки зрения, верхний лессовый горизонт (D-L2) следует соотносить с днепровским (dn) климатолитом, а наиболее развитая красноватая по-

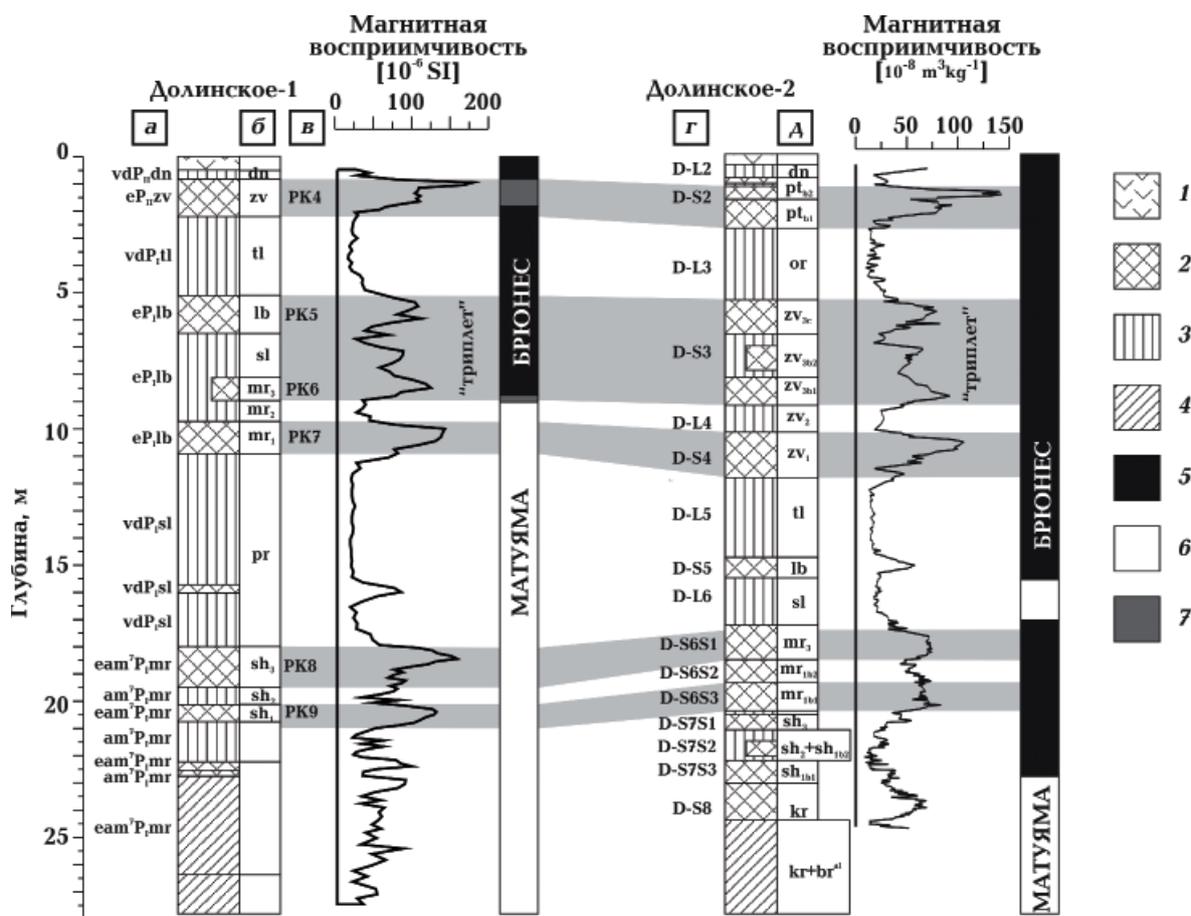


Рис. 2. Сравнение данных по магнитной восприимчивости и палеомагнитных колонок разрезов Долинское-1 [Бахмутов и др., 2005] и Долинское-2 (эта статья; см. пояснения в тексте): 1—4 — литология (1 — современная почва, 2 — погребенная почва, 3 — лесс и лессовидный суглинок, 4 — песок); 5—7 — полярность (5 — прямая, 6 — обратная, 7 — аномальная).

Fig. 2. Comparison the data on the magnetic susceptibility and palaeomagnetic columns of the Dolynskoe-1 [Bakhmutov et al., 2005] and Dolynskoe-2 sections (this paper; see explanations in the text): 1—4 — lithology (1 — recent soil, 2 — palaeosol, 3 — loess and loess-like loam, 4 — sand); 5—7 — polarity (5 — normal, 6 — reversed, 7 — anomalous).

чва под самым нижним мощным лессом (на глубине 17—20 м) интерпретируется как мартоношская (D-S6 на рис. 2, Д). Таким образом, граница МБ не может проходить существенно выше мартоношского горизонта, а именно в «триплет» менее развитых почв (рис. 2, слева), как предложено в работе [Бахмутов и др., 2005]. Кроме того, под мартоношским горизонтом в профиле Долинское-2 были вскрыты отложения двух-трех почв широкоинского этапа и верхняя почва крыжановского (kr) климатолита. По магнитным данным из разрезов Роксоланы и Вязовок [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020] почвы D-S2, D-S3, D-S4 и D-S5 коррелируют с

потягайловским (pt) климатолитом, верхнезавадовским (zv_3) и нижнезавадовским (zv_1) субклиматолитами и лубенским климатолитами (см. рис. 2, Д) соответственно. По данным Ю. Веклича, почвенные комплексы в этом интервале следует расчленять как завадовский (D-S2), лубенский (D-S3, D-S4) горизонты, а слабо развитую почву D-S5 рассматривать как эмбриональную почву внутри сульского холодного этапа. Несмотря на расхождения в расчленении интервала позднего среднего плейстоцена, положение границы МБ признается всеми соавторами в нижнеширокинском субклиматолите, как будет показано ниже.

