

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.838.5+551.79

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.02>

Володимир БАХМУТОВ¹, д-р геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Галина МЕЛЬНИК¹, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Євген ПОЛЯЧЕНКО¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

ЕКСКУРСИ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ХРОНУ БРЮНЕС. ЧАСТИНА 2: МАГНІТОСТРАТИГРАФІЯ СУБАЕРАЛЬНИХ ВІДКЛАДІВ ТА ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Вступ. Сучасний стан та проблеми дослідження екскурсів хрону Брюнес розглянуто у першій частині статті. Зокрема, зазначено, що найбільш надійно встановленими у хроні Брюнес вважаються екскурси Laschamp (41 тис. років тому), Blake (114 тис. років тому), Iceland Basin (188 тис. років тому). У другій частині статті наведено детальний огляд та приклади застосування геомагнітних екскурсів хрону Брюнес при кореляції субаеральних відкладів плейстоцену, зокрема лесово-грунтових товщ України і суміжних країн Європи.

Методи. Дослідження лесово-грунтових товщ виконувались палеомагнітними та петромагнітними методами. Розрахунок характеристичної компоненти намагнічуваності виконувався статистичними методами сферичних даних.

Результати. Представлено нові результати дослідження лесово-грунтового розрізу Роксолани, що доповнюють попередню магнітостратиграфічну шкалу. У розрізі виявлено екскурс оберненої полярності на рівні нижньозаводівського педокомплексу (S4; корелянт MIS 11), що в нашій інтерпретації зіставляється з подією Unpamed віком 430 тис. років тому, описаною раніше у лесових розрізах В'язівки і Меджибіж. Обговорено останні роботи з вивчення проблематики впливу екскурсів на зміни довкілля, зокрема на палеоекологічні та кліматичні зміни в останньому льодовиковому періоді.

Висновки. Сучасними дослідженнями лесово-грунтової формації України виявлено екскурси Unpamed (430 тис. років тому) та Big Lost (540 тис. років тому). Відсутність інших добре задокументованих глобальних екскурсів у верхньоплейстоценових лесово-грунтових відкладах може пояснюватися як неповнотою відбору зразків, так і стратиграфічними перервами, особливостями палеомагнітного "запису" та недостатньою вивченістю магнітної мінералогії цих порід. Вплив інверсій та екскурсів геомагнітного поля на зміни довкілля є дискусійним питанням, що потребує подальших досліджень, особливо у сфері пошуку механізмів такого впливу. Оскільки багато дослідників підкреслюють роль атмосферного озону у змінах клімату та довкілля, запропонований у (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) механізм може пояснювати зв'язок змін геомагнітного поля та клімату.

Ключові слова: інверсії та екскурси геомагнітного поля, магнітостратиграфія, лесово-грунтові серії, зміни навколишнього середовища, плейстоцен.

Вступ

У першій частині статті було розглянуто сучасний стан дослідження екскурсів хрону Брюнес (Бахмутов та ін., 2023). На сьогодні найбільш надійно встановленими у хроні Брюнес вважаються екскурси Laschamp (41 тис. років тому), Blake (114 тис. років тому), Iceland Basin (188 тис. років тому), а найбільшою проблемою є достовірне визначення екскурсів у часовому інтервалі 0–30 тис. років тому. Достовірно встановлені екскурси можуть слугувати надійними стратиграфічними реперами для кореляції четвертинних відкладів, оскільки вони є короткочасними в геологічних масштабах часу подій, які мають глобальний чи регіональний характер. Останнє рекомендують враховувати при побудові хроностратиграфічних шкал.

Друга частина статті присвячена актуальним питанням залучення екскурсів у розв'язанні проблем стратиграфії, палеокліматології та екології антропогену, зокрема результатам досліджень екскурсів у субаеральних відкладах плейстоцену України та деяким імовірним

механізмам впливу екскурсів на зміни довкілля, насамперед на зміни клімату.

Запис екскурсів в субаеральних відкладах. Залучення палеомагнітного методу для розв'язання задач стратиграфії в 1960-х роках і подальші інтенсивні дослідження субаеральної формації плейстоцену України, Китаю і Центральної Азії передусім були скеровані на побудову магнітостратиграфічної шкали. Здавалося, що перші обнадійливі результати дадуть відповіді на питання кореляції четвертинних відкладів за палеомагнітними даними (див. посилання у Бахмутов та ін., 2023). Однак із часом виявилось, що при інтерпретації результатів виникало багато суперечливих тлумачень як стратиграфічних, так і магнітостратиграфічних схем. Як недавній приклад можна навести огляд з отриманням нових даних щодо положення межі Матуяма–Брюнес в опорних розрізах лесово-грунтової формації плейстоцену України (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020; Бахмутов і др., 2021). З екскурсами проблема набагато складніша, тому окремо слід зупинитися на особливостях "запису" екскурсів в субаеральних відкладах.

