

# Модель магнітного запису лесів півдня України на прикладі розрізу середнього плейстоцену Долинське

*Д.В. Главацький, 2025*

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 18 лютого 2025 р.

Значну роль у дослідженнях клімату плейстоцену відіграють магнітні параметри лесово-грунтових відкладів, насамперед магнітна сприйнятливість і коефіцієнт її частотної залежності. Зазвичай інтерпретація поведінки магнетизму в лесах ґрунтується на двох загальноприйнятих моделях: педогенній («китайській») моделі магнітного підсилення та «алаякинській» (англ. «reducing-pedogenic») моделі. Проте зростає кількість випадків, коли жодна модель не може бути застосована окремо (так звана перехідна модель), зокрема на північному заході України. У цьому дослідженні наведено петромагнітні дані з лесового розрізу середнього плейстоцену Долинське на півдні України. Результати, у поєднанні з отриманими раніше даними з розрізу Роксолани та інших розрізів регіону, свідчать про збільшення у похованих ґрунтах концентрації феримагнітних мінералів, зокрема суперпарамагнітного магнетиту. Це вказує на переважання типової педогенної моделі магнітного запису (англ. «magnetic enhancement») для півдня України, як і для більшості території України. За петромагнітними маркерами в інтервалі середнього плейстоцену у лесово-грунтовій серії півдня України ідентифіковано сім інтергляціалів, що відповідають морським ізотопним стадіям MIS 19, MIS 17, MIS 15, MIS 13, MIS 11, MIS 9, MIS 7. Також встановлено ритми окремих кліматичних оптимумів — інтерстадіалів — зокрема MIS 15e, MIS 15a, MIS 13c, MIS 13a, MIS 9e, MIS 9a, MIS 7e, MIS 7a—c, які чітко виявляються магнітними методами. Розглянуто декілька (хроно-)стратиграфічних проблем в інтерпретації формування середньоплейстоценових лесів півдня України, а також здійснено спробу порівняти палеогеографічні етапи української кліматостратиграфічної системи з основними глобальними та регіональними палеокліматичними трендами.

**Ключові слова:** Дунайський басейн, лесово-грунтові відклади, магнітна сприйнятливість, петромагнетизм, педогенна модель, перехід середнього Брунеса.

**Вступ.** У субаеральних відкладах виміряні петромагнітні параметри, насамперед магнітна сприйнятливість, використовуються як надійні індикатори мінливості палеоклімату під час четвертинного періоду [Heller, Liu, 1984; Maher, 1998; Bradák et al., 2019]. У численних лесово-грунтових розрізах, розташованих переважно в межах Євразійського помірного поясу, включаючи територію України, встановлено, що варіації високих і низьких значень магнітної

сприйнятливості тісно корелюють із чергуванням ґрунтових і лесових горизонтів відповідно і можуть бути безпосередньо зіставлені з морською ізотопно-кисневою шкалою (MIS) [Buggle et al., 2009; Jordanova et al., 2022]. Формування таких відкладів відбувалося за так званою педогенною (або «китайською») моделлю магнітного запису (англ. «magnetic enhancement»), а саме з утворенням педогенних (псевдо-)однодоменних і суперпарамагнітних зе-

Citation: Hlavatskyi, D.V. (2025). Magnetic enhancement model for southern Ukraine loess on the example of the Middle Pleistocene sequence at Dolynske. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(3), 80–101. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i3.323058>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

рен магнетиту (іноді, магеміту) у похованих ґрунтах [Evans, Heller, 1994, 2003; Eyre, Shaw, 1994; Bradák et al., 2021]. Виділяють також зворотню модель — «аляскінську» (англ. «reducing-pedogenic», коли сильні вітри під час гляціалів сприяли накопиченню магнітних мінералів у лесах, а гідроморфні процеси під час інтергляціалів руйнували зерна магнетиту у палеоґрунтах), а також перехідні між «китайською» і «аляскінською» моделі магнітного запису у лесах (див. огляд у статті [Bonchkovskiy, Hlavatskiy, 2025]).

Плейстоценові лесово-ґрунтові відклади вкривають понад 70 % території України [Matoshko, 2021]. Починаючи з 1960-х років, особлива увага приділялась вивченню розрізів на півдні України через їхню значну потужність, кращу доступність, багаті фауністичні комплекси, інформативні (підвищені) значення магнітних параметрів і зручний віковий діапазон [Константинова, 1967; Третьяк и др., 1987; Веклич, Веклич, 1993; Tsatskin et al., 2001; Gendler et al., 2006; Гожик, 2006; Vokhorst et al., 2009; Меньшов, 2015; Bondar et al., 2019; Haesaerts et al., 2019; Matoshko et al., 2019; Sirenko, 2019; Tecsá et al., 2020 та багато ін.], що дало змогу визначити на кількох об'єктах інверсії геомагнітного поля, зокрема межі Матуяма—Брюнес (МБ) (див. статтю [Bakhmutov et al., 2023]). Проте стратиграфічне розчленування саме південних розрізів (найпоказовіший приклад — розріз Роксолани) досі викликає значні суперечності [Bakhmutov, Hlavatskiy, 2022; Łanczont et al., 2022], що зумовлено тим, що більшість стратотипів української лесової формації вивчали у центральній частині України, де формувалися відмінні від південних типи ґрунтів [Веклич, 1982], а результати датування методами геохронології південних розрізів півдня мають розбіжності в різних колективів [Gozhik, Gerasimenko, 2011; Tecsá et al., 2020].

Переважаюча частина українського лесово-ґрунтового покриву формувалася відповідно до педогенної моделі магнітного запису (зокрема, відклади на території Придніпровської височини, Придніпров-

ської низовини, Причорноморської низовини, Приазовської низовини та південно-східної частини Подільської височини; рис. 1, а) [Hlavatskiy, Bakhmutov, 2020, 2021; Hlavatskiy et al., 2021; Gerasimenko et al., 2022]. Незначна частина відкладів (північно-західна частина Волино-Подільської височини) сформувалася під дією перехідної моделі магнітного запису в ґрунтах: тут і поховані ґрунти, і леси мають знижені значення магнітної сприйнятливості [Nawrocki et al., 1999; Bonchkovskiy et al., 2023; Bonchkovskiy, Hlavatskiy, 2025].

Одним із перспективних об'єктів для петромагнітних досліджень є розріз Долинське на півдні України (рис. 1). Він складається із відкладів раннього (з ознаками гідроморфізму) і середнього (субаеральна частина) плейстоцену, які вже були детально досліджені палеомагнітним методом [Бахмутов и др., 2005, 2021; Главацький та ін., 2022; Hlavatskiy et al., 2022]. У цій статті наведено результати петромагнітних досліджень лесово-ґрунтових відкладів середнього плейстоцену з метою підтвердження педогенного типу формування їх магнітних властивостей.

**Об'єкт дослідження.** Плейстоценові субаеральні відклади, що відслонюються вздовж лівого берега р. Дунай у найпівденнішій в Україні лесово-ґрунтовій ділянці, найкраще представлені розрізом Долинське (45°30' пн.ш.; 28°18' сх.д.). З огляду на географічне розташування розрізу, стратиграфічну повноту, перехідний характер ґрунтів, розчленування за магнітними параметрами (з визначенням границі МБ) цей об'єкт може вважатися потенційним парастратотипом не лише Західного Причорномор'я, а й усього Дунайського басейну, і мати особливе значення для глобальних палеокліматичних реконструкцій.

У субаеральній частині розрізу Долинське ідентифікуються вісім інтергляціальних ґрунтових комплексів. Молодші ґрунти (MIS 13—7) розділені потужними лесовими горизонтами, тоді як лесові прошарки у давніших ґрунтових серіях (MIS 21—15) були перероблені педогенними процесами і заміщені карбонатними го-

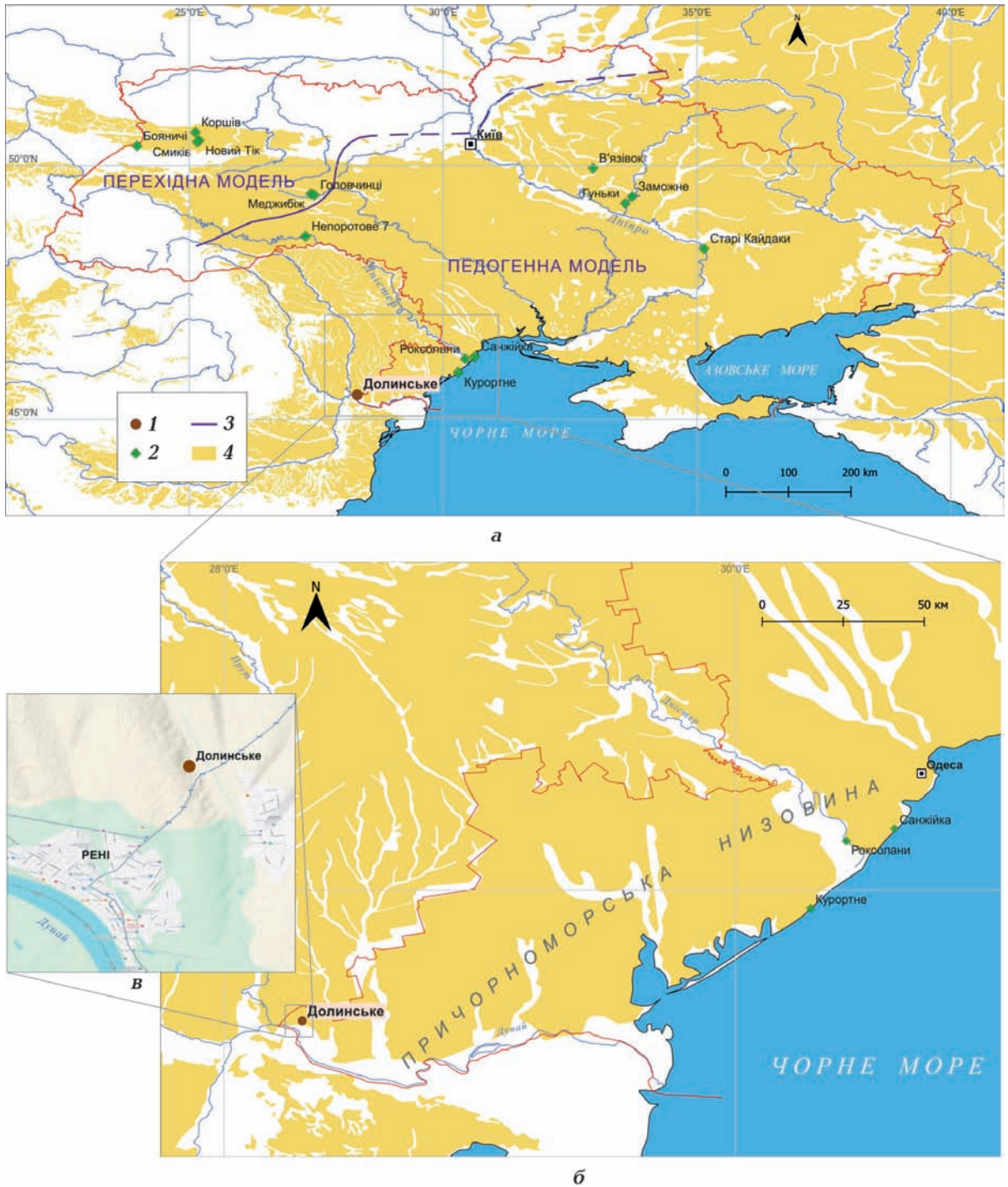


Рис. 1. Карта лесового покриття України (а) і Західного Причорномор'я (б), адаптована з [Lehmkuhl et al., 2021; Bonchkovskiy, Hlavatskiy, 2025], і західних околиць с. Долинське із позначенням розташування розрізу (в): 1 — розташування розрізу Долинське, 2 — інші розрізи, що вивчалися за участю автора, 3 — межа між педогенною та перехідною моделями магнітного запису у лесово-грунтовій формації України, 4 — поширення лесових відкладів.