Измерения магнитной восприимчивости и анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) выполнялись на каппа-мостике МФК1-ФВ, а естественной остаточной намагниченности — на спинмагнитометре JR-6. Для контроля магнитной текстуры отложений образцы, у которых параметры АМВ не соответствовали осадочной текстуре (минимальная ось эллипсоида более чем на 20° отклонялась от нормали к плоскости напластования), в последующих измерениях отбраковывались. Для исключения эффекта подмагничивания магнитометр был размещен в немагнитной комнате ММЛФС. Образцы подвергались стандартным процедурам магнитной чистки: ступенчатому терморазмагничиванию в установке ММТD80 с остаточным полем <10 нТл, также расположенной в немагнитной комнате, а образцы-дубли — размагничиванию переменным магнитным полем на установке LDA-3A. Ступенчатое терморазмагничивание проводилось при пяти значениях температур (150, 210, 240, 270, 295 °С) с контролем изменений магнитной восприимчивости после каждой ступени нагрева для отслеживания возможных минералогических изменений. Часть образцов-дублей была подвергнута размагничиванию переменным магнитным полем от 3 до 80 мТл с шагом 3—20 мТл.

Для выделения направлений характеристической компоненты намагниченности (ChRM) использовалась программа Remasoft 3.0 [Chadima, Hroudá, 2006], расчеты компонент намагниченности выполнялись отдельно для каждого образца методом наименьших квадратов [Kirschvink, 1980].

Результаты. Всего в интервале глубин от 14 до 25 м, где ожидалась граница МБ, было ступенчато размагничено температурой 87 образцов и переменным магнитным полем (включая гибридное размагничивание) 18 образцов. Как и ожидалось, данные по температурному размагничиванию оказались более информативными, что типично для южно-украинских лессов [Бахмутов, Главацкий, 2016], и далее акцентируется внимание именно на данных терморазмагни-

чивания. Естественная остаточная намагниченность состоит из двух компонент. Менее стабильная компонента удаляется при температурах до 210—240 °С или при переменных полях до 10—15 мТл. Более стабильная (ChRM) компонента составляет менее 10 % от начальной намагниченности и зачастую не превышает 3—5 %.

В большинстве образцов из почв D-S5, D-S6, D-S7 (рис. 3, а) эта стабильная компонента после 240 °С уменьшается в направлении начала диаграмм Зийдверельда и показывает прямую полярность. В других образцах из лессового горизонта D-L6, почвенного горизонта D-S8 и нижней части почвы D-S7S3 (рис. 3, б) эта компонента имеет обратную полярность. На рис. 4 вынесены стереографические проекции векторов ChRM (принятые как таковые при нагревах до 270 °С и размагничивании переменным полем 15 мТл) и их статистические параметры отдельно для образцов прямой (рис. 4, а) и обратной (рис. 4, б) полярности.

В интервале глубин от 16,8 до 22,8 м результаты указывают на исключительно прямую полярность, что соответствует хрону Брюнес. В интервале от 13,8 до 15,5 м ChRM компоненты образцов менее стабильны, и некоторые рядом отобранные образцы дают противоречивые результаты. Полярность этой части разреза нами интерпретируется как прямая. На глубине от 15,5 до 16,8 м и ниже 22,8 м были выделены две зоны обратной полярности, которые мы интерпретируем соответственно как экскурс Big Lost (~540—580 тыс. лет назад) [Laj, Channell, 2007] и верхнюю часть хрона обратной полярности Матуяма. Таким образом, граница МБ нами определена на глубине 22,8 м в нижнеширокинском почвенном горизонте sh_{1b1}.

Обсуждение. Раньше результаты палеомагнитных исследований из двух близлежащих к Долинскому разрезов (Новая Этулия и Роксоланы) были взяты за основу при создании региональной хроностратиграфической и педостратиграфической схемы региона Западного Причерноморья [Tsatskin et al., 2001]. При этом грани-