© Бахмутов Володимир, Мельник Галина, Главацький Дмитро, Поляченко Євген, 2024

Основною проблемою у визначенні екскурсів у лесових горизонтах, порушених подальшими процесами ґрунтоутворення, є затримка палеомагнітного "запису", що зумовлюється глибиною фіксації (lock in depth) намагніченості у досліджуваних породах. Така "затримка" пояснюється тим, що вторинні процеси намагнічування (постседиментаційні, хімічні, в'язкі), зумовлені зазвичай процесами педогенезу, "зміщують" палеомагнітний "запис" униз по товщі розрізу, і відбувається як його здавнювання, так і згладжування (тобто спотворення) (див., наприклад, Большаков (1995; 2004)). При зміщенні глибини фіксації на кілька метрів, згідно із запропонованою В.А. Большаковим схемою, напрямки залишкової намагніченості контролюються постседиментаційною намагніченістю, яка може формуватися значно пізніше. При цьому "запис" варіації геомагнітного поля у породах суттєво згладжується, а короточасні різкі зміни компонент поля (наприклад, екскурси) можуть взагалі не фіксуватися. Можливість впливу таких процесів на палеомагнітний "запис" показано на прикладі вивчення геомагнітних екскурсів, "запис" яких спотворювався чи здавнювався на рівнях розвинутого педогенезу лесово-ґрунтових розрізів (Fang et al., 1997; Zhu et al., 1994, 2007; Sun et al., 2013). Водночас намагніченості у "записах" екскурсів у лесових горизонтах (Zhu et al., 1994; Sun et al., 2013), а також виділення вікових геомагнітних варіацій (Evans, & Heller, 2003), вказують на значно меншу "глибину фіксації" для лесів порівняно з ґрунтами.

В узагальнювальній роботі з магніостратиграфії лесових розрізів Китаю (Liu et al., 2015) розглянуті палеомагнітні і петромагнітні дані за майже 40 років і зроблена спроба кореляції континентальних палеокліматичних (на основі петромагнітних даних) "записів" із результатами, отриманими для морських глибоководних відкладів. Попри детальні дослідження десятків лесово-ґрунтових розрізів, автори (Liu et al., 2015) роблять висновок, що окрім границі Матуяма–Брюнес, стратиграфічне положення інших геомагнітних подій (екскурсів) встановлено ненадійно і потребує уточнення. Проте й аналіз розташування границі Матуяма–Брюнес на стратиграфічних шкалах вказує на її "плаваючу" приуроченість то до ґрунтових горизонтів, то до лесових (Бахмутов, & Главацкий, 2016).

У пізніших роботах (Bolshakov, 2017; Jin et al., 2019; Hlavatskyi, 2019; Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020, 2021), однак гіпотеза "lock in depth" була переглянута. Зокрема, "плаваюче" положення межі Матуяма–Брюнес у більшості лесових розрізів Китаю та України пояснюється некоректним стратиграфічним розчленуванням, перервами в осадокопиченні, неточним визначенням межі між ґрунтовими та лесовими горизонтами. Як виявилось, гранулометричні аналізи вказують на більшу фактичну потужність ґрунтового горизонту за рахунок частини лесового (де і визначалась границя Матуяма–Брюнес), на відміну від візуального визначення у польових умовах та за даними магнітної сприйнятливості (Liu et al., 2015; Jin et al., 2019).

Саме через перерви у седиментації екскурси не так часто фіксуються в четвертинних лесових відкладах, зокрема в межах детально вивчених розрізів Китайського лесового плато і Європи, включаючи досліджений нами стратотип лесово-ґрунтової формації України – розріз Старі Кайдаки (Hlavatskyi et al., 2021). Однак у багатьох ранніх європейських (та українських) дослідженнях лесів була опублікована інформація про численні "геомагнітні екскурсії". На нашу думку, це було зумовлено недосконалістю в методиці палеомагнітних досліджень, зокрема неврахуванням впливу в'язкої складової залишкової намагніченості, і такі записи "екскурсів" не були зумовлені

змінами геомагнітного поля (див. обговорення в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020).

Під час наших досліджень тільки деякі екскурси були зафіксовані у субаеральних відкладах середнього плейстоцену (рис. 1). Безіменна подія (Unnamed; 430 тис. років тому) виявлена у розрізах В'язівки (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020), Меджибіж (Главацкий и др., 2021), а екскурс Big Lost (540–580 тис. років тому) – у розрізах Роксолани (Bakhmutov et al., 2017) та Долинське (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2021). Крім того, у розрізі Роксолани було визначено екскурс прямої полярності у хроні Матуяма, попередньо зіставлений із Kamikatsura (867–900 тис. років тому). Визначення на цих розрізах інших надійно задокументованих екскурсів, зокрема Lachamp та Blake, потребує подальших детальних досліджень з безперервним (суцільним) відбором зразків.