Fig. 1. Map of the loess cover of Ukraine (a) and the Western Black Sea Region (б), adapted from [Lehmkuhl et al., 2021; Bonchkovskiy, Hlavatskiy, 2025], and the western outskirts of the village of Dolynske with the location of the section marked (в): 1 — location of the Dolynske section, 2 — other sections studied with the participation of the author, 3 — boundary between the pedogenic and transitional models of magnetic enhancement in the loess-soil sequence of Ukraine, 4 — distribution of loess deposits.

ризонтами. Коротку характеристику горизонтів надано у табл. 1.

**Методи.** Для петромагнітних лабораторних досліджень було відібрано та підготов-

лено 537 зразків з діапазону глибин 0,24—24,38 м. Виміри магнітної сприйнятливості ( $\chi$ ) виконували у двох частотах — 976 Гц ( $\chi_{lf}$ ) та 15616 Гц ( $\chi_{hf}$ ) за допомогою містка

**Літолого-стратиграфічна характеристика розрізу Долинське (західне Причорномор'я)**

Горизонт	Підгоризонт	Індекс	Колір за шкалою Манселла	Короткий опис
D-S0	—	hl	—	Сучасний ґрунт (чорнозем)
D-L2	—	dn <sub>f</sub>	—	Дніпровський лес
D-L2S1	—	dn <sub>e</sub>	—	Ембріональний ґрунт
D-S2	S1	pt <sub>3</sub>	7.5YR 4/6-6/6	Потягайлівський добре розвинений червонувато-бурий лісовий ґрунт (А)
	S2	pt <sub>1</sub>	10YR 5/4	Потягайлівський потужний жовтувато-бурий ґрунт (В, Вк), чорноземоподібний, карбонатний
D-L3	—	or	—	Орільський лес
D-S3	S1	zv <sub>5b</sub>	10YR 4/3	Верхній бурий ґрунт верхньозавадівського субкліматоліту (А, Вк), карбонатний
	S2	zv <sub>3b2</sub>	10YR 5/4	Ембріональний ґрунт, часто замість нього лесовидний суглинок
	S3	zv <sub>3b1</sub>	10YR 5/3	Нижній слаборозвинений бурий ґрунт (камбісоль) верхньозавадівського субкліматоліту
D-L4	—	zv <sub>2</sub>	—	Середньозавадівський лес
D-S4	—	zv <sub>1</sub>	10YR 4/4-5/4	Нижньозавадівський добре розвинений темний жовтувато-бурий лісовий ґрунт
D-L5	—	tl	—	Тилігульський лес
D-S5	—	lb	10YR 4/3-5/3	Лубенський частково денудований сірувато-бурий ґрунт
D-L6	—	sl	—	Сульський лес
D-L6S1	—	mr <sub>3c</sub>	—	Ембріональний світло-бурий ґрунт
D-S6	S1	mr <sub>3b</sub>	5YR 4/4-4/6	Мартоносський добре розвинений червонувато-коричневий суглинистий ґрунт середземноморського типу з мангановими цятками
	S2	mr <sub>1b2</sub>	7.5YR 4/6-5/6	Мартоносський коричневий глинистий ґрунт з мангановими цятками
	S3	mr <sub>1b1</sub>	7.5YR 5/6	Мартоносський потужний коричневий глинистий ґрунт з карбонатами
D-S7	S1	sh <sub>3</sub>	10YR 5/4	Верхньоширокинський сильно перероблений бурий ґрунт
	S2	sh <sub>2</sub> +sh <sub>1b2</sub>	2.5Y 7/4	Потужний карбонатний горизонт (алевроліт?) із залишками темного ґрунту
	S3	sh <sub>1b1</sub>	7.5YR 4/4	Нижньоширокинський бурий лісовий ґрунт з ознаками гідроморфізму
D-S8	S1	kr <sub>3</sub>	5YR 4/6	Крижанівський помаранчевий ґрунт з мангановими цятками
	S2	kr <sub>1</sub>	5YR 5/6	Крижанівський червонувато-бурий ґрунт з мангановими цятками і карбонатами, внизу переходить у гідроморфну відміну

*Примітка.* Сірий колір позначає добре розвинені ґрунтові горизонти, світло-сірий — частково денудовані/ембріональні ґрунти.

змінного струму MFK1-FB Kappabridge, перед вимірами зразки зважувались. Різниця між обома магнітними сприйнятливостями виражається як частотно-залежна магнітна сприйнятливість, абсолютне ( $\chi_{fd}$ ) і відсоткове ( $\chi_{fd}\%$ ) значення якої розраховано за формулами:  $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$ ;  $\chi_{fd}\% = ((\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}) \cdot 100$ . Додаткові петромагнітні виміри виконано для пілотної колекції із 175 характерних зразків. Досліди склалися з вимірів безгістерезисної залишкової намагніченості ( $M_{ri}$ ) у полі наведення 50 мкТл при полі розмагнічування 50 мТл із застосуванням без гістерезисного магнетайзера AMU-1A; ізотермічної намаг-

ніченості насичення ( $M_{rs}$ ) при дії магнітного поля 1 Тл; також було отримано криві набуття ізотермічної залишкової намагніченості ( $M_i$ ) для пілотної колекції зразків. Було розраховано магнітні гранулометричні ( $M_{ri}/M_{rs}$ ,  $M_{ri}/\chi_{lf}$ ) і магнітно-мінералогічні відношення  $S = M_{i-300\text{ мТл}}/M_{rs}$ ;  $\text{HIRM} = (M_{rs} + M_{i-300\text{ мТл}})/2$ . Виміри виконано в палеомагнітній лабораторії Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

**Результати.** Низькочастотна магнітна сприйнятливість  $\chi_{lf}$  коливається від 9 до  $145 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  уздовж всієї досліджуваної колонки розрізу Долинське (рис. 2, зліва). Середнє значення становить  $42,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ,

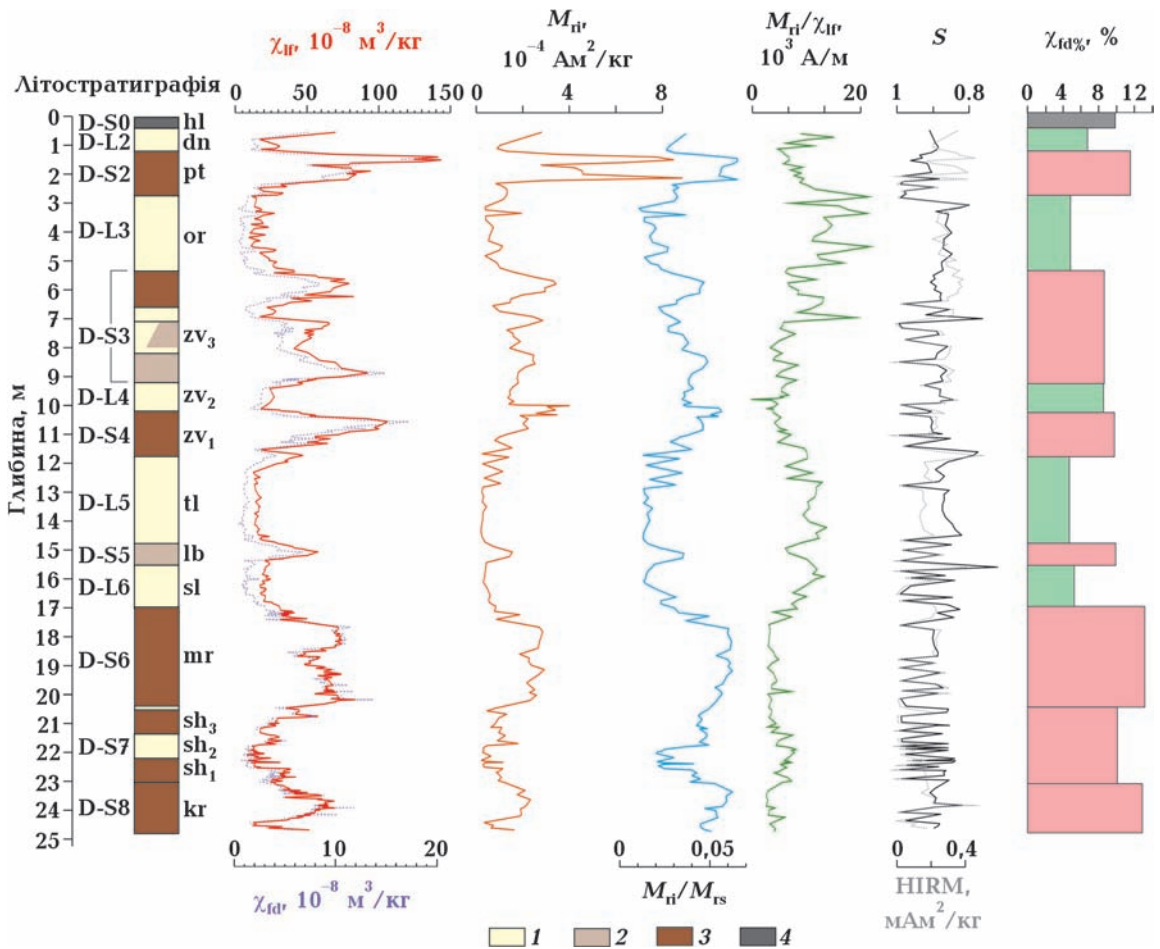


Рис. 2. Варіації вибраних петромагнітних параметрів уздовж спрощеної літологічної колонки розрізу Долинське (деякі параметри з [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021] було перераховано після рекалібрування): 1 — леси, 2 — ембріональні або частково денудовані ґрунти, 3 — поховані ґрунти, 4 — сучасний ґрунт. Пояснення наведено в тексті.

Fig. 2. Variations of selected rock magnetic parameters along a simplified lithological column of the Dolynske section (some parameters from [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021] were recalculated after recalibration): 1 — loess, 2 — embryonic or partially eroded soil, 3 — palaeosol, 4 — recent soil. Explanations are given in the text.