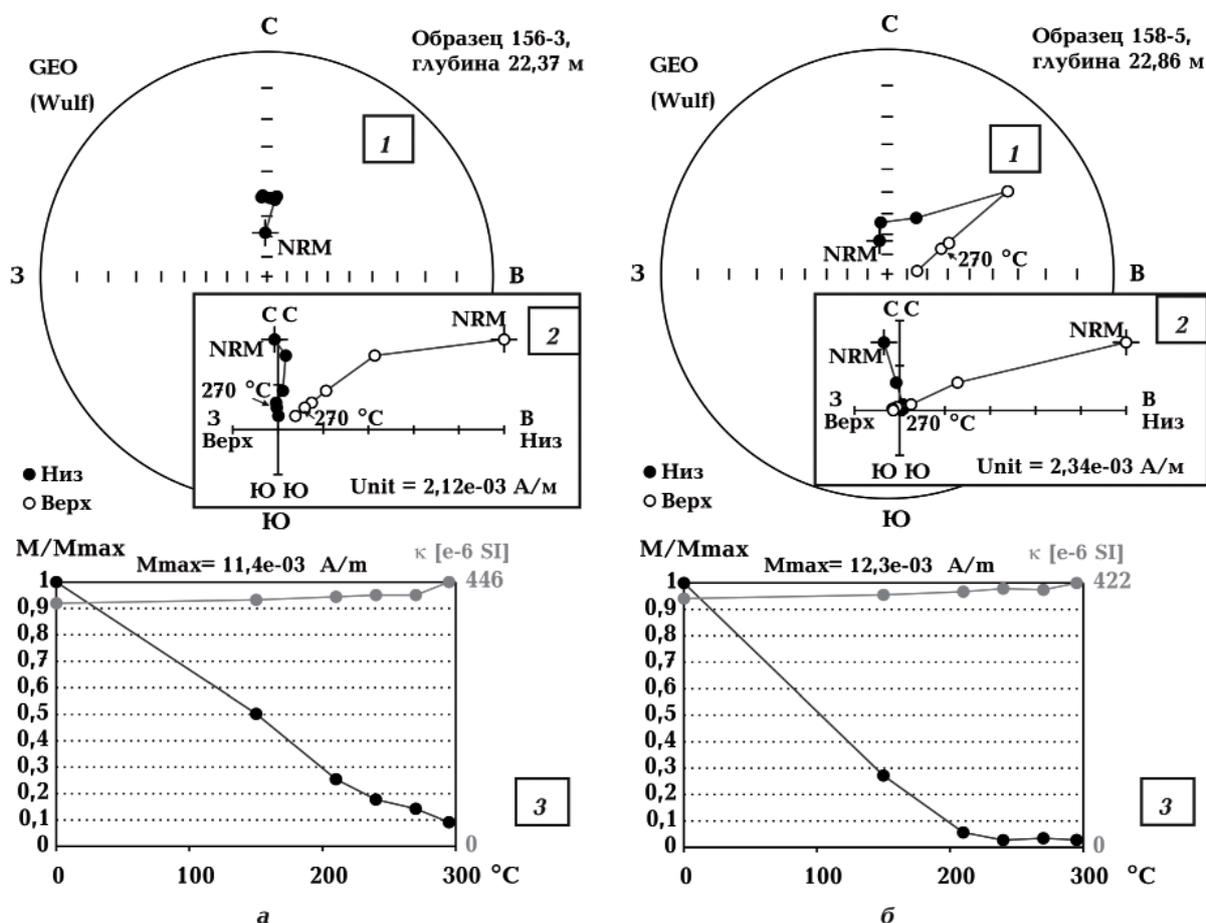


Рис. 3. Примеры пошагового размагничивания температурой образцов с прямой (а) и обратной (б) полярностью из нижней ширококинской почвы (sh_{1b1}) разреза Долинское: 1 — стереографические проекции направлений намагниченности, пустые (полные) точки — проекции векторов на верхнюю (нижнюю) полушару в проекции Ламберта; 2 — диаграммы Зийдверельда; 3 — кривые размагничивания NRM (M/M_{max}).

Fig. 3. Examples of stepwise thermal demagnetization of soil specimens of normal (a) and reversed (b) polarity from the Lower Shyrokyne subunit ($sh_{1b1}/D-S7S3$) at the Dolynske section: 1 — stereographic projections of demagnetization directions (full and open points represent projections in the lower and upper hemispheres, respectively); 2 — orthogonal demagnetization paths (Zijderveld diagrams) on horizontal and vertical planes; 3 — NRM intensity decay curves of demagnetization (M/M_{max}).

ца МБ была указана в верхней части педокомплекса РК7 (по нашей номенклатуре S4), который был скоррелирован с MIS 21. Кроме того, сообщалось о субхроне Jaramillo в педокомплексе РК8 (эквивалент S6) разреза Новая Этулия. Однако, по нашему мнению, в основу этой схемы были заложены весьма противоречивые данные. В работах [Bakhmutov et al., 2017; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2019, 2020] авторы постарались детально проанализировать материалы предыдущих палеомагнитных исследований, в том числе обращая внимание на проблемы интерпретации палео-

магнитных данных по лессово-почвенным отложениям юга Украины. Наши данные по разрезу Роксоланы принципиально отличаются от ранее полученных результатов авторов [Tsatskin et al., 2001] по местоположению границы МБ и не подтверждают обратную полярность интервала между палеопочвами РК7 (S4) и РК9 (S7), который соотносили с хроном Матуяма. По нашим данным граница МБ в разрезе Роксоланы была определена на 12,6 м ниже, в подошве ширококинского педокомплекса (S7) [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020].

Положение границы МБ в разрезе До-

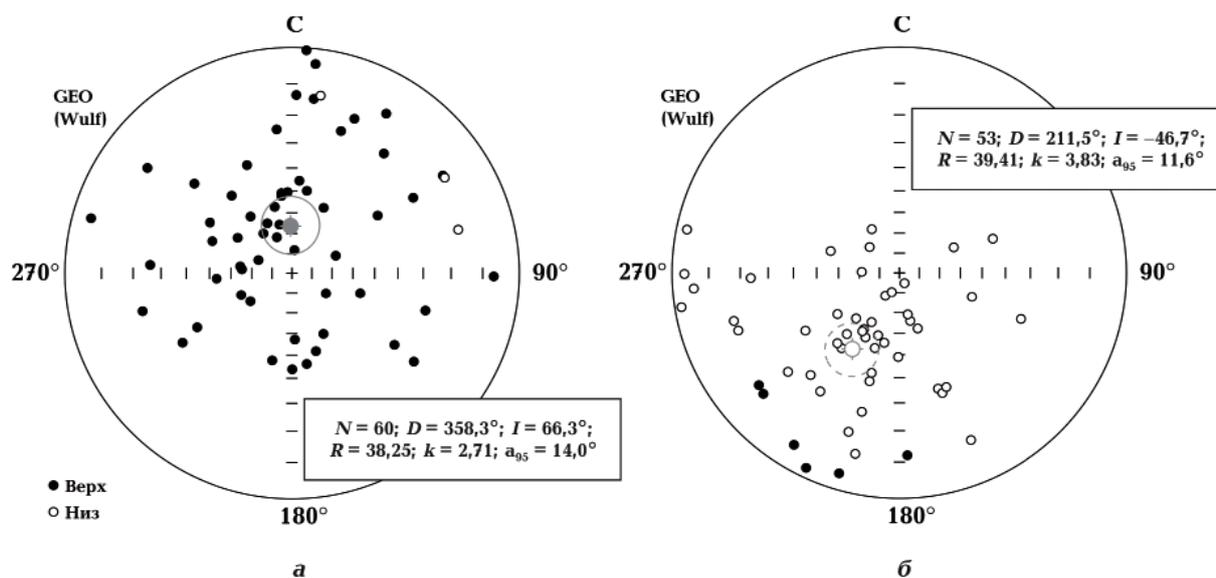


Рис. 4. Стереографические проекции направлений векторов NRM, рассчитанных в процессе размагничивания магнитным полем и температурой образцов прямой (а) и обратной (б) полярности разреза Долинское. Залитые (полые) точки — проекции векторов на нижнюю (верхнюю) полусферу в проекции Вульфа. Отдельно для проекций векторов рассчитаны средние значения величин: N — количество образцов; D — склонение, I — наклонение, R — длина результирующего вектора; k — мера группирования векторов в статистике на сфере Фишера, a_{95} — радиус круга доверия (в градусах) для среднего направления компоненты NRM с вероятностью 95 % [Butler, 1992].