У розрізах західної частини України, при детальному відборі орієнтованих зразків на розрізі верхнього плейстоцену Колодіїв, було ідентифіковано екскурси Blake та Lachamp (Nawrocki, Boguckij, & Łanczont, 2007). У розрізі Скала Подільська у нижній частині верхнього педокомплексу, сформованого на відкладах останнього інтергляціального ґрунту (на глибині 0,5 м від поверхні), було визначено епізод Blake (Boguckij et al., 2009). Палеомагнітна подія Pringle Falls (212 тис. років тому) була виявлена в археологічній стоянці Великий Глибочок (Łanczont et al., 2014). Крім того, на палеолітичній стоянці Пронятин було ідентифіковано екскурс Blake (Łanczont et al., 2015). Ймовірний екскурс Hilina Pali (18 тис. років тому) описано у розрізі Рівне у верхній частині останнього лесового горизонту (Nawrocki et al., 2018). Слід зазначити, що деякі з цих екскурсів були визначені тільки по одному зразку, а відносно екскурсу Hilina Pali критичні зауваження були зроблені в (Snowball, 2018).

Відклади плейстоцену печери Буковинка також досліджувалися палеомагнітним методом (Bondar, & Ridush, 2015). Один зразок показав аномальне значення схилення (близько 60°), що автори інтерпретували як прояв екскурсу Etrussia близько 2,8 тисяч років тому.

Серед найповніших розрізів геомагнітних епізодів у субаеральних відкладах доцільно розглянути свердловину Udvari-U2 у басейні річки Дунай (Угорщина), у якій магнітосони зворотної полярності в межах хрону Брюнес були інтерпретовані (Sümegei et al., 2018) як Blake (120 тис. років тому), Iceland Basin (191 тис. років тому), Levantine (362 тис. років тому), Unnamed (430 тис. років тому) та Stage 17 (670 тис. років тому). Ця свердловина має потужність 170 м (зокрема, відклади епохи Брюнес – верхні 70 м), палеопедологами не зафіксовано стратиграфічних перерв, а магніостратиграфічні висновки обґрунтовано численними знахідками фауни.

Як приклад палеомагнітних досліджень у субаеральних відкладах та їхньої магніостратиграфічної інтерпретації наведемо нові результати дослідження лесово-ґрунтового розрізу Роксолани в Північному Причорномор'ї.

Екскурс Unnamed (430 тис. років тому) у лесово-ґрунтовому розрізі Роксолани.

Геологічне положення. Розріз плейстоценових відкладів Роксолани – один із найвідоміших європейських лесово-ґрунтових розрізів, що детально вивчали численні українські та міжнародні команди (див. огляд в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020; Bakhmutov, Hlavatskyi, & Poliachenko, 2023). Відслонюється (46°11' пн.ш.; 30°26' сх.д.) на лівому березі Дністровського лиману у вигляді лесових кліфів потужністю до 55 м і є, вірогідно, найбільш потужним лесово-ґрунтовим розрізом Причорноморської низовини. За відсутності якісних

літопалеогеологічних досліджень, достовірних хронологічних даних, а також через труднощі у виділенні напрямків найбільш стабільної (характеристичної) компоненти залишкової намагніченості (ChRM), стратиграфія розрізу Роксолани та положення межі Матуяма–Брюнес викликали жваві дискусії, починаючи з часу його

вивчення – у 1970-х рр. і дотепер. Недавно співавтори цієї статті (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) запропонували нове стратиграфічне розчленування, що базується на положенні межі Матуяма–Брюнес, палеомагнітних реперів (рис. 1) та сучасних даних люмінесцентного датування верхньої частини розрізу.