а медіана —  $37 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Дані  $\chi_{lf}$  і  $\chi_{fd}$  демонструють однакову тенденцію за глибиною зі значно нижчими значеннями  $\chi_{fd}$  ( $(0,11-19,61) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ) із середнім значенням  $4,62 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  і медіаною  $3,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

У варіаціях магнітної сприйнятливості чітко виражене чергування лесів і похованих ґрунтів. Фонові значення  $\chi_{lf}$  знаходяться в межах  $(10-15) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  у лесових горизонтах. Максимального значення  $(140-145) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$   $\chi_{lf}$  досягає у верхній частині потягайлівського ґрунтового горизонту D-S2. Значення  $\chi_{lf}$  обох завадівських педокомплексів (D-S3 і D-S4) знаходяться в

межах  $(80-110) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , тоді як значення  $\chi_{lf}$  для лубенського ґрунту D-S5 не перевищують  $55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Значення  $\chi_{lf}$  у широкинському кліматоліті D-S7 значно нижчі ( $(20-40) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), ніж у мартоносському педокомплексі D-S6 ( $(40-70) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), ймовірно, через їх розмивання та інтенсивні процеси кальцифікації. Найнижчий крижанівський ґрунт D-S8 має чіткий пік магнітної сприйнятливості  $65 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  у своїй середній частині.

Відсоткова залежність магнітної сприйнятливості від частоти ( $\chi_{fd\%}$ ) є прямою ліною вкладу суперпарамагнітних зерен (SP)

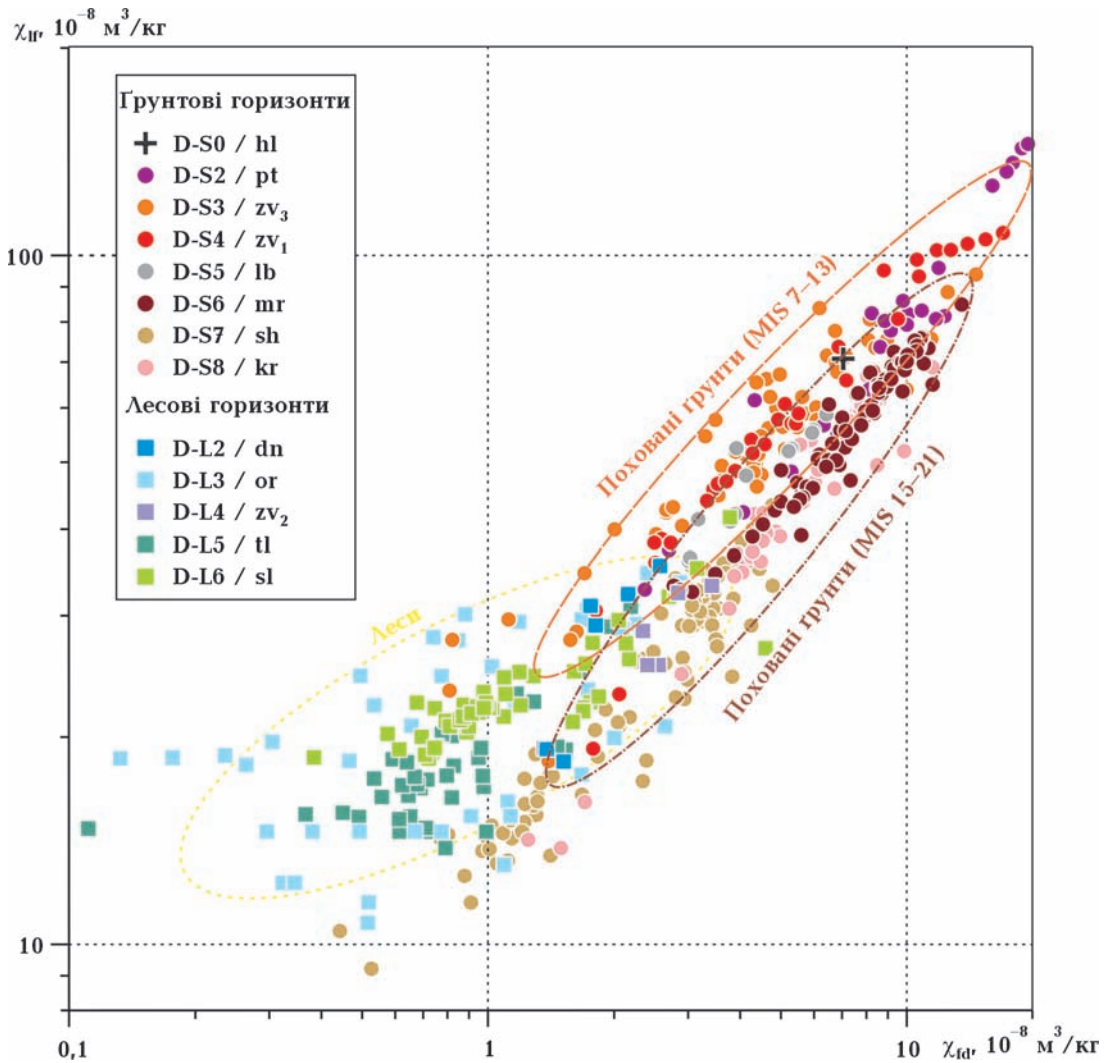


Рис. 3. Співвідношення низькочастотної ( $\chi_{lf}$ ) і частотно-залежної ( $\chi_{fd}$ ) магнітної сприйнятливості ґрунтових (крути) і лесових (квадрати) зразків лесово-ґрунтового розрізу Долинське.

Fig. 3. Correlation of low-frequency ( $\chi_{lf}$ ) and frequency-dependent ( $\chi_{fd}$ ) magnetic susceptibility of soil (circles) and loess (squares) samples of the Dolynske loess-palaeosol section.

[Dearing et al., 1996]. Загалом, значення  $\chi_{fd\%}$  більше 6 % (отримані на частотах апаратури AGICO — каппамістка MFK1-FB [Hroudá, 2011]) вказують на значну кількість частинок SP, тоді як максимальні спостережувані значення  $\geq 12\%$  — на те, що сприйнятливості у цих горизонтах зумовлена SP феримагнетиками. У розрізі Долинське  $\chi_{fd\%}$  коливається від 0,7 до 16 %, із середнім значенням у ґрунтах 11 і 6 % у лесах (рис. 2, справа). За співвідношенням  $\chi_{lf}/\chi_{fd}$  найвищий ступінь педогенезу демонструють давніші ґрунти, тоді як у лесах цей показник найменший (рис. 3).

Криві набуття намагніченості  $M_i$  для типових зразків наведено у статті [Hlavatskyi, Vakmutov, 2021]. Криві набувають  $\sim 90\%$   $M_{TS}$ , коли прикладене поле становить 200 мТл для ґрунтових зразків і 300 мТл для зразків лесів. Два зразки з горизонтів D-S6 і D-S7 досягають 90 %  $M_{TS}$  у полі 100 мТл. Така поведінка вказує на домінування «магнітно-м'яких» мінералів (наприклад, магнетиту), особливо в ґрунтах, тоді як дані з лесових шарів свідчать про дещо більший внесок «магнітно-жорстких» мінералів (наприклад, гематиту).

Намагніченість  $M_{Ti}$  залежить від стабільних однодоменних (SD) зерен через те, що багатодоменні (MD) зерна зазвичай мають надзвичайно низьку коерцитивну силу і не можуть утримувати значну  $M_{Ti}$  [Махбауер et al., 2016]. У розрізі Долинське  $M_{Ti}$  чітко набуває більших значень у ґрунтах порівняно з лесами (див. рис. 2), але більше залежить від концентрації магнітних мінералів, а не від їх доменного стану.  $M_{TS}$  менше залежить від розміру зерна порівняно з  $M_{Ti}$ , проте є чудовим індикатором концентрації магнітних мінералів і здебільшого відповідає кривим магнітної сприйнятливості та  $M_{Ti}$ .

Співвідношення  $M_{Ti}/M_{TS}$ ,  $\chi_{lf}/M_{TS}$  широко використовуються як індикатори розміру зерен магнетиту. Дрібні зерна дають вищі значення, оскільки вони більш ефективні для набуття намагніченості, особливо  $M_{Ti}$  [Evans, Heller, 2003]. Зразки ґрунтів з розрізу Долинське містять більшу частку SD, що дає вищі співвідношення  $M_{Ti}/M_{TS}$  та  $\chi_{lf}/M_{TS}$  на відміну від лесів (див. рис. 2).

Коефіцієнт  $S$  є поширеним параметром, який використовується у сфері магнетизму навколишнього середовища для кількісної оцінки співвідношення «магнітно-жорстких» і «магнітно-м'яких» мінералів [Махбауер et al., 2016].  $S$  виражається як відношення  $M_i$ , отриманого при деякому ненасиченому зворотному полі (зазвичай  $-300$  мТл), виміряному після отримання  $M_{TS}$ . Значення, близькі до одиниці, вказують на те, що в намагніченості переважають «магнітно-м'які» феримагнетики. Намагніченість, яку утримують «магнітно-жорсткі» мінерали у відкладах, оцінюється «жорсткою» (англ. «hard»)  $M_i$ , або HIRM. Зазвичай HIRM визначається як різниця між  $M_{TS}$  та зворотною  $M_{i-300mT}$ , поділена на 2. Поєднання цих двох параметрів ( $S$  та HIRM) дає змогу простежувати зміни магнітної мінералогії.

Коефіцієнт  $S$  у Долинському майже не залежить від літології, але зразки чітко можна розділити на дві групи (див. рис. 2). Коефіцієнт  $S$  третини зразків (переважно ґрунтових) близький до 1, що вказує на повну перевагу магнетиту, тоді як значення  $S$  для 2/3 зразків (насамперед лесів) коливається близько 0,9, що свідчить про дещо більший внесок «магнітно-жорстких» мінералів (гематиту). Оскільки HIRM збільшується зі збільшенням частки «магнітно-жорстких» мінералів, коефіцієнт  $S$  пов'язаний з HIRM негативною кореляцією (див. рис. 2).

Криві магнітної сприйнятливості та  $M_{Ti}$  вказують на концентрацію магнітних мінералів, а коефіцієнти  $S$  та HIRM залежать від складу магнітної фракції. Ця особливість відображає різницю у формі двох типів кривих (див. рис. 2). Таким чином, магнітні дослідження порід вказують на домінування частинок суперпарамагнітного магнетиту в давніх ґрунтах, але свідчать про більший внесок «магнітно-жорстких» мінералів (гематиту) у лесах.

**Дискусія.** Фонові значення магнітної сприйнятливості  $\chi_{lf}$  у розрізі Долинське такі ж, як в інших українських лесових розрізах  $((5-10) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг})$ , а також у придунайських лесових архівах  $((15-25) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг})$

[Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020, 2021]. Магнітна сприйнятливість, виміряна на інших південноукраїнських, придунайських, середньоазіатських і китайських лесових профілях, демонструє сильний контраст між лесовими та ґрунтовими горизонтами внаслідок утворення дрібних суперпарамагнітних частинок, що дають вищі значення для ґрунтів порівняно з лесами. Поведінка магнітної сприйнятливості чітко свідчить про розвиток ґрунтів під час теплих і вологих періодів (міжльодовиков'я), а лесів під час прохолодних і сухих стадій (льодовикові періоди), і тому її стали широко використовувати як індикатор палеоклімату [Song et al., 2014; Zeeden et al., 2018]. Значення магнітної сприйнятливості у похованих ґрунтах для інтервалу середнього плейстоцену послідовно зростають із півночі України на південь, досягаючи максимальних значень у розрізі Долинське (рис. 4).