Fig. 4. Stereographic projections of NRM directions calculated after alternating field and thermal demagnetization of specimens of normal (a) and reversed (b) polarity from the Dolynske section. Full and open points represent projections in the lower and upper hemispheres, respectively. Average values for vectors projections were calculated: N — quantity of specimens; D — declination, I — inclination, R — resultant vector length; k — precision parameter, a_{95} — confidence limit [Butler, 1992].

линское хорошо согласуется с результатами, полученными нами ранее на разрезах Роксоланы и Вязовок. На всех трех разрезах граница МБ определена на одном и том же педостратиграфическом уровне, в нижней части нижнеширокинского субклиматолита sh_{1b1} (S7S3), который предварительно коррелируем с MIS 19c [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020].

В большинстве магнитостратиграфических записей китайских лессово-почвенных разрезов граница МБ определяется в лессовом слое L8 [Spassov et al., 2003; см. также ссылки в Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020]. Здесь возникает проблема климатостратиграфической несогласованности положения границы МБ в наземных и глубоководных записях: в субэаральных отложениях она регистрируется в лессовой пачке (формировавшейся в холодный период), а в морских отложениях — в MIS 19, пред-

ставляющим теплый период [Tauxe et al., 1996].

В работах [Zhou, Shackleton, 1999; Spassov et al., 2003] отмечается, что различие в стратиграфическом положении границы МБ можно объяснить разными глубинами фиксации (захвата) в осадках остаточной намагниченности уже после осаждения эолового материала (гипотеза lock-in depth), и этот интервал глубин в китайских лесах может достигать порядка 2—3 м. Согласно такой интерпретации предполагаемое положение границы МБ в породах Китайского лессового плато может быть перемещено выше в зону L8—S7, и тогда палеопочва S7 будет коррелировать с MIS 19, а S8 — с MIS 21 [Spassov et al., 2003].

Однако некоторые авторы (см., например, [Wang et al., 2006; Jin, Liu, 2011; Bolshakov, 2017]) подвергли сомнению гипотезу lock-in depth. Они выделили восемь

палеопочвенных комплексов в хроне Брюнес (от S1 до S8, где S8 вместо S7 соответствует MIS 19), по-прежнему объединяя в один педокомплекс MIS 13—15 (S5) и вводя дополнительную межстадиальную почву MIS 18.2 (S7) [Wang et al., 2006] или разделяя стадии MIS 13 (S5) и MIS 15 (S6) [Bol'shakov, 2017; Jin et al., 2019]. Эта интерпретация подтверждается данными из других разрезов в центральной и юго-восточной частях Китайского лессового плато [Heller, Liu, 1984; Wang et al., 2014; Liu et al., 2015; Jin et al., 2019], в которых граница МБ проходит в палеопочве S8 ниже лесса L8.

Учитывая то обстоятельство, что восемь глобальных ледниково-межледниковых циклов, идентифицированных в хроне Брюнес по глубокоководным изотопным записям, также отображены в лессово-почвенной формации Украины, расхождения в количестве ледниково-межледниковых циклов, определенных по глубокоководным и другим наземным палеоклиматическим данным, по нашему мнению, в значительной степени связаны с неполнотой лессовых последовательностей других регионов. Таким образом, на данном этапе вопрос о корреляции лессово-почвенных толщ юга Украины с породами Китайского лессового плато по местоположению границы МБ остается открытым.

Заключение. По результатам новых палеомагнитных исследований, проведенных на разрезе Дунайских террас у с. До-

линское, граница МБ была определена на глубине 22,8 м в подошве нижнеширокинского горизонта (sh_{1b1}), а не в мартоношском горизонте, как предполагалось ранее. «Триплет» характерных почв, который считался ранее мартоношским климатолитом, интерпретируется нами как завадовский (согласно точке зрения Ю. Веклича, лубенский) климатолит. Новые данные хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными нами ранее на разрезах Роксоланы и Вязовок, где граница МБ была обнаружена на том же стратиграфическом уровне — в нижнеширокинском субклиматолите. Это подтверждает надежность палеомагнитного метода при построении корреляционных схем стратиграфически полных последовательностей, включая отдаленные лессово-почвенные разрезы. Дальнейшие магнитостратиграфические исследования опорных разрезов из разных регионов позволят провести надежную корреляцию лессово-почвенных отложений ледниковой и внеледниковой зон украинской субаэральной формации, что в свою очередь послужит основой для усовершенствования модифицированной схемы четвертичных отложений Украины.

Благодарности. Исследования выполняются при поддержке гранта 2020.02/0406 «Магнітні індикатори палеокліматичних змін у відкладах лессово-грунтової формації України» Национального фонда исследований Украины.