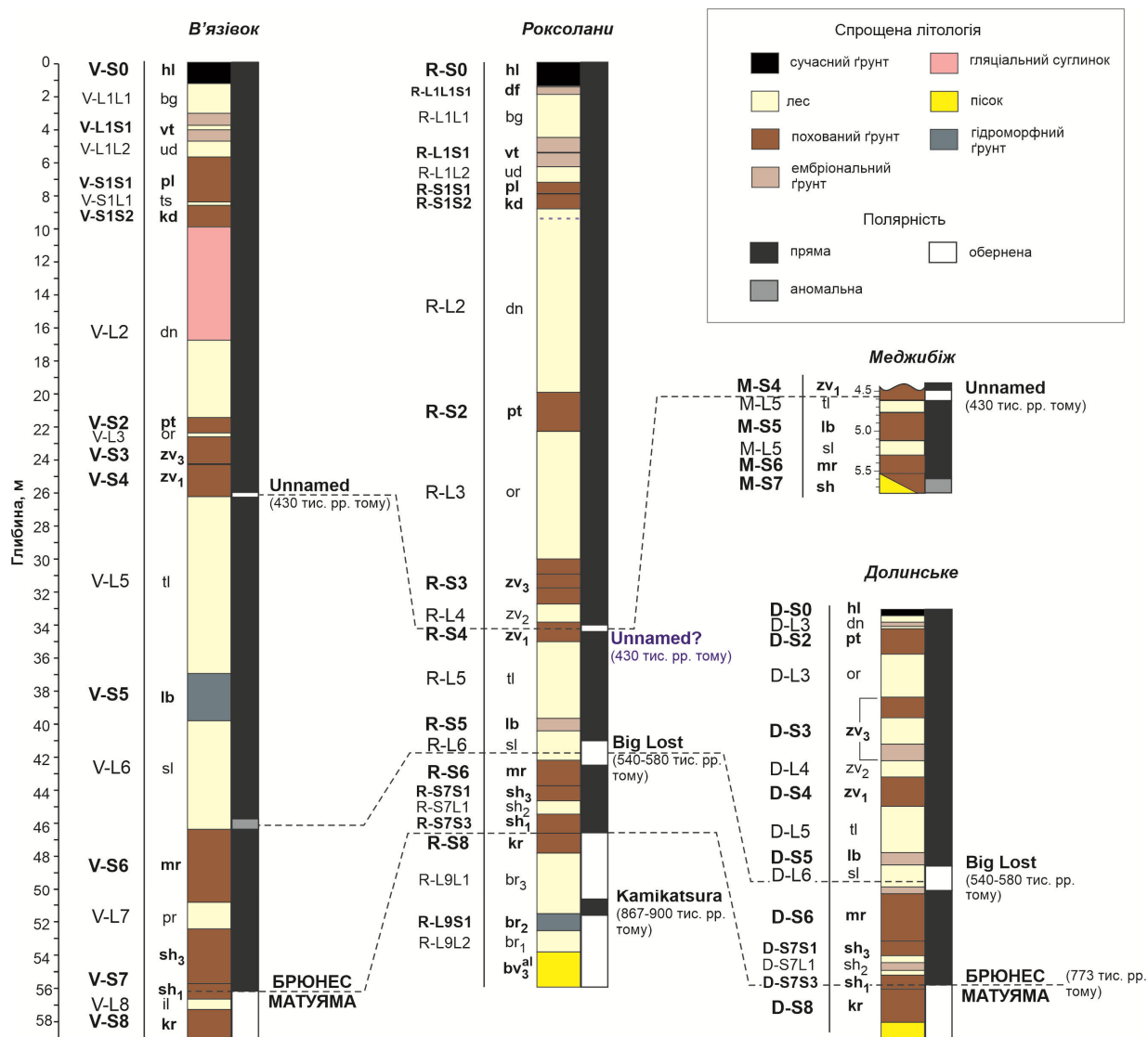


Рис. 1. Виявлені геомагнітні експурси за результатами магнітостратиграфічних досліджень лесово-ґрунтових розрізів України:

В'язівок (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020), Роксолани (Bakhmutov et al, 2017; Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2019), Меджибіж (Hlavatskyi, 2019; Гловацький и др., 2021), Долинське (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2021). Індеси позначають стратиграфічні горизонти: hl – голоцен, bg – бузький, vt – витачівський, ud – удайський, pl – прилуцький, ts – тясминський, kd – кайдацький, dn – дніпровський, pt – потягайлівський, or – орільський, zv – завадівський, tl – тилигульський, lb – лубенський, sl – сульський, mr – мартоносський, pr – приазовський, sh – широкинський, il – іллічівський, kr – крижанівський, br – березанський, bv – берегівський. Експурс Unnamed (430 тис. років тому) запропоновано для розрізу Роксолани за палеомагнітними даними, наведеними у цій статті

Методи

У процесі додаткових досліджень пілотної колекції 18 зразків із розрізу Роксолани у палеомагнітній лабораторії Інституту геофізики Польської академії наук (м. Варшава, 2022 р.), зразки попередньо розмагнічували змінним магнітним полем установкою, що супроводжує криогенний магнітометр 2G SQUID DC. Отримані дані порівнювались із результатами ступеневого температурного розмагнічування, проведеного в пічці MMTD 80, і вимірювали на магнітометрі JR-6 у немагнітній кімнаті MMLFC Центру колективного

користування магнітометричними приладами Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Зразки розмагнічували змінним магнітним полем із кроком 2,5–20 мТл до 100–120 мТл та температурою з кроком 30–50 °C до 350 °C. Після кожного нагріву на містку змінного струму MFK1-FB вимірювали магнітну сприйнятливість для контролю можливих мінералогічних змін. Було виконано аналіз компонент природної залишкової намагніченості (natural remanent magnetization, NRM) та розраховано напрямки давнього магнітного поля за стандартними методиками.