У багатьох попередніх дослідженнях лесово-ґрунтових відкладів Дунайського басейну (див., наприклад, [Marković et al., 2015, 2024; Necula et al., 2015; Song et al., 2018; Sümegi et al., 2018; Namier et al., 2021; Molnar et al., 2024]) піки магнітної сприйнятливості в ґрунтах використовувалися як опорні маркери, що відповідають теплим MIS, і в результаті було запропоновано кореляції між кліматичними подіями плейстоцену, зафіксованими в най-

потужніших глибоководних і наземних архівах. У розрізі Долинське криві магнітної сприйнятливості (як  $\chi_{fd}$  так і  $\chi_{fd}$ ) і морська ізотопно-киснева шкала дуже схожі [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021], що значно полегшує хроностратиграфічну інтерпретацію.

Крім того, положення границі МБ у розрізі Долинське добре узгоджується з результатами, отриманими раніше на розрізах Роксолани і В'язівок. На всіх трьох розрізах межу МБ визначено на тому ж педостратиграфічному рівні — в нижній частині нижньоширокинського субкліматоліту  $sh_{1b1}$  (S7S3) [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021; Бахмутов и др., 2021].

Детальний опис стратиграфічних горизонтів лесово-ґрунтової формації України з літолого-палеопедологічним описом і магнітними властивостями наведено у публікаціях [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020, 2021; Hlavatskyi et al., 2021]. Тут зупинимося на удосконаленні регіональної стратиграфічної кореляційної схеми та палеокліматичній реконструкції півдня України для інтервалу середнього плейстоцену за отриманими даними моделі магнітного запису лесів Західного Причорномор'я.

*Широкинський нагетан (MIS 19—17?)* формування української лесово-ґрунтової формації містить два міжльодовикові періоди: ранній  $sh_1$  — більш теплий і вологий

Розріз / кліматоліт	S2 / pt	S3 / zv <sub>3</sub>	S4 / zv <sub>1</sub>	S5 / lb	S6 / mr	S7 / sh
В'язівок	30	35	40	10	15	35
Старі Кайдаки	60	45	70	50	25	20
Санжійка	60	75	80			
Роксолани	80	35	50	40	40	25
Курортне	90	150	130	30	20	
Долинське	140	75	100	55	65	35

Рис. 4. Розподіл типових значень магнітної сприйнятливості (в  $10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ) для ґрунтових горизонтів середнього плейстоцену досліджених розрізів України: В'язівок [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020], Старі Кайдаки [Hlavatskyi et al., 2021], Санжійка [Hlavatskyi et al., 2025], Роксолани [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020], Курортне [Nawrocki et al., 1999; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021], Долинське (ця стаття).

Fig. 4. Distribution of typical values of magnetic susceptibility (in  $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) for the Middle Pleistocene soil units of some sections of Ukraine: Vyazivok [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020], Stari Kaydaky [Hlavatskyi et al., 2021], Sanzhiyka [Hlavatskyi et al., 2025], Roksolany [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020], Kurortne [Nawrocki et al., 1999; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021], Dolynske (current paper).

етап, представлений послідовністю червонувато-бурих глинистих лісових ґрунтів, і пізній sh<sub>3</sub> — відносно холодніший і більш сухий етап, представлений темно-бурими глинистими степовими та лісостеповими ґрунтами [Сиренко, Турло, 1986; Матвіїшина та ін., 2010; Gozhik, Gerasimenko, 2011; Сиренко, 2017]. Широкинські ґрунти зазвичай розділені лесоподібними суглинками (sh<sub>2</sub>), сформованими в умовах, близьких до перигляціальних. Найдавніший ґрунт (S7S3/sh<sub>1b1</sub>) — світло-коричневий глинистий лісовий ґрунт (лювісоль). Клімат за ча-

сів sh<sub>1b1</sub> був вологим і прохолоднішим за крижанівський період [Матвіїшина та ін., 2010; Gozhik, Gerasimenko, 2011; Sirenko, 2019]. Верхній ґрунт нижньоширокинського етапу (S7S2/sh<sub>1b2</sub>) має темніший сірувато-бурий колір, він завжди карбонатний, часто деформований тріщинами усихання, заповненими матеріалом лесового прошарку sh<sub>2</sub>. Верхній ґрунт (S7S1/sh<sub>3</sub>) подібний до бруніземів і утворився в більш помірних кліматичних умовах, ніж ґрунти sh<sub>1</sub>. Він також сильно деформований приазовськими криогенними процесами;

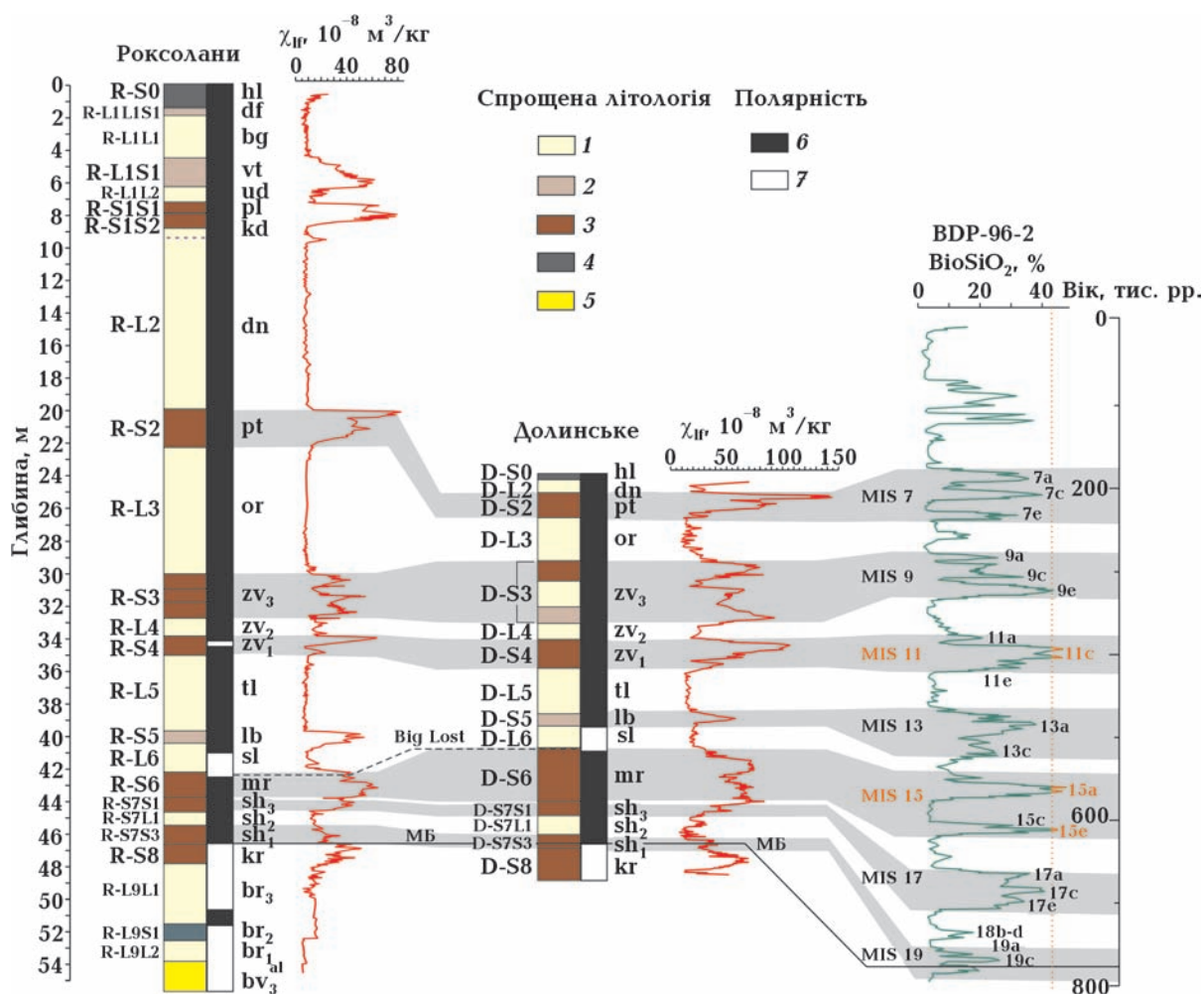


Рис. 5. Кореляція лесово-ґрунтових розрізів Роксолани [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020; Bakhmutov et al., 2024] і Долинське з палеокліматичним записом біогенного кремнезему (%) озера Байкал [Williams et al., 1997]: 1 — леси, 2 — ембріональні або частково денудовані ґрунти, 3 — поховані ґрунти, 4 — сучасний ґрунт, 5 — піски, 6 — пряма полярність, 7 — обернена полярність.

Fig. 5. Correlation of loess-soil sections of Roksolany [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020; Bakhmutov et al., 2024] and Dolynske with the palaeoclimatic record of biogenic silica (%) from Lake Baikal [Williams et al., 1997]: 1 — loess, 2 — embryonic or partially eroded soil, 3 — palaeosol, 4 — recent soil, 5 — sand, 6 — normal polarity, 7 — reversed polarity.

ця особливість може свідчити про суворі кліматичні умови під час наступного гляціалу. На відміну від півдня України, де потужність ширококинських ґрунтів у досліджених нами розрізах не перевищує 2—2,5 м, у центральній та східній Україні цей педокомплекс (потужністю до 3—8 м) добре розвинений [Веклич, 1982; Сиренко, Турло, 1986]. Кліматичний оптимум ширококинського надетапу відповідає ранньому підетапу  $sh_{1b1}$  (S7S3), який корелюємо з оптимальною MIS 19c [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021]. Таким чином, межу між раннім і середнім плейстоценом у субаеральних відкладах України слід проводити у підшві ширококинського педокомплексу.

Додаткові польові спостереження, проведені в розрізі Роксолани (червень 2021 р.) виявили, що ґрунтовий горизонт, раніше позначений як R-S6S2 в статті [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020], за палеопедологічними характеристиками належить до ширококинського горизонту і тому був перейменований на R-S7S1 [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021]. Цей горизонт співвідноситься з ґрунтом D-S7S1 ( $sh_3$ ) у розрізі Долинське, ймовірно, з MIS 17. Попередньо промаркований ґрунт R-S7, що відповідає MIS 19 [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021], позначаємо як R-S7S3 та корелюємо з ґрунтом D-S7S3 ( $sh_{1b1}$ ) у розрізі Долинське (рис. 5). Примітно, що межа МБ знаходиться на тому ж літостратиграфічному рівні в обох розрізах — у найнижчій частині горизонту S7S3/ $sh_{1b1}$ . Таким чином, верхній мартоноський (S6) педокомплекс у розрізі Роксолани має удвічі меншу потужність, ніж у розрізі Долинське, але так само складається з двох основних підгоризонтів. Широкинські (S7) ґрунти в обох розрізах частково денудовані та, ймовірно, деформовані під час сильного приазовського зледеніння (MIS 16?) і наступного інтенсивного мартоноського педогенезу. Ґрунти D-S7 і R-S7 мають відносно низькі значення магнітної сприйнятливості (див. рис. 4) через розвиток потужних карбонатних горизонтів, які дають менші значення сприйнятливості.