Список литературы

- Бахмутов В. Г., Главацкий Д. В. Новые данные по границе Матуяма-Брюнес в разрезе Роксоланы. *Геол. журн.* 2014. № 2. С. 73—84. <http://dx.doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2014.2.139072>
- Бахмутов В. Г., Мокряк И. Н., Скарбовийчук Т. В., Якухно В. Н. Результаты палеомагнитных исследований разреза дунайских террас и проблемы магнитостратиграфии плейстоцена Западного Причерноморья. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 980—991.
- Бахмутов В. Г., Главацкий Д. В. Проблемы магнитостратиграфии плейстоценовых лессово-почвенных отложений юга Украины. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 4. С. 73—84. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107801>.
- Веклич М. Ф. Палеозатанность и стратотипы почвенных формаций верхнего кайнозоя. Киев: Наук. Думка, 1982. 201 с.
- Веклич М. Ф., Веклич Ю. М. Этапо- и стратотипы лиманно-морского плейстоцена Азово-Черноморского бассейна. Киев: Изд. Ин-та географии НАН Украины, 1993. 186 с.
- Веклич М. Ф., Сиренко Н. А., Матвишина Ж. Н., Мельничук И. В., Передерий В. И.,

- Турло С. И., Веклич В. М., Возгрин Б. Д. Палеогеографические этапы и детальное стратиграфическое расчленение плейстоцена Украины. Киев: Наук. думка, 1984. 32 с.
- Веклич М. Ф., Сиренко Н. А., Матвишина Ж. Н., Мельничук И. В., Герасименко Н. П., Передерий В. И., Турло С. И. Стратиграфическая схема четвертичных отложений Украины. Стратиграфические схемы фанерозоя и докембрия Украины. Киев: Наук. думка, 1993. 76 с.
- Вигилянская Л. И., Третьяк А. Н. Палеомагнетизм опорных разрезов плиоцен-плейстоценовых отложений северо-западного Донбасса. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 3. С. 96—104.
- Вигилянская Л. И., Третьяк А. Н. Палеомагнитные исследования плиоцен-плейстоценовых отложений лессово-почвенной формации Среднего Приднепровья. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 5. С. 36—42.
- Герасименко Н. П. До кореляції палеогеографічних етапів плейстоцену України із глобальними реперами та хроностратиграфією Західної і Східної Європи. В кн.: Просторово-часова кореляція палеогеографічних умов четвертинного періоду на території України. За ред. Ж. М. Матвіїшиної. Київ: Наук. думка, 2010. С. 94—104.
- Главацкий Д., Бахмутов В., Богущкий А., Волошин П. Петромагнетизм і палеомагнетизм субаеральних відкладів розрізів Бояничі і Коршів (Волинська височина). *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка: Геологія.* 2016. № 72(1). С. 43—51. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.06>.
- Главацкий Д. В., Кузина Д. М., Герасименко Н. П., Бахмутов В. Г. Петромагнетизм и палеомагнетизм четвертичных лессово-почвенных отложений разреза Вязовок (Приднепровская низменность). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 6. С. 186—193. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91903>.
- Главацкий Д. В., Степанчук В. Н., Кузина Д. М., Поляченко Е. Б., Шпыра В. В., Скарбовийчук Т. В., Якухно В. И., Бахмутов В. Г. Петромагнитные и палеомагнитные исследования лессово-почвенных разрезов — стоянок нижнего палеолита в долине Южного Буга (Меджибож, Головчинцы). *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 1. С. 3—37. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225539>.
- Гожик П. Ф. (ред.). Стратиграфічний кодекс України. Київ: Вид. Нац. стратиграф. комітету України, 2012.
- Константинова Н. А. Антропоген южной Молдавии и юго-западной Украины. Москва: Наука, 1967. Т. 173. С. 1—138.
- Сиренко О. А., Бахмутов В. Г., Нікітченко І. М. Нові матеріали до вивчення неоплейстоценових відкладів позальодовикової зони Українського щита. *Геол. журн.* 2008. № 4. С. 113—122.
- 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. № 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., Волок З. Е. Палеомагнитная стратиграфия плиоцен-четвертичных осадочных толщ Украины. Киев: Наук. думка. 1976. 88 с.
- Третьяк А. Н., Шевченко А. И., Дудкин В. П., Вигилянская Л. И. Палеомагнитная стратиграфия опорных разрезов позднего кайнозоя юга Украины. Киев: Изд. АН УССР, Ин-та геол. наук, 1987. 50 с.
- Bakhmutov, V. G., Kazanskii, A. Yu., Matasova, G. G., & Glavatskii, D. V. (2017). Rock magnetism and magnetostratigraphy of the loessol series of Ukraine (Roksolany, Boyanychi, and Korshev sections). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(6), 864—884. <https://doi.org/10.1134/S1069351317050020>.
- Bol'shakov, V. A. (2017). The use of the rock magnetic and paleomagnetic data for the loess plateau deposits in China for their climatologic and chronologic correlation to the oxygen isotopic timescale. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(2), 293—310. <https://doi.org/10.1134/S1069351317020033>.
- Bondar, K., Ridush, B., Baryshnikova, M., & Po-