Результати

Дані за 17 з 18 зразків, розмагнічених змінним магнітним полем у Варшавській лабораторії, узгоджуються з попередніми даними (Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) для всього інтервалу глибин. Один зразок із нижньозавадівського педокомплексу (R-S4, MIS 11) на глибині 34,11 м має другу стабільну компоненту (ChRM), що вказує на обернену полярність (рис. 2а). Напрямки характеристичної компоненти зразка-дубля із глибини 34,10 м, розмагніченого температурою, також тяжіють до оберненої полярності (рис. 2б). Зразки вище і нижче із нижньозавадівського горизонту вказують виключно на пряму полярність.

З огляду на положення екскурсу Unnamed віком 430 тис. років тому в нижньозавадівському горизонті в попередньо вивчених розрізах В'язівки і Меджибіж, можна припустити, що в розрізі Роксолани зона оберненої полярності також може бути віднесена до даного екскурсу, що підтверджується результатами розмагнічування двох зразків-дублів у різних лабораторіях різними методами. Проте в розрізах В'язівки і Меджибіж вказана зона оберненої полярності розташована в

нижній частині педокомплексу, на відміну від розрізу Роксолани, де зона оберненої полярності розташована на глибинах 34,10–34,11 м, дещо вище від середньої частини ґрунтового комплексу. За палеопедологічними даними (див. посилання в Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020) у розрізі Роксолани даний педокомплекс – у минулому добре розвинений, проте частково денудований, із зрізаним гумусовим горизонтом. У лесово-ґрунтовій формації Європи педокомплекс MIS 11 зазвичай добре розвинений і має удвічі більшу потужність, зокрема у сусідніх розрізах Санжійка і Курортне. У нашій інтерпретації, у розрізі Роксолани збереглася лише нижня частина нижньозавадівського педокомплексу, разом із палеомагнітним записом екскурсу, який доцільно віднести до Unnamed віком 430 тис. років тому за аналогією до інших розрізів України і Угорщини.

Отже, поряд із границею Матуяма–Брюнес, достовірно встановлені геомагнітні екскурси можна вважати перспективними маркерами при кореляції четвертинних субаеральних відкладів (рис. 1).