*Мартоноський етап (MIS 15?).* У розрізах півдня України, зокрема в розрізі

Долинське, серія мартоноських ґрунтів (D-S6) демонструє вищий ступінь педогенезу порівняно з молодшими ґрунтами, що підтверджується вищими значеннями  $\chi_{fd}$  та  $\chi_{lf}$  (див. рис. 3) і найвищими середніми значеннями  $\chi_{fd\%}$  у 14 % (див. рис. 2). Мартоноський педокомплекс D-S6 дуже схожий до червонуватих ґрунтів V-S6 (В'язівок), SK-S6 (Старі Кайдаки) і R-S6 (Роксолани) як за педологічними характеристиками, так і за значною потужністю (понад 2—3 м). До того ж крива магнітної сприйнятливості D-S6 (Долинське) дуже схожа до такої для мартоноського комплексу у розрізі Бантишеве на Донбасі [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021].

Педокомплекс S6 у розрізах Роксолани та В'язівок, з огляду на положення границі МБ у нижньоширокинському горизонті та загального припущення про наявність єдиного педокомплексу MIS 13—15 в Євразії [Marković et al., 2015] і в Україні зокрема, раніше корелював з MIS 17 [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020]. Однак в розрізі Старі Кайдаки попередньо було зіставлено мартоноський педокомплекс (SK-S6) з MIS 15 [Hlavatskyi et al., 2021]. На відміну від MIS 15, MIS 17 був відносно прохолодним міжльодовиковим періодом, як засвідчили глобальні кліматичні криві [Sümegei et al., 2018]. Педостратиграфічно мартоноські (S6) ґрунти у розрізах В'язівок, Роксолани, Старі Кайдаки, Долинське є добре розвиненими, глинистими, рубифікованими лісовими ґрунтами, перехідними до субтропічних, що являють собою більш інтенсивний, тепліший міжльодовиковий період, на відміну від попереднього пізньоширокинського етапу та наступного лубенського етапу.

Крім того, крива магнітної сприйнятливості у D-S6 схожа з формою кривої морських ізотопів і палеокліматичної кривої байкальських озерних відкладів для MIS 15 (див. рис. 5). Два добре виражені піки в ґрунтах D-S6S1 і D-S6S3 відповідають підстадіям MIS 15a та 15e відповідно, тоді як середній слабший пік у підгоризонті D-S6S2 корелює з MIS 15c. Морські підстадії 15a і 15c—е в морському записі розділені

так само, як пік магнітної сприйнятливості верхнього ґрунту D-S6S1 ( $m\tau_3$ ) зміщений від подвійного піку (з домінуючим нижнім піком) нижнього ґрунту D-S6S2—D-S6S3 ( $m\tau_1$ ). До того ж характерна модель сприйнятливості у D-S6 (Долинське) повторює таку ж нижньої частини педокомплексу S5 у розрізі Дарай-Калон в Таджикистані [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021], що також корелює з MIS 15.

*Лубенський етап (MIS 13).* Молодший слабозвинений сірувато-бурий чорноземоподібний ґрунт D-S5 (Долинське), на нашу думку, відповідає частково еродованому педокомплексу R-S5 у розрізі Роксолани (див. рис. 5). У польових умовах він більше нагадує сульський ембріональний ґрунт, проте за даними магнітного запису (див. рис. 2, 5) цей ґрунт має репрезентувати самостійний інтергляціал. Співвідносно D-S5 (як раніше в розрізах Роксолани і СтаріКайдаки) з лубенським етапом, що відповідає MIS 13 [Hlavatskyi et al., 2021; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021]. Хоча згаданий педокомплекс добре розвинений у лесових серіях північної та центральної України, клімат лубенського етапу (представленого чорноземами, бурими лучними, сірими лісовими, а в нижній частині — оглеєними ґрунтами) зазвичай характеризується як менш теплий, ніж ранньозавадівського (представленого добре розвиненими бурими лісовими ґрунтами) [Сиренко, Турло, 1986; Матвіїшина та ін., 2010; Gozhik, Gerasimenko, 2011; Sirenko, 2017], який зіставляється з MIS 11 [Герасименко, Матвіїшина, 2007]. Натомість, тилігульський холодний період, для якого характерна перша поява льодовиків в Україні, корелює з дуже інтенсивним зледенінням MIS 12, пов'язаним із просуванням великих льодовикових щитів у помірному поясі Євразії [Hlavatskyi et al., 2021]. Цей період значних кліматичних змін (зсув клімату у бік значних похолодань під час гляціалів) називають «переходом середнього Брюнеса» (англ. «Mid-Brunhes transition») [Bradók et al., 2019].

Кореляція ґрунтується на низці інших показників: спостерігаються відносно зна-

чні піки магнітної сприйнятливості в S5 у розрізах Роксолани і Долинське, не характерні для ембріональних ґрунтів (див. рис. 5); тонкий ґрунт S5 є зручним літостратиграфічним маркером, розміщеним трохи вище подвійного червоно-коричневого педокомплексу S6, який є ще одним стратиграфічним маркером у лесових товщах України; рівні потужності тонких підстилаючих (сульського/L6) і потужних перекиваючих (тилігульського/L5) лесових горизонтів на розрізах В'язівки, Роксолани, Гайворон та Долинське [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021]. На глобальних еталонних кривих міжльодовиковий період MIS 13 прохолодніший від MIS 15 і особливо MIS 11, що краще пояснює відносно прохолодний клімат лубенського етапу, порівняно з попереднім мартоносським періодом і наступним ранньозавадівським періодом [Hlavatskyi et al., 2021; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021].

*Завагівський нагетан (MIS 11—9).* За палеопедологічними та магнітними характеристиками горизонти D-S3 та D-S4 (Долинське) корелюють із горизонтами R-S3 та R-S4 (Роксолани). Останні більш розвинені, мають подібну потужність (близько 1—1,5 м кожен), менші значення  $\chi_{lf}$  ((50—60)·10<sup>-8</sup> м<sup>3</sup>/кг), але ідентичну до D-S3 та D-S4 форму кривої магнітної сприйнятливості [Hlavatskyi et al., 2021; Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021]. У розрізі Долинське у польових умовах завадівські ґрунти менш контрастні і більше нагадують лубенський педокомплекс. Проте за даними моделі магнітного запису ґрунт горизонту D-S4 демонструє найвищий ступінь педогенезу (див. рис. 3), що не характерно для магнітних властивостей ґрунтів лубенського етапу [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2021].

На нашу думку, темно-бурий ґрунт D-S4 (Долинське) за характерним візерунком магнітної сприйнятливості та стратиграфічною позицією корелює з відносно розвиненим темно-червоно-бурим ґрунтом R-S4 (Роксолани) (див. рис. 5), а отже, з нижньозавадівським етапом ( $zv_1$ ) і MIS 11. Кореляція з одним із найкраще розвинутих і найдовших інтергляціалів за остан-

ні 800 тис. років — MIS 11 [Sümeği et al., 2018] — краще пояснює вищий ступінь педогенезу у цих педокомплексах.

Цікаво відзначити три піки магнітної сприйнятливості у верхньозавадівському педокомплексі S3 (zv<sub>3</sub>) профілів Долинське, Роксолани, В'язівок [Hlavatskyi, Bakhmutov, 2020] та Удварі-У2А (Угорщина) [Sümeği et al., 2018], що свідчить про наявність трьох інтерстадіалів у цьому міжльодовиковому періоді, зафіксованих також на морській ізотопній кривій (MIS 9a, 9c та 9e; див. рис. 5). На всіх розрізах спостерігається потужна зона накопичення карбонатів між ґрунтами S3S1 (що відповідає MIS 9a) і S3S2 (MIS 9c), що у розрізі В'язівок відповідає рівню нижче ґрунту zv<sub>3c</sub>.

*Потягайлівський етап (MIS 7).* Подвійний ґрунт D-S2 (Долинське), у нашій інтерпретації, корелює із полігенетичним ґрунтом R-S2 (Роксолани) (див. рис. 5). Останній — надзвичайно добре розвинений, має педологічні ознаки приналежності до нижньозавадівського кліматоліту, хоча горизонт і має менші значення  $\chi_{lf}$  (до  $82 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ). У нижній частині педокомплексу спостерігається чорноземоподібний ґрунт, у верхній — бурий лісовий ґрунт з ознаками сильної рубіфікації (особливо у розрізі Роксолани). У розрізі Санжійка обидва педокомплекси (потягайлівський і нижньозавадівський) мають дещо подібну будову, проте нижньозавадівський педокомплекс значно розвиненіший. На противагу R-S2, за педологічними даними [Tsatskin et al., 2001], поховані ґрунти R-S3 та R-S4 (Роксолани) частково денудовані. Враховуючи подібність кривих магнітної сприйнятливості S2 (Долинське, Курортне, Санжійка, Роксолани), що мають характерний подвійний пік з домінуючим верхнім піком, з огляду на подвійний пік у записі морських бентосних ізотопів і байкальської озерної кривої під час MIS 7, співвідносимо горизонт D-S2 (Долинське) з MIS 7 (див. рис. 5).

Остаточні спірні питання хроностратиграфічної інтерпретації лесів півдня України можуть бути вирішені після детальних споро-пилкових, палеопедологіч-

них і геохронологічних (зокрема, методами люмінесцентного датування) досліджень [Sirenko, 2019; Constantin et al., 2021; Moska et al., 2021; De Benedetti et al., 2022; Sümeği et al., 2022; Bonchkovskyi, 2025].

**Висновки.** 1. На прикладі розрізу Долинське підтверджено, що серед магнітних мінералів субаеральних відкладів південної частини України домінує магнетит у вигляді суперпарамагнітних зерен, який зумовлює підвищені значення магнітної сприйнятливості у ґрунтових горизонтах. Також в магнітні властивості робить внесок гематит, в окремих випадках гематит. Магнітна фракція формується залежно від навколишнього середовища, реагує на процеси, які відбуваються при її накопиченні і подальшому педогенезі, що на додаток до інших палеогеографічних показників відображає довгострокові зміни клімату.

2. Для територій Причорноморської низовини, Придніпровської височини, півдня Полтавської рівнини і півдня Подільської височини визначено класичний «педогенний» («китайський») механізм формування магнітних властивостей лесів і вичопних ґрунтів, який характеризується значним вкладом суперпарамагнітних зерен магнетиту, сформованих внаслідок дуже теплих і вологих кліматичних умов у інтергляціальні етапи — від субтропічних на початку середнього плейстоцену до теплопомірних наприкінці неоплейстоцену.

3. За петромагнітними маркерами в інтервалі середнього плейстоцену у лесово-ґрунтовій серії півдня України ідентифіковано сім інтергляціалів, що на морській киснево-ізотопній шкалі та палеокліматичній кривій байкальських озерних відкладів відповідають стадіям MIS 19, MIS 17, MIS 15, MIS 13, MIS 11, MIS 9, MIS 7. Також встановлено ритми окремих кліматичних оптимумів — інтерстадіалів — зокрема MIS 15e, MIS 15a, MIS 13c, MIS 13a, MIS 9e, MIS 9a, MIS 7e, MIS 7a—c, які чітко виявляються магнітними методами.

4. На основі отриманих раніше даних з розрізів В'язівок, Роксолани і Долинське положення палеомагнітної границі Матуяма—Брюнес (773 тис. років тому) визна-

чено у нижній частині нижньоширокинського субкліматоліту ( $sh_1$ ) і, відповідно, нижньоширокинський етап зіставлено з MIS 19.