- piuk, Y. (2019). On palaeomagnetic dating of fluvial deposits in the section of Neporotove gravel quarry on the Middle Dniester. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 241—249. <https://doi.org/10.15421/111925>.
- Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Boston: Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Chadima, M., & Hroudá, F. (2006). Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Geophysiques*, 27, 20—21.
- Evans, M. E., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism*. Academic Press. 299 p.
- 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. *Quaternary International*, 152-153, 78—93. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.01.001>.
- Gozhik, P., Shelkopyas, V., & Khristoforova, T. (1995). Development stages of loessial and glacial formations in Ukraine (Stratigraphy of loesses in Ukraine). *Annales UMCS Section B*, 50, 65—74.
- Heller, F., & Liu, T.-S. (1984). Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophysical Journal International*, 77(1), 125—141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01928.x>.
- Hlavatskyi, D. V. (2019). Refined magnetostratigraphic position of the Shyrokyne unit in loess sequences from Central Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 301—312. <https://doi.org/10.15421/111930>.
- Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2019). Magnetostratigraphy of the key loess-palaeosol sequence at Roxolany (Western Black Sea region). In D. Nurgaliev, V. Shcherbakov, A. Kosterov, S. Spassov (Eds.), *Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism* (pp. 371—382). Springer Geophysics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_26.
- Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2020). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the best developed Pleistocene loess-palaeosol sequences of Ukraine: implications for correlation and proposed chronostratigraphic models. *Geological Quarterly*, 64(3), 723—753. <https://doi.org/10.7306/gq.1544>.
- Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchkovskyi, O. S., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Mychak, S. V., Kravchuk, I. V., & Cherkes, S. I. (2021). Significance of the Ukrainian loess-palaeosol sequences for Pleistocene climate reconstructions: rock magnetic, palaeosol and pollen proxies. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378>.
- Jin, C., & Liu, Q. (2011). Revisiting the stratigraphic position of the Matuyama–Brunhes geomagnetic polarity boundary in Chinese loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1), 309—317. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.11.011>.
- Jin, C., Liu, Q., Xu, D., Sun, J., Li, C., Zhang, Y., Han, P., & Liang, W. (2019). A new correlation between Chinese loess and deep-sea $\delta^{18}O$ records since the Middle Pleistocene. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 506, 441—454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.022>.
- Kirschvink, J. L. (1980). The least squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699—718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
- Kukla, G. J. (1987). Loess stratigraphy in Central China. *Quaternary Science Reviews*, 6(3-4), 191—219. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(87\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0277-3791(87)90004-7).
- Laj, C., & Channell, J.E.T. (2007). Geomagnetic Excursions. In *Treatise on Geophysics* (pp. 373—416). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00095-X>.
- Liu, Q., Jin, C., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. P. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess-paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139—167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.009>.
- Liu, T. S. (1985). *Loess and Environment* (pp. 31—67). Beijing: Science Press (in Chinese).
- Matoshko, A., Matoshko, A., & de Leeuw, A. (2019). The Plio-Pleistocene Demise of the East Carpathian Foreland Fluvial System and Arrival of the Paleo-Danube To The Black Sea.

- Geologica Carpathica*, 70(2), 91—112. <https://doi.org/10.2478/geoca-2019-0006>.
- Nawrocki, J., Bakhmutov, V., Bogucki, A., & Dolecki, L. (1999). The Paleo- and Petromagnetic record in the Polish and Ukrainian Loess-Palaeosol Sequences. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 24, 773—777. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00113-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00113-1).
- Shackleton, N. J., Berger, A., & Peltier, W. R. (1990). An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 81, 251—261. <https://doi.org/10.1017/S0263593300020782>.
- Spasov, S., Heller, F., Evans, M. E., Yue, L. P., & Dobeneck, T. von. (2003). A lock-in model for the complex Matuyama-Brunhes boundary record of the loess/palaeosol sequence at Lingtai (central Chinese Loess Plateau). *Geophysical Journal International*, 155(2), 350—366. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02026.x>.
- 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 and the Asian loess sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 133—146. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00030-1).
- Tsatskin, A., Heller, F., Gendler, T. S., Virina, E. I., Spasov, S., Du Pasquier, J., 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. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(11-12), 911—916. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00141-7).
- Wang, X., Løvlie, 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? *Quaternary Science Reviews*, 101, 61—76. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.07.005>.
- Wang, X., Yang, Z., Løvlie, 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. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(1), 109—117. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2006.07.002>.
- Zhou, L. P., & Shackleton, N. J. (1999). Misleading positions of geomagnetic reversal boundaries in Eurasian loess and implications for correlation between continental and marine sedimentary sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1), 117—130. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00052-7).

The Matuyama—Brunhes boundary in the loess-palaeosol sequence of Dolynske, southern Ukraine

V. G. Bakhmutov¹, D. V. Hlavatskyi¹, Y. M. Veklych², V. V. Shpyra¹,
V. I. Yakukhno¹, 2021

¹S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

²Separate subdivision «Ukrainian Geological Prospecting Institute» of the State Enterprise «Ukrainian Geological Company», Kiev, Ukraine

We present the results of a palaeomagnetic study of the Early—Middle Pleistocene deposits exposed on the left bank of the River Danube at Dolynske, southern Ukraine. A thick succession of water-lain facies is succeeded by stratigraphically complete loess-palaeosol sequence; these constitute a unique palaeoclimate archive in the southern margin of the East European loess province. The Matuyama—Brunhes boundary (MBB) has been detected at the bottom of the Lower Shyrokyne (S7S3) subunit and not in the Martonsha

(S6) unit as previously thought. New data align with previous results from the Roksolany and Vyazivok sections, where the MBB was determined at the same stratigraphical level in the S7S3 soil. In contrast to terrestrial Pleistocene records in China and central Europe, where the MBB was regularly determined in a loess layer (representing a cold period), the MBB in the Ukrainian subaerial succession is located in the soil unit (representing a warm period). Furthermore, eight, and not seven, glacial-interglacial cycles are recorded in the Brunhes chron. This may indicate the stratigraphic completeness of the loess-soil succession of Ukraine, which can be compared with the reference global marine and terrestrial palaeoclimatic archives. Further palaeomagnetic studies of loess-palaeosol sequences of other regions of Ukraine will allow revision and correlation of still inconsistent stratigraphic and magnetostratigraphic schemes of the Pleistocene deposits.

Key words: magnetostratigraphy, loess-palaeosol sequence, Pleistocene, Matuyama—Brunhes boundary, Danube, palaeomagnetic method.