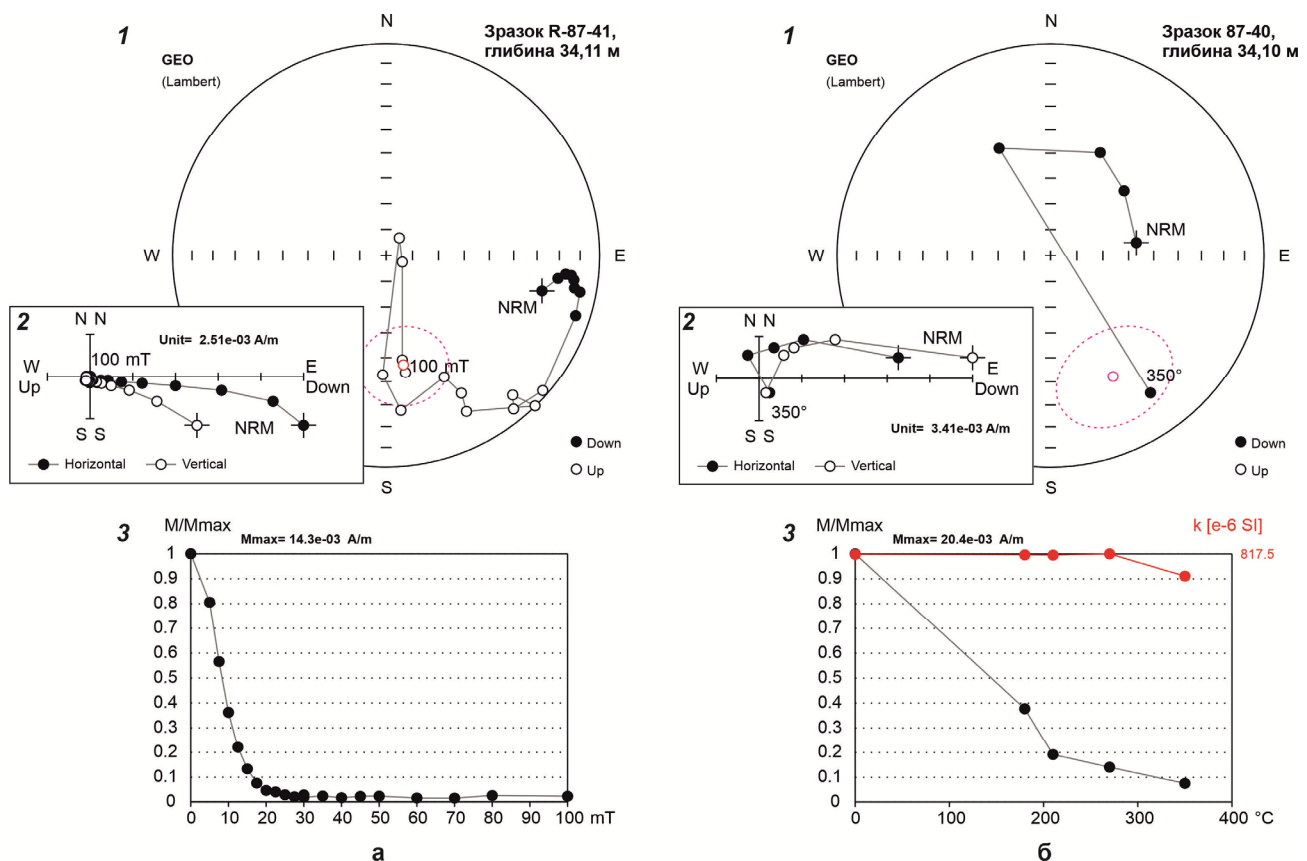


Рис. 2. Приклади ступеневого розмагнічування змінним магнітним полем (а) та температурою (б) зразків-дублів із нижньозавадівського ґрунту (горизонт R-S4 згідно розчленування Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020):

1 – стереографічні проекції напрямків природної залишкової намагніченості (NRM), пусті (залиті) точки – проекції векторів на верхню (нижню) півсферу у проекції Ламберта; 2 – діаграми Зйдервелда; 3 – криві розмагнічування NRM (M/M_{max}) та результати вимірів магнітної сприйнятливості (k) після нагрівів

Значення екскурсів для магнітостратиграфії.

Роль екскурсів як магнітостратиграфічних маркерів широко обговорюється в публікаціях останніх років. Зокрема, у (Laj, Channell, & Kissel, 2021) наголошується, що методи магнітостратиграфії у своєму розвитку пройшли шлях від планетарних масштабів змін геомагнітної полярності з часовими інтервалами порядку кількох сотень тисяч років до екскурсів, які дають змогу досягти роздільної здатності у кілька сотень років. Крім того, хоча

в деяких роботах (Большаков, 2007) встановлення екскурсів за даними VADM (virtual axial dipole moment) викликало справедливую критику, значне зниження напруженості геомагнітного поля під час екскурсів відкриває нові можливості для встановлення кореляційних зв'язків з іншими природними архівами, такими як керни льоду з Гренландії або Антарктиди (Laj, Channell, & Kissel, 2021). Під час зменшення напруженості поля збільшується потік космогенних ізотопів, таких як ^{10}Be ,

^{36}Cl і ^{14}C , що надходять на поверхню Землі після їх утворення у верхніх шарах атмосфери, та концентрація яких вимірюється в льодових кернях. Нарешті, ідентифікація профілів палеонапруженості в осадових товщах забезпечує досить точну кореляцію та відкриває новий етап магнітної стратиграфії високої роздільної здатності, який активно розвивається.

Зв'язок екскурсів зі змінами довкілля. Чи впливають екскурси геомагнітного поля на довкілля? Це питання напряму стосується теми зв'язку змін геомагнітного поля зі змінами клімату. Є як противники, так і прибічники існування такого зв'язку, а найбільше публікацій за цією тематикою присвячено події Lashamp. Швейцарські вчені виконали розрахунки стану атмосфери під час екскурсу з використанням глобальної хімічної кліматичної моделі SOCOL-MPIOM (Suter et al., 2014). Їхні розрахунки показали значне збільшення концентрації водню та оксиду азоту внаслідок посиленої іонізації галактичними космічними променями (ГКП), зміни концентрації озону, які є причиною значних зональних аномалій вітру, до 5 м/с у стратосфері та до 2 м/с у тропосфері, посилення циркулярних вихорів взимку. Це добре узгоджується з датованими з високою роздільною здатністю даними полярних льодових кернів та субтропічних спелеотем. Однак автори роблять висновок, що геомагнітні екскурси, швидше за все, не мають прямого і значного впливу на глобальний клімат.