5. За результатами «запису» петромагнітних параметрів встановлено, що розріз Долинське є перехідними між українськими та дунайськими лесовими формаціями. Запропоновано нову кореляцію четвертинних відкладів у Західному Причорномор'ї, що дає змогу інтегрувати Україну у регіональні палеокліматичні бази даних.

**Подяка.** Висловлюю вдячність В. Шпири за допомогу у відборі зразків, Ю. Векличу за геологічний супровід, С. Черкесу та Л. Дячук за допомогу у петромагнітних вимірах, В. Швайку та О. Бончковському за консультації щодо побудови карт. Дослідження виконувалися за бюджетним асигнуванням відомчої фундаментальної тематики Національної академії наук України для наукової роботи «Магнетизм субаеральних відкладів антропогену України у вирішенні задач стратиграфії, палеокліматології та екології» (шифр III-5-24; № держ. реєстрації 0124U000085). Автор виражає вдячність двом рецензентам за конструктивні коментарі, що покращили цю статтю.

### Список літератури

- Бахмутов В.Г., Главацкий Д.В., Веклич Ю.М., Шпыра В.В., Якухно В.И. Граница Матуяма—Брюнес в лесово-почвенном разрезе Долинское, южная Украина. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 5. С. 95—110. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244065>.
- Бахмутов В., Мельник Г., Главацкий Д., Поляченко Є. Екскурси геомагнітного поля хроно Брюнес. Частина 2: Магніостратиграфія субаеральних відкладів та вплив на довкілля. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2024. № 4(107). С. 13—22. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.02>.
- 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.
- Веклич М.Ф. *Палеоземность и стратотипы почвенных формаций позднего кайнозоя.* Киев: Наук. думка, 1982, 212 с.
- Веклич М.Ф., Веклич Ю.М. *Этапо- и страторайон лиманно-морского плейстоцена Азово-Черноморского бассейна.* Киев: Изд. Ин-та географии НАН Украины, 1993, 186 с.
- Главацкий Д.В., Веклич Ю.М., Бахмутов В.Г., Шпыра В.В., Скарбовийчук Т.В., Якухно В.И., Поляченко Є.Б. Палеомагнітна інформативність нового розрізу з потенційною нижньою межею квартеру лівобережного низов'я р. Дунай. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 4. С. 38—50. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264840>.
- Гожик П.Ф. *Пресноводные моллюски позднего кайнозоя юга Восточной Европы.* Киев, 2006, 247 с.
- Константинова Н.А. *Антропоген южной Молдавии и юго-западной Украины.* Москва: Наука, 1967, 138 с.
- Герасименко Н.П., Матвіїшина Ж.М. Проблеми завадівського «великого інтергляціалу». *Матеріали XVI Українсько-Польського семінару «Проблеми середньоплейстоценового інтергляціалу».* Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2007, С. 194—207.
- Матвіїшина Ж.М., Герасименко Н.П., Передерій В.І., Брагін А.М., Івченко А.С., Кармазиненко С.П., Нагірний В.М., Пархоменко О.Г. *Просторово-часова кореляція палеогеографічних умов четвертинного періоду на території України.* Київ: Наук. думка, 2010, 192 с.
- Меньшов О. Магнітна сприйнятливість південних розрізів чорноземів України на прикладі Одеської області. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2015. № 2(69). С. 70—74. <http://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.69.11.70-74>.
- Сиренко Н.А., Турло С.И. *Развитие почв и растительности Украины в плиоцене и плейстоцене.* Киев: Наук. думка, 1986, 188 с.
- Сиренко О. Субаеральні відклади еоплейстоцену—нижнього неоплейстоцену рівнинної частини України та їх палінологічна характеристика. *Вісник Дніпро. ун-ту. Серія: геологія, географія.* 2017. Т. 25. № 1. С. 101—118. <https://doi.org/10.15421/111712>.

- Третяк 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., & Hlavatskyi, D. (2022). On the reliability of a stratigraphic interpretation that overlooks geophysical techniques and results when determining the age of loess-soil deposits — Comment on Łanczont et al. (2022) «A remarkable last glacial loess sedimentation at Roxolany in the Dniester Liman (Southern Ukraine)». *Quaternary Science Reviews*, 297, 107668. <https://doi.org/10.1016/j.quasci-rev.2022.107668>.
- Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: A historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, 67(4), 35. <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1705>.
- Bokhorst, M.P., Beets, C.J., Marković, S.B., Gerasimenko, N.P., Matviishina, Z.N., & Frechen, M. (2009). Pedo-chemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian-Ukrainian loess sequences. *Quaternary International*, 198(1), 113—123. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.003>.
- Bonchkovskiy, O. (2025). Late Pleistocene pedogenesis response to Millennial-scale climate variability: Evidence from the Volyn sequences (NW Ukraine). *Catena*, 252, 108836. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108836>.
- Bonchkovskiy, O., & Hlavatskyi, D. (2025). Late Pleistocene pedogenesis and loess magnetism in northwestern Ukraine. *Quaternary Research*, 1—31. <https://doi.org/10.1017/qua.2024.51>.
- Bonchkovskiy, O., Hlavatskyi, D., Kuraieva, I., Kravchuk, I., & Bonchkovskiy, A. (2023). Lithology, Geochemistry and Magnetic Susceptibility of the Best Developed Late Pleistocene Loess-Palaeosol Sequence in North-Western Ukraine, Novyi Tik. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510099>.
- 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>.
- Bradák, B., Seto, Y., & Nawrocki, J. (2019). Significant pedogenic and palaeoenvironmental changes during the early Middle Pleistocene in Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534, 109335. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109335>.
- Bradák, B., Seto, Y., Stevens, T., Újvári, G., Fehér, K., & Kölringer, C. (2021). Magnetic susceptibility in the European Loess Belt: New and existing models of magnetic enhancement in loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 569, 110329. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110329>.
- Buggle, B., Hambach, B., Glaser, B., Gerasimenko, N., Marković, S., Glaser, I., & Zöller, L. (2009). Stratigraphy, and spatial and temporal paleoclimatic trends in Southeastern/Eastern European loess-paleosol sequences. *Quaternary International*, 196, 86—106. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.07.013>.
- Constantin, D., Mason, J.A., Veres, D., Hambach, U., Panaiotu, C., Zeeden, C., Zhou, L., Marković, S.B., Gerasimenko, N., Avram, A., Tecsa, V., Groza-Sacaciu, S.M., del Valle Villalonga, L., Begy, R., & Timar-Gabor, A. (2021). OSL-dating of the Pleistocene-Holocene climatic transition in loess from China, Europe and North America, and evidence for accretionary pedogenesis. *Earth-Science Reviews*, 221, 103769. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103769>.
- De Benedetti, C., Gerasimenko, N., Ravazzi, C., & Magri, D. (2022). History of *Tilia* in Europe since the Eemian: Past distribution patterns. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 307, 104778. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104778>.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., & O'Grady, K. (1996). Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124(1), 228—240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>.
- Evans, M.E., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism*. Academic Press, 299 p.
- Evans, M.E., & Heller, F. (1994). Magnetic enhancement and palaeoclimate: Study of a loess/palaeosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophysical Journal International*, 117(1),

- 257—264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03316.x>.
- Eyre, J.K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess — The role of  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265—271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03317.x>.
- 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>.
- Gerasimenko, N., Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Wimbledon, W.A.P., Poliachenko, I., & Bonchkovskiy, O. (2022). Enviromagnetic Study of the Reference Ukrainian Loess-Palaeosol Sequence at Stari Kaydaky. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580069>.
- Gozhik, P.F., & Gerasimenko, N.P. (2011). The lower and middle Pleistocene of Ukraine. In N.P. Gerasimenko, P.F. Gozhik, N.I. Dykan, Zh.M. Matviishyna, V.M. Shelkopyas, B.D. Vozgrin (Eds.), *Quaternary studies in Ukraine* (pp. 9—26). Kyiv: Institute of Geological Sciences NASU.
- Haesaerts, P., Gerasimenko, N., Damblon, F., Yurchenko, T., Kulakovska, L., Usik, V., & Rিদush, B. (2019). The Upper Paleolithic site Doroshivtsi III: a new chronostratigraphic and environmental record of the Late Pleniglacial in the regional context of the Middle Dniester-Prut loess domain (Western Ukraine). *Quaternary International*, 546, 196—215. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.12.018>.
- 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., & Bakhmutov, V. (2021). Early-Middle Pleistocene Magnetostratigraphic and Rock Magnetic Records of the Dolynske Section (Lower Danube, Ukraine) and Their Application to the Correlation of Loess-Palaeosol Sequences in Eastern and South-Eastern Europe. *Quaternary*, 4(4), 43. <https://doi.org/10.3390/quat4040043>.
- 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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378>.
- Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Veklych, Yu., Shpyra, V., & Poliachenko, Ie. (2022). Danube Loess Magnetostratigraphy: A Perspective from Ukraine. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590007>.
- Hlavatskyi, D., Bonchkovskiy, O., Bakhmutov, V., Cherkes, S., Kravchuk, I., & Poliachenko, I. (2025). Environmental trends in southern Ukraine over the last 450 ka: A multi-proxy study of the Sanzhiyka loess-palaeosol sequence. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (pp. 1—5). <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-032.pdf>.
- Hroudа, F. (2011). Models of frequency-dependent susceptibility of rocks and soils revisited and broadened. *Geophysical Journal International*, 187, 1259—1269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05227.x>.
- Jordanova, D., Laag, C., Jordanova, N., Lagroix, F., Georgieva, B., Ishlyanski, D., & Guyodo, Y. (2022). A detailed magnetic record of Pleistocene climate and distal ash dispersal during the last 800 kyrs — The Suhia Kladenetz quarry loess-paleosol sequence near Pleven (Bulgaria). *Global and Planetary Change*, 214, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103840>.
- Łanczont, M., Mroczek, P., Komar, M., Fedorowicz, S., Woronko, B., Nawrocki, J., Frankowski, Z., & Standzikowski, K. (2022). A remarkable last glacial loess sedimentation at Roxolany in the Dniester Liman (Southern Ukraine). *Qua-*