References

- Bakhmutov, V. G., & Hlavatskyi, D. V. (2014). New data about Matuyama—Brunhes boundary in Roxolany section. *Heolohichnyy Zhurnal*, 347(2), 73—84. <http://dx.doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2014.2.139072> (in Russian).
- Bakhmutov, V. G., Mokriak, I. N., Skarboviychuk, T. V., & Yakukhno, V. I. (2005). Results of palaeomagnetic studies of Danube terraces sections and problems of Pleistocene magnetostratigraphy of the west Black Sea region. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 25(6), 980—991 (in Russian).
- Bakhmutov, V. G., & Glavatskiy, D. V. (2016). Problems of magnetostratigraphy of Pleistocene loess-soil deposits in the South of Ukraine. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 38(4), 59—75. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107801> (in Russian).
- Veklich, M. F. (1982). *Stages and stratotypes of the soil formations of Ukraine in the Upper Cenozoic*. Kiev: Naukova Dumka, 201 p. (in Russian).
- Veklich, M. F., & Veklich, Y. M. (1993). Stage and stratoregion of the estuary-marine Pleistocene of the Azov-Black Sea Basin. Kiev: Publ. by the Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, 186 p. (in Russian).
- Veklich, M. F., Sirenko, N. A., Matviishyna, Zh. N., Melnychuk, I. V., Perederyi, V. I., Turlo, S. I., & Vozgrin, B. D. (1984). *Palaeogeographical succession and detailed stratigraphic division of the Pleistocene of Ukraine (methodological developments)*. Kiev: Naukova Dumka, 32 p. (in Russian).
- Veklich, M. F., Sirenko, N. A., Matviishyna, Zh. N., Melnychuk, I. V., Gerasimenko, N. P., Perederyi, V. I., & Turlo, S. I. (1993). *Stratigraphic diagram of the Quaternary deposits of Ukraine. Stratigraphic schemes of the Phanerozoic and Precambrian of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 1993. 76 p. (in Russian).
- Vigilyanskaya, L. I., & Tretyak, A. N. (2000). Palaeomagnetism of key Pliocene-Pleistocene sections in North-Western Donbass. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 22(3), 96—104 (in Russian).
- Vigilyanskaya, L. I., & Tretyak, A. N. (2002). Palaeomagnetic studies of Pliocene-Pleistocene deposits of loess-palaeosol stratum in Middle Dnieper region. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 24(5), 36—42 (in Russian).
- Gerasimenko, N. P. (2010). On the correlation of palaeogeographic stages of the Pleistocene of Ukraine with global benchmarks and chronostratigraphy of Western and Eastern Europe. In: M. Zh. Matviishyna (Ed.), *Spatio-temporal correlation of Quaternary palaeogeographic conditions on the territory of Ukraine* (pp. 94—104). Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
- Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Bogucki, A., & Voloshyn, P. (2016). Petromagnetism and paleomagnetism of subaerial deposits of Boyanychi and Korshiv sections (Volhynian Upland). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 72(1), 43—51. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.06> (in Ukrainian).
- Hlavatskyi, D. V., Kuzina, D. M., Gerasimen-

- ko, N. P., & Bakhmutov, V. G. (2016). Petro-magnetism and paleomagnetism of Quaternary loess-soil sediments of Vyazivok section (Dnieper Lowland). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(6), 186—193. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91903> (in Russian).
- Hlavatskiy, D. V., Stepanchuk, V. N., Kuzina, D. M., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Skarboviychuk, T. V., Yakukhno, V. I., & Bakhmutov, V. G. (2021). Rock magnetic and palaeomagnetic studies of loess-palaesol sections — Lower Palaeolithic sites within the Southern Bug Valley (Medzhybizh, Holovchyntsi). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(1), 3—37. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225539> (in Russian).
- Gozhik, P. F. (eds.). (2012). *Stratigraphic code of Ukraine*. Kyiv: Publ. of the National Stratigraphic Committee of Ukraine (in Ukrainian).
- Konstantinova, N. A. (1967). *Antropogene of the Southern Moldavia and South-Western Ukraine* (Vol. 173, pp. 1—138). Moscow: Nauka (in Russian).
- Sirenko, O. A., Bahmutov, V. G., & Nikitchenko, I. M. (2008). New data for studying Neopleistocene deposits of Nonglacial zone of the Ukrainian Shield. *Heolohichnyy Zhurnal*, 325(4), 113—122 (in Ukrainian).
- 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., & Volok, Z. E. (1976). *Paleomagnetic stratigraphy of Pliocene and Quaternary sediments in Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 88 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*. Kiev: Publ. of the Institute of Geological Sciences AS USSR, 50 p. (in Russian).
- Bakhmutov, V. G., Kazanskii, A. Yu., Matasova, G. G., & Glavatskii, D. V. (2017). Rock magnetism and magnetostratigraphy of the loess-sol series of Ukraine (Roksolany, Boyanychi, and Korshev sections). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(6), 864—884. <https://doi.org/10.1134/S1069351317050020>.
- Bol'shakov, V. A. (2017). The use of the rock magnetic and paleomagnetic data for the loess plateau deposits in China for their climatologic and chronologic correlation to the oxygen isotopic timescale. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 53(2), 293—310. <https://doi.org/10.1134/S1069351317020033>.
- Bondar, K., Ridush, B., Baryshnikova, M., & Popiuk, Y. (2019). On palaeomagnetic dating of fluvial deposits in the section of Neporotove gravel quarry on the Middle Dniester. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 241—249. <https://doi.org/10.15421/111925>.
- Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Boston: Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Chadima, M., & Hrouda, F. (2006). Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Travaux Geophysiques*, 27, 20—21.
- Evans, M. E., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism*. Academic Press. 299 p.
- 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. *Quaternary International*, 152-153, 78—93. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.01.001>.
- Gozhik, P., Shelkoplyas, V., & Khristoforova, T. (1995). Development stages of loessial and glacial formations in Ukraine (Stratigraphy of loesses in Ukraine). *Annales UMCS Section B*, 50, 65—74.
- Heller, F., & Liu, T.-S. (1984). Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophysical Journal International*, 77(1), 125—141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01928.x>.
- Hlavatskiy, D. V. (2019). Refined magnetostratigraphic position of the Shyrokyne unit in loess sequences from Central Ukraine. *Journal of*

- Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 301—312. <https://doi.org/10.15421/111930>.
- Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2019). Magnetostratigraphy of the key loess-palaeosol sequence at Roxolany (Western Black Sea region). In D. Nurgaliev, V. Shcherbakov, A. Kosterov, S. Spassov (Eds.), *Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism* (pp. 371—382). Springer Geophysics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_26.
- Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2020). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the best developed Pleistocene loess-palaeosol sequences of Ukraine: implications for correlation and proposed chronostratigraphic models. *Geological Quarterly*, 64(3), 723—753. <https://doi.org/10.7306/gq.1544>.
- Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchkovskiy, O. S., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Mychak, S. V., Kravchuk, I. V., & Cherkes, S. I. (2021). Significance of the Ukrainian loess-palaeosol sequences for Pleistocene climate reconstructions: rock magnetic, palaeosol and pollen proxies. *Geofizicheskij Zhurnal*, 43(3), 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378>.
- Jin, C., & Liu, Q. (2011). Revisiting the stratigraphic position of the Matuyama–Brunhes geomagnetic polarity boundary in Chinese loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1), 309—317. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.11.011>.
- Jin, C., Liu, Q., Xu, D., Sun, J., Li, C., Zhang, Y., Han, P., & Liang, W. (2019). A new correlation between Chinese loess and deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ records since the Middle Pleistocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 441—454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.022>.
- Kirschvink, J. L. (1980). The least squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699—718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
- Kukla, G. J. (1987). Loess stratigraphy in Central China. *Quaternary Science Reviews*, 6(3-4), 191—219. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(87\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0277-3791(87)90004-7).
- Laj, C., & Channell, J.E.T. (2007). Geomagnetic Excursions. In *Treatise on Geophysics* (pp. 373—416). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00095-X>.
- Liu, Q., Jin, C., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. P. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess-paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139—167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.009>.
- Liu, T. S. (1985). *Loess and Environment* (pp. 31—67). Beijing: Science Press (in Chinese).
- Matoshko, A., Matoshko, A., & de Leeuw, A. (2019). The Plio-Pleistocene Demise of the East Carpathian Foreland Fluvial System and Arrival of the Paleo-Danube To The Black Sea. *Geologica Carpathica*, 70(2), 91—112. <https://doi.org/10.2478/geoca-2019-0006>.
- Nawrocki, J., Bakhmutov, V., Bogucki, A., & Dolecki, L. (1999). The Paleo- and Petromagnetic record in the Polish and Ukrainian Loess-Paleosol Sequences. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 24, 773—777. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(99\)00113-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(99)00113-1).
- Shackleton, N. J., Berger, A., & Peltier, W. R. (1990). An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 81, 251—261. <https://doi.org/10.1017/S0263593300020782>.
- Spassov, S., Heller, F., Evans, M. E., Yue, L. P., & Dobeneck, T. von. (2003). A lock-in model for the complex Matuyama–Brunhes boundary record of the loess/palaeosol sequence at Lingtai (central Chinese Loess Plateau). *Geophysical Journal International*, 155(2), 350—366. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02026.x>.
- 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 and the Asian loess sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 133—146. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00030-1).
- Tsatskin, A., Heller, F., Gendler, T. S., Virina, E. I., Spassov, S., Du Pasquier, J., 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. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(11-12), 911–916. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00141-7).
- Wang, X., Løvlie, 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? *Quaternary Science Reviews*, 101, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.07.005>.
- Wang, X., Yang, Z., Løvlie, 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. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2006.07.002>.
- Zhou, L. P., & Shackleton, N. J. (1999). Misleading positions of geomagnetic reversal boundaries in Eurasian loess and implications for correlation between continental and marine sedimentary sequences. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 168(1), 117–130. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00052-7).

Границя Матуяма—Брюнес у лесово-грунтовогому розрізі Долинське, південна Україна

В. Г. Бахмутов¹, Д. В. Главацький¹, Ю. М. Веклич², В. В. Шпира¹,
В. І. Якухно¹, 2021

¹ Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

² Відокремлений підрозділ «Український геологорозвідувальний інститут» Державного підприємства «Українська геологічна компанія», Київ, Україна

Наведено результати палеомагнітних досліджень відкладів раннього і середнього плейстоцену, що відслонюються на лівому березі р. Дунай у нижній її течії біля с. Долинське, південна Україна. Потужні субаквальні відклади перекриті стратиграфічно повною лесово-грунтовою серією (від крижанівського до дніпровського горизонту) і є унікальним палеокліматичним архівом у найпівденнішій частині Східноєвропейської лесової провінції. Межу Матуяма—Брюнес (МБ) визначено у підшві нижньоширокинського горизонту (sh_{1b1}), а не в мартоносському горизонті, як вважали раніше. Нові дані добре узгоджуються з аналогічними результатами, отриманими раніше на розрізах Роксолани і В'язівки, де межу МБ виявлено на тому ж стратиграфічному рівні — у нижньоширокинському субкліматоліті. На відміну від континентальних записів плейстоцену в Китаї та Центральній Європі, де межу МБ часто визначали у лесовому горизонті (який відповідає етапу похолодання), в українській субаеральній формації межу МБ встановлено у ґрунтовому горизонті (який відповідає потеплінню), при цьому в хроні Брюнес встановлено вісім, а не сім циклів зледеніння—потепління. Це може засвідчувати стратиграфічну повноту лесово-грунтової формації України, яку можна порівняти з еталонними глобальними морськими і континентальними палеокліматичними архівами. Подальші палеомагнітні дослідження лесово-грунтових серій інших регіонів України дадуть змогу переглянути і зіставити досі суперечливі стратиграфічні та магнітостратиграфічні схеми відкладів плейстоцену.

Ключові слова: магнітостратиграфія, лесово-грунтова формація, плейстоцен, межа Матуяма—Брюнес, Дунай, палеомагнітний метод.