Натомість Cooper et al. (2021), використовуючи ту ж саму глобальну хімічну кліматичну модель SOCOL-MPIOM для своїх розрахунків, роблять висновок про вплив події Lashamp, в поєднанні зі значними сонячними мінімумами, на істотні зміни в концентрації і циркуляції озону в атмосфері. Як вказувалося вище, екскурс Lashamp відбувався на фоні зниженої палеонапруженості геомагнітного поля. Автори (Cooper et al., 2021) вважають, що підвищений рівень сонячної та космічної радіації, яка досягає атмосфери Землі через ослаблене геомагнітне поле, ймовірно, збільшив іонізацію атмосфери та знизив рівень озону у стратосфері, потенційно спричинивши регіональні кліматичні зміни, прояви яких фіксуються в басейні Тихого океану. Це локальні льодовикові максимуми в Австралазії та Андах, засуха на всьому континенті та вимирання мегафауни в Австралії, які відбулися ~40–42 тис. років тому. У той самий період у Північній Америці спостерігалось швидке, виражене розширення Лаврентидського льодовикового щита від його мінімуму ~42 тис. років тому. Для встановлення хронологічної послідовності цих подій та їхнього ймовірного зв'язку з екскурсом Lashamp були залучені нові точні часові прив'язки, отримані завдяки дослідженням природного архіву – дерев каурі (*Agathis australis*) з північної частини Нової Зеландії (Cooper et al., 2021). Детальний радіовуглецевий аналіз залишків цих дерев у поєднанні з даними спелеотем печери Хулу, датованих за ^{230}Th методом, дав змогу виконати реконструкцію атмосферного ^{14}C під час екскурсу Laschamp. Було виявлено значні зміни концентрації атмосферного радіовуглецю до та під час Laschamp, що, як порівняти з палеомагнітними даними, дозволило встановити, що фаза оберненої полярності події Laschamp тривала від 41,56 до 41,05 тис. років тому. Запис Каурі-Хулу дав змогу зкорелювати подію зі змінами навколишнього середовища у планетарному масштабі. Було відзначено, що ~42 тис. років тому в середніх і низьких широтах

відбулися одночасні кліматичні та екологічні події (рис. 3). Це збіглося з ослабленим геомагнітним полем Землі, яке безпосередньо передувало екскурсу Laschamp, і загалом, Cooper et al., (2021) назвали цю подію "*Adams Transitional Geomagnetic Event*" (далі "Подія Адамса"). Низька напруженість геомагнітного поля під час "Події Адамса", разом із великими змінами інтенсивності космічного випромінювання, призвели до збільшення атмосферної іонізації та ультрафіолетового (УФ) випромінювання на до 25–40 % і 10–15 % порівняно із сучасним рівнем, особливо в екваторіальних і низьких широтах (<40°). Автори наголошують, що "Подія Адамса" дуже близька за часом до глобального поширення фігуративного наскельного мистецтва, відбитків рук з червоної охри у печерах, наприклад у Європі та на островах Південно-Східної Азії, яке датується ~40–42 тис. років тому. Вони інтерпретують це як використання печер як укриття від збільшення ультрафіолету В під час "Події Адамса". У цій же роботі перекалібрований час вимирання неандертальців становить від 40,9 до 40,5 тис. років тому, разом зі зникненням деяких перших європейських культур і подальшою широкою появою ориньського технічного комплексу. Також автори (Cooper et al., 2021) висловлюють припущення, що геомагнітний екскурс Mono Lake (34 тис. років тому) відзначається чітким піком ^{14}C у сталагміті печери Хулу і може бути причиною наступного вимирання мегафауни в Євразії. Загалом автори пропонують нову модель раптових палеокліматичних змін – через геомагнітні екскурси можуть змінюватися широтні температурні градієнти, оскільки відбувається різке збільшення космічної радіації та зниження концентрації озону. Вказано на можливий глобальний вплив геомагнітних інверсій з набагато віддаленішими у часі наслідками, оскільки інверсія відбувається набагато довше, ніж екскурс. В останні роки опубліковано багато робіт на цю тему, зокрема про низьку величину напруженості та гіперактивний (інверсійний) режим геомагнітного поля наприкінці едіакарії – початку кембрію, що гіпотетично пояснює феномен "кембрійського вибуху", коли швидко і майже одночасно на нашій планеті виникло безліч нових біологічних форм (див., наприклад, (Shcherbakova et al., 2020), і посилання в ній). Природно, що публікація такого матеріалу викликає підвищений інтерес та дискусію, зокрема у (Hawks, 2021 та посилання в ній) наведені аргументи, що заперечують вплив екскурсів геомагнітного поля на такі значні зміни довкілля.

За нашими дослідженнями нижньостратосферний озон відіграє важливу роль у можливому впливі геомагнітного поля на клімат. Механізм такого впливу являє собою ланцюг причинно-наслідкових зв'язків, який починається з модуляції потоків космічних променів геомагнітним полем. Далі частинки космічних променів впливають на концентрацію озону в нижній стратосфері, яка впливає на водяну пару на висотах нижньої стратосфери-верхньої тропосфери, які є надзвичайно чутливими до будь-яких змін вологості та мають вплив на радіаційний баланс планети, а отже і на приземну температуру (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020). Цей механізм оснований на даних прямих спостережень та емпіричних моделей для останніх 120 років, однак він дає найбільш реалістичне на сьогодні пояснення зв'язку геомагнітного поля і клімату.