- ternary Science Reviews*, 285, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107521>.
- Lehmkuhl, F., Nett, J.J., Pötter, S., Schulte, P., Sprafke, T., Jary, Z., Antoine, P., Wacha, L., Wolf, D., Zerboni, A., Hošek, J., Marković, S.B., Obreht, I., Sümegi, P., Veres, D., Zeeden, C., Boemke, B., Schaubert, V., Viehweger, J., & Hambach, U. (2021). Loess landscapes of Europe — Mapping, geomorphology, and zonal differentiation. *Earth-Science Reviews*, 215, 103496. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103496>.
- Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137(1), 25—54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X).
- Marković, S.B., Hughes, P.D., Schaetzl, R., Gibbard, P.L., Hao, Q., Radaković, M.G., Vandenberghe, J., Obreht, I., Sipos, G., Laag, C., Gavrilov, M.B., Antić, A., Marković, R.S., Krsmanović, P., Fenn, K., Lukić, T., & Perić, Z.M. (2024). The relationship between the loess stratigraphy in the Vojvodina region of northern Serbia and the Saalian and Rissian Stage glaciations — a review. *Boreas*, 53(4), 577—592. <https://doi.org/10.1111/bor.12646>.
- Marković, S.B., Stevens, T., Kukla, G.J., Hambach, U., Fitzsimmons, K.E., Gibbard, P., Buggle, B., Zech, M., Guo, Z., Hao, Q., Wu, H., O'Hara Dhand, K., Smalley, I.J., Újvári, G., Sümegi, P., Timar-Gabor, A., Veres, D., Sirocko, F., Vasiljević, D.A., Jary, Z., Svensson, A., Jović, V., Lehmkuhl, F., Kovács, J., & Svirčev, Z. (2015). Danube loess stratigraphy — Towards a pan-European loess stratigraphic model. *Earth Science Reviews*, 148, 228—258. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.005>.
- Matoshko, A. (2021). Loess and its derivatives in a common sedimentary and geomorphic evolution of the East European Plain. *Aeolian Research*, 53, 100750. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100750>.
- 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>.
- Maxbauer, D.P., Feinberg, J.M., & Fox, D.L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28—48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>.
- Molnár, D., Makó, L., Molnár, M., & Sümegi, P. (2024). Case Study from Máza Brickyard (SW-Hungary): Paleocology and Sediment Accumulation Changes in the Southern Part of the Carpathian Basin. *Quaternary*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/quat7030035>.
- Moska, P., Bluszcz, A., Poreba, G., Tudyka, K., Adamiec, G., Szymak, A., & Przybyła, A. (2021). Luminescence Dating Procedures at the Gliwice Luminescence Dating Laboratory. *Geochronometria*, 48(1), 1—15. <https://doi.org/10.2478/geochr-2021-0001>.
- Namier, N., Gao, X., Hao, Q., Marković, S.B., Fu, Y., Song, Y., Zhang, H., Wu, X., Deng, C., Gavrilov, M.B., & Guo, Z. (2021). Mineral magnetic properties of loess—paleosol couplets of northern Serbia over the last 1.0 Ma. *Quaternary Research*, 103, 35—48. <https://doi.org/10.1017/qua.2021.41>.
- 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).
- Necula, C., Dimofte, D., & Panaiotu, C. (2015). Rock magnetism of a loess-paleosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophysical Journal International*, 202, 1733—1748. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv250>.
- Sirenko, O. (2019). Palynological data on the description of the Gelasian and Calabriane analogues in the stratotype section of the Kuyalnik deposits near Kryzhanivka village (Odessa region). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(4), 727—737. <https://doi.org/10.15421/111968>.
- Song, Y., Guo, Z., Marković, S., Hambach, U., Deng, C., Chang, L., Wu, J., & Hao, Q. (2018). Magnetic stratigraphy of the Danube loess: a composite Titel-StariSlankamen loess section over the last one million years in Vojvodina, Serbia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 155, 68—80. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.012>.

- Song, Y., Hao, Q., Ge, J., Zhao, D., Zhang, Y., Li, Q., Zuo, X., Lü, Y., & Wang, P. (2014). Quantitative relationships between magnetic enhancement of modern soils and climatic variables over the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, 334—335, 119—131. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.12.010>.
- Sümeği, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümeği, B.P., Almond, P.C., Vandenberghe, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Törőcsik, T., Hao, Q., Smalley, I., Molnár, M., & Marsi, I. (2018). New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 ma: Implications for correlation and proposed pan-Eurasian stratigraphic schemes. *Quaternary Science Reviews*, 191, 144—166. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.012>.
- Sümeği, P., Molnár, D., Gulyás, S., Stevens, T., Makó, L., Cseh, P., Molnár, M., Fitzsimmons, K., Nett, J.J., Hlavatskyi, D., & Lehmkuhl, F. (2022). Comparison of High-Resolution 14C and Luminescence-Based Chronologies of the MIS 2 Madaras Loess/Paleosol Sequence, Hungary: Implications for Chronological Studies. *Quaternary*, 5(4), 47. <https://doi.org/10.3390/quat5040047>.
- Tecsa, V., Gerasimenko, N., Veres, D., Hambach, U., Lehmkuhl, F., Schulte, P., & Timar-Gabor, A. (2020). Revisiting the chronostratigraphy of Late Pleistocene loess-paleosol sequences in southwestern Ukraine: OSL dating of Kurortne section. *Quaternary International*, 542, 65—79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.03.001>.
- 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, 911—916. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00141-7).
- Williams, D.F., Peck, J., Karabanov, E.B., Prokopenko, A.A., Kravchinsky, V., King, J., & Kuzmin, M.I. (1997). Lake Baikal Record of Continental Climate Response to Orbital Insolation During the Past 5 Million Years. *Science*, 278, 1114—1117. <https://doi.org/10.1126/science.278.5340.11>.
- Zeeden, C., Hambach, U., Obreht, I., Hao, Q., Abels, H.A., Lehmkuhl, F., Gavrilov, M.B., & Marković, S.B. (2018). Patterns and timing of loess-paleosol transitions in Eurasia: Constraints for paleoclimate studies. *Global and Planetary Change*, 162, 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.12.021>.

## Magnetic enhancement model for southern Ukraine loess on the example of the Middle Pleistocene sequence at Dolynske

*D.V. Hlavatskyi, 2025*

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Rock magnetic parameters of loess-palaeosol sequences, primarily, magnetic susceptibility and its frequency-dependence factor, play a significant role in the Pleistocene climate studies. Usually, the interpretation of loess magnetic patterns is based on two commonly accepted models: the pedogenic («Chinese») magnetic enhancement and reducing-pedogenic («Alaskan») models. However, there is an increasing number of cases where each model cannot be applied alone (the so-called transitional model), in particular in northwestern Ukraine. This study provides rock magnetic data from the Middle Pleistocene loess sequence at Dolynske in southern Ukraine. Combined with previously obtained data from the Roksolany and other sections in the region, the results show high concentration of ferrimagnetic minerals, in particular, superparamagnetic magnetite, in palaeosols. This proves the predominance of the typical pedogenic magnetic enhance-

ment model for southern Ukraine, as well as for the most of Ukraine. According to the rock magnetic indices, in the Middle Pleistocene, seven interglacials were identified in the interval of the loess-soil series of southern Ukraine. They correspond to the marine isotope stages MIS 19, MIS 17, MIS 15, MIS 13, MIS 11, MIS 9, and MIS 7. The rhythms have been established for individual climatic optima (interstadials), particularly for MIS 15e, MIS 15a, MIS 13c, MIS 13a, MIS 9e, MIS 9a, MIS 7e, and MIS 7a—c, which are clearly detected by magnetic methods. The paper considers several (chrono-)stratigraphic problems in the Middle Pleistocene loess formation of southern Ukraine and compares palaeogeographic stages of the Ukrainian climatostratigraphic system with major global and regional palaeoclimatic trends.

**Key words:** Danube basin, loess-palaeosol sequence, magnetic susceptibility, rock magnetism, pedogenic model, Mid-Brunhes transition.

## References

- Bakhmutov, V.G., Hlavatskyi, D.V., Veklych, Y.M., Shpyra, V.V., & Yakukhno, V.I. (2021). The Matuyama—Brunhes boundary in the loess-palaeosol sequence of Dolynske, southern Ukraine. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 43(5), 95—110. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244065> (in Russian).
- Bakhmutov, V., Melnyk, G., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2024). Geomagnetic field excursions of the brunhes chron. Part 2: magnetostratigraphy of subaerial deposits and impact on the environment. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(107), 13—22. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.02> (in Ukrainian).
- 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).
- Veklich, M.F. (1982). *Stages and stratotypes of the soil formations of Ukraine in the Upper Cenozoic*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Veklich, M.F., & Veklich, Y.M. (1993). *Stage and stratoregion of the estuary-marine Pleistocene of the Azov-Black Sea Basin*. Kyiv: Publ. by the Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, 186 p. (in Russian).
- Hlavatskyi, D.V., Veklych, Y.M., Bakhmutov, V.G., Shpyra, V.V., Skarboviychuk, T.V., Yakukhno, V.I., & Poliachenko, I.B. (2022). Palaeomagnetic suitability of a new section with a potential lower boundary for the Quaternary on the left bank of the lower River Danube. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 44(4), 38—50. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264840> (in Ukrainian).
- Gozhik, P.F. (2006). *Freshwater mollusks of the late Cenozoic of the south of Eastern Europe*. Kiev, 247 p. (in Russian).
- Konstantinova, N.A. (1967). *Antropogene of the Southern Moldavia and South-Western Ukraine*. Moscow: Nauka, 138 p. (in Russian).
- Gerasimenko, N.P., & Matvijishyna, Zh.M. (2007). The problems of Zavadiv «great interglacial». *Problems of Middle Pleistocene interglacial. Proceeding of the XIV Ukrainian-Polish Workshop 12—16 September 2007* (pp. 194—206). Lviv: Publishing Center of Ivan Franko National University of Lviv (in Ukrainian).
- Matviishyna, Zh.M., Gerasimenko, N.P., Perederyi, V.I., Bragin, A.M., Ivchenko, A.S., Karmazinenko, S.P., Nagirnyi, V.M., & Parkhomenko, O.G. (2010). *Spatio-temporal correlation of Quaternary palaeogeographic conditions on the territory of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka, 192 p. (in Ukrainian).
- Menshov, O. (2015). Magnetic susceptibility of the southern chernozems of Ukraine, case study from Odessa region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 69(2), 70—74. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.69.11.70-74> (in Ukrainian).
- Sirenko, N.A., & Turlo, S.I. (1986). *Successions of soils and vegetation of Ukraine during the Pliocene and Pleistocene*. Kiev: Naukova Dumka, 188 p. (in Russian).
- Sirenko, O. (2017). Subaerial Eopleistocene—Low-

- er Neopleistocene deposits of the plain part of Ukraine and their palynological characteristic. *Dnipropetrovsk University Bulletin. Ser. Geology, Geography*, 25(1), 101—118. <https://doi.org/10.15421/111712> (in Ukrainian).
- 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: Publication of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Geological Sciences, 50 p. (in Russian).
- Bakhmutov, V., & Hlavatskyi, D. (2022). On the reliability of a stratigraphic interpretation that overlooks geophysical techniques and results when determining the age of loess-soil deposits — Comment on Łanczont et al. (2022) «A remarkable last glacial loess sedimentation at Roxolany in the Dniester Liman (Southern Ukraine)». *Quaternary Science Reviews*, 297, 107668. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107668>.
- Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: A historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, 67(4), 35. <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1705>.
- Bokhorst, M.P., Beets, C.J., Marković, S.B., Gerasimenko, N.P., Matviishina, Z.N., & Frechen, M. (2009). Pedo-chemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian-Ukrainian loess sequences. *Quaternary International*, 198(1), 113—123. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.003>.
- Bonchkovskiy, O. (2025). Late Pleistocene pedogenesis response to Millennial-scale climate variability: Evidence from the Volyn sequences (NW Ukraine). *Catena*, 252, 108836. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108836>.
- Bonchkovskiy, O., & Hlavatskyi, D. (2025). Late Pleistocene pedogenesis and loess magnetism in northwestern Ukraine. *Quaternary Research*, 1—31. <https://doi.org/10.1017/qua.2024.51>.
- Bonchkovskiy, O., Hlavatskyi, D., Kuraieva, I., Kravchuk, I., & Bonchkovskiy, A. (2023). Lithology, Geochemistry and Magnetic Susceptibility of the Best Developed Late Pleistocene Loess-Palaeosol Sequence in North-Western Ukraine, Novyi Tik. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510099>.
- 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>.
- Bradák, B., Seto, Y., & Nawrocki, J. (2019). Significant pedogenic and palaeoenvironmental changes during the early Middle Pleistocene in Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 534, 109335. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109335>.
- Bradák, B., Seto, Y., Stevens, T., Újvári, G., Fehér, K., & Költringer, C. (2021). Magnetic susceptibility in the European Loess Belt: New and existing models of magnetic enhancement in loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 569, 110329. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110329>.
- Buggle, B., Hambach, B., Glaser, B., Gerasimenko, N., Marković, S., Glaser, I., & Zöller, L. (2009). Stratigraphy, and spatial and temporal paleoclimatic trends in Southeastern/Eastern European loess-paleosol sequences. *Quaternary International*, 196, 86—106. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.07.013>.
- Constantin, D., Mason, J.A., Veres, D., Hambach, U., Panaiotu, C., Zeeden, C., Zhou, L., Marković, S.B., Gerasimenko, N., Avram, A., Tecca, V., Groza-Sacaciu, S.M., del Valle Villalonga, L., Begy, R., & Timar-Gabor, A. (2021). OSL-dating of the Pleistocene-Holocene climatic transition in loess from China, Europe and North America, and evidence for accretionary pedogenesis. *Earth-Science Reviews*, 221, 103769. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103769>.
- De Benedetti, C., Gerasimenko, N., Ravazzi, C., & Magri, D. (2022). History of *Tilia* in Europe since the Eemian: Past distribution patterns. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 307, 104778. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104778>.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A., & O'Grady, K. (1996). Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124(1), 228—240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>.
- Evans, M.E., & Heller, F. (2003). *Environmental*

- Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press, 299 p.
- Evans, M.E., & Heller, F. (1994). Magnetic enhancement and palaeoclimate: Study of a loess/palaeosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophysical Journal International*, 117(1), 257—264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03316.x>.
- Eyre, J.K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess — The role of  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265—271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb03317.x>.
- 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>.
- Gerasimenko, N., Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Wimbledon, W.A.P., Poliachenko, I., & Bonchkovskiy, O. (2022). Enviromagnetic Study of the Reference Ukrainian Loess-Palaeosol Sequence at Stari Kaydaky. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580069>.
- Gozhik, P.F., & Gerasimenko, N.P. (2011). The lower and middle Pleistocene of Ukraine. In N.P. Gerasimenko, P.F. Gozhik, N.I. Dykan, Zh.M. Matviishyna, V.M. Shelkopyas, B.D. Vozgrin (Eds.), *Quaternary studies in Ukraine* (pp. 9—26). Kyiv: Institute of Geological Sciences NASU.
- Haesaerts, P., Gerasimenko, N., Damblon, F., Yurchenko, T., Kulakovska, L., Usik, V., & Ridush, B. (2019). The Upper Paleolithic site Doroshivtsi III: a new chronostratigraphic and environmental record of the Late Pleniglacial in the regional context of the Middle Dniester-Prut loess domain (Western Ukraine). *Quaternary International*, 546, 196—215. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.12.018>.
- 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., & Bakhmutov, V. (2021). Early-Middle Pleistocene Magnetostratigraphic and Rock Magnetic Records of the Dolynske Section (Lower Danube, Ukraine) and Their Application to the Correlation of Loess-Palaeosol Sequences in Eastern and South-Eastern Europe. *Quaternary*, 4(4), 43. <https://doi.org/10.3390/quat4040043>.
- 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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378>.
- Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Veklych, Yu., Shpyra, V., & Poliachenko, Ie. (2022). Danube Loess Magnetostratigraphy: A Perspective from Ukraine. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590007>.
- Hlavatskyi, D., Bonchkovskiy, O., Bakhmutov, V., Cherkes, S., Kravchuk, I., & Poliachenko, I. (2025). Environmental trends in southern Ukraine over the last 450 ka: A multi-proxy study of the Sanzhiyka loess-palaeosol sequence. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (pp. 1—5). <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-032.pdf>.
- Hroudá, F. (2011). Models of frequency-dependent susceptibility of rocks and soils revisited and broadened. *Geophysical Journal International*, 187, 1259—1269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05227.x>.
- Jordanova, D., Laag, C., Jordanova, N., Lagroix, F., Georgieva, B., Ishlyamski, D., & Guyodo, Y. (2022). A detailed magnetic record of Pleistocene climate and distal ash dispersal during the last 800 kyrs — The Suhia Kladenetz quarry loess-palaeosol sequence near Pleven

- (Bulgaria). *Global and Planetary Change*, 214, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103840>.
- Lanczont, M., Mroczek, P., Komar, M., Fedorowicz, S., Woronko, B., Nawrocki, J., Frankowski, Z., & Standzikowski, K. (2022). A remarkable last glacial loess sedimentation at Roxolany in the Dniester Liman (Southern Ukraine). *Quaternary Science Reviews*, 285, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107521>.
- Lehmkuhl, F., Nett, J.J., Pötter, S., Schulte, P., Sprafke, T., Jary, Z., Antoine, P., Wacha, L., Wolf, D., Zerboni, A., Hošek, J., Marković, S.B., Obreht, I., Sümegi, P., Veres, D., Zeeden, C., Boemke, B., Schaubert, V., Viehweger, J., & Hambach, U. (2021). Loess landscapes of Europe — Mapping, geomorphology, and zonal differentiation. *Earth-Science Reviews*, 215, 103496. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103496>.
- Maher, B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137(1), 25—54. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(97\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(97)00103-X).
- Marković, S.B., Hughes, P.D., Schaetzl, R., Gibbard, P.L., Hao, Q., Radaković, M.G., Vandenberghe, J., Obreht, I., Sipos, G., Laag, C., Gavrilov, M.B., Antić, A., Marković, R.S., Krsmanović, P., Fenn, K., Lukić, T., & Perić, Z.M. (2024). The relationship between the loess stratigraphy in the Vojvodina region of northern Serbia and the Saalian and Rissian Stage glaciations — a review. *Boreas*, 53(4), 577—592. <https://doi.org/10.1111/bor.12646>.
- Marković, S.B., Stevens, T., Kukla, G.J., Hambach, U., Fitzsimmons, K.E., Gibbard, P., Bugge, B., Zech, M., Guo, Z., Hao, Q., Wu, H., O'Hara Dhand, K., Smalley, I.J., Újvári, G., Sümegi, P., Timar-Gabor, A., Veres, D., Sirocko, F., Vasiljević, D.A., Jary, Z., Svensson, A., Jović, V., Lehmkuhl, F., Kovács, J., & Svirčev, Z. (2015). Danube loess stratigraphy — Towards a pan-European loess stratigraphic model. *Earth Science Reviews*, 148, 228—258. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.005>.
- Matoshko, A. (2021). Loess and its derivatives in a common sedimentary and geomorphic evolution of the East European Plain. *Aeolian Research*, 53, 100750. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100750>.
- 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>.
- Maxbauer, D.P., Feinberg, J.M., & Fox, D.L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28—48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>.
- Molnár, D., Makó, L., Molnár, M., & Sümegi, P. (2024). Case Study from Máza Brickyard (SW-Hungary): Paleocology and Sediment Accumulation Changes in the Southern Part of the Carpathian Basin. *Quaternary*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/quat7030035>.
- Moska, P., Bluszcz, A., Poręba, G., Tudyka, K., Adamiec, G., Szymak, A., & Przybyła, A. (2021). Luminescence Dating Procedures at the Gliwice Luminescence Dating Laboratory. *Geochronometria*, 48(1), 1—15. <https://doi.org/10.2478/geochr-2021-0001>.
- Namier, N., Gao, X., Hao, Q., Marković, S.B., Fu, Y., Song, Y., Zhang, H., Wu, X., Deng, C., Gavrilov, M.B., & Guo, Z. (2021). Mineral magnetic properties of loess—paleosol couplets of northern Serbia over the last 1.0 Ma. *Quaternary Research*, 103, 35—48. <https://doi.org/10.1017/qua.2021.41>.
- 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).
- Necula, C., Dimofte, D., & Panaiotu, C. (2015). Rock magnetism of a loess-palaeosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophysical Journal International*, 202, 1733—1748. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv250>.
- Sirenko, O. (2019). Palynological data on the description of the Gelasian and Calabrian analogues in the stratotype section of the Kuyalnik deposits near Kryzhanivka village (Odessa region). *Journal of Geology, Geography and*

- Geocology*, 28(4), 727—737. <https://doi.org/10.15421/111968>.
- Song, Y., Guo, Z., Marković, S., Hambach, U., Deng, C., Chang, L., Wu, J., & Hao, Q. (2018). Magnetic stratigraphy of the Danube loess: a composite Titel-StariSlankamen loess section over the last one million years in Vojvodina, Serbia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 155, 68—80. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.012>.
- Song, Y., Hao, Q., Ge, J., Zhao, D., Zhang, Y., Li, Q., Zuo, X., Lü, Y., & Wang, P. (2014). Quantitative relationships between magnetic enhancement of modern soils and climatic variables over the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, 334—335, 119—131. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.12.010>.
- Sümeği, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümeği, B.P., Almond, P.C., Vandenberghe, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Törőcsik, T., Hao, Q., Smalley, I., Molnár, M., & Marsi, I. (2018). New chronology of the best developed loess/paleosol sequence of Hungary capturing the past 1.1 ma: Implications for correlation and proposed pan-Eurasian stratigraphic schemes. *Quaternary Science Reviews*, 191, 144—166. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.012>.
- Sümeği, P., Molnár, D., Gulyás, S., Stevens, T., Makó, L., Cseh, P., Molnár, M., Fitzsimmons, K., Nett, J.J., Hlavatskyi, D., & Lehmkuhl, F. (2022). Comparison of High-Resolution 14C and Luminescence-Based Chronologies of the MIS 2 Madaras Loess/Paleosol Sequence, Hungary: Implications for Chronological Studies. *Quaternary*, 5(4), 47. <https://doi.org/10.3390/quat5040047>.
- Tecsa, V., Gerasimenko, N., Veres, D., Hambach, U., Lehmkuhl, F., Schulte, P., & Timar-Gabor, A. (2020). Revisiting the chronostratigraphy of Late Pleistocene loess-paleosol sequences in southwestern Ukraine: OSL dating of Kurortne section. *Quaternary International*, 542, 65—79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.03.001>.
- 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, 911—916. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00141-7).
- Williams, D.F., Peck, J., Karabanov, E.B., Prokopenko, A.A., Kravchinsky, V., King, J., & Kuzmin, M.I. (1997). Lake Baikal Record of Continental Climate Response to Orbital Insolation During the Past 5 Million Years. *Science*, 278, 1114—1117. <https://doi.org/10.1126/science.278.5340.11>.
- Zeeden, C., Hambach, U., Obrecht, I., Hao, Q., Abels, H.A., Lehmkuhl, F., Gavrilov, M.B., & Marković, S.B. (2018). Patterns and timing of loess-paleosol transitions in Eurasia: Constraints for paleoclimate studies. *Global and Planetary Change*, 162, 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.12.021>.