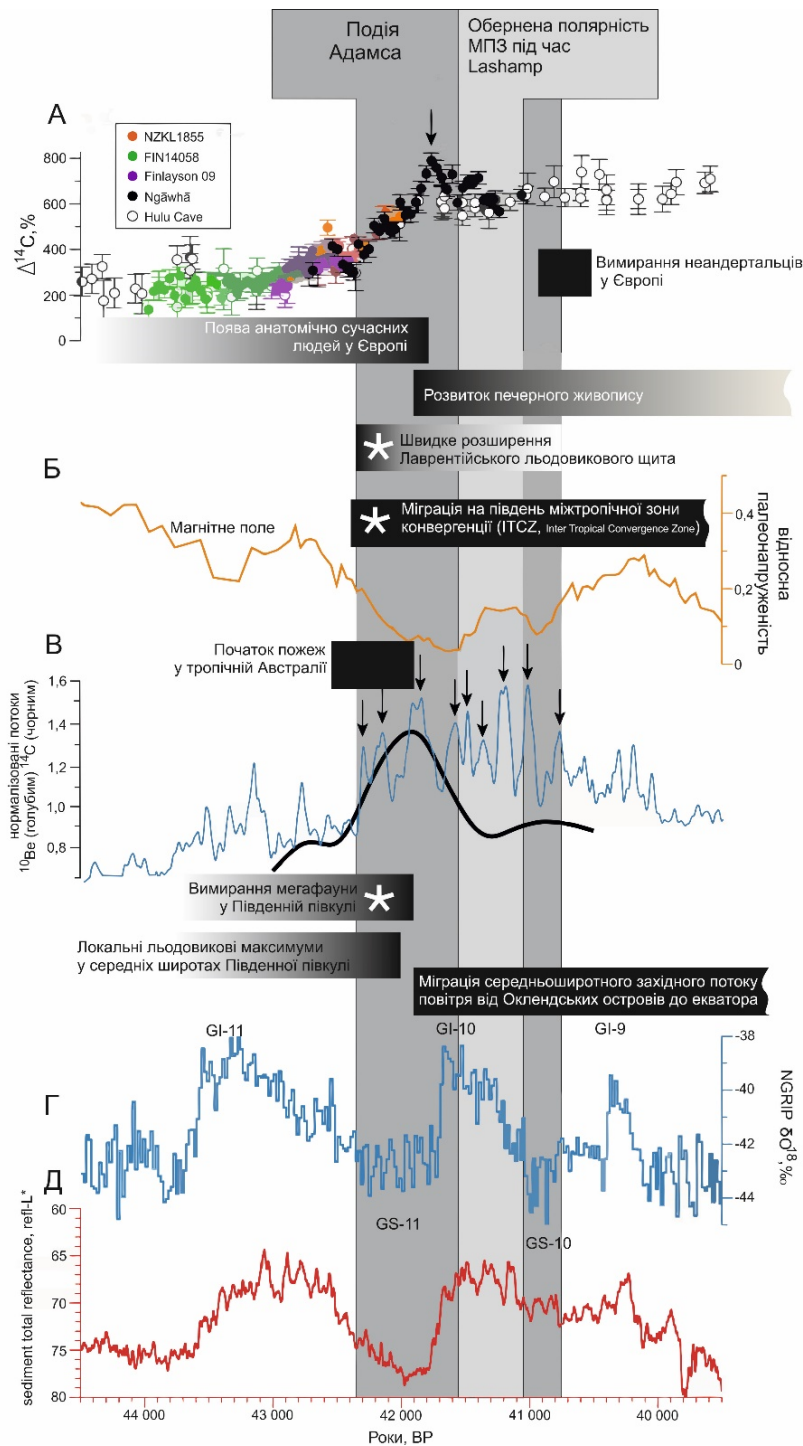


Рис. 3. Зміни клімату та навколишнього середовища під час "Події Адамса".

(А) Значення $\Delta^{14}\text{C}$ за даними по деревах каури (кольорові суцільні кружечки позначають окремі дерева) порівняно з даними радіовуглецевого аналізу з печери Хулу (порожні кружечки). Стрілка позначає пік $\Delta^{14}\text{C}$, який збігається з помітним GSM (Grand Solar Minima, тривалим періодом низької сонячної активності). (Б) Крива відносної палеонапруженості геомагнітного поля, побудована за даними відкладів Чорного моря та льодового керну з Гренландії. (В) Нормалізований потік ^{10}Be за даними з Гренландії (блакитна лінія) проти змодельованих темпів накопичення ^{14}C з набору даних каури-Хулу (товста чорна лінія). Посилені піки ^{10}Be під час ослабленого геомагнітного поля відповідають підвищенню іонізуючого випромінювання під час GSM (стрілки). (Г) Запис $\delta^{18}\text{O}$ за Проектом дослідження льоду Північної Гренландії (NGRIP). Показано Гренландські інтерстадіальні (потепління) події GI-11 та GI-9, а також слабку Гренландську стадіальну подію (GS-10), яка може вказувати на локальне різке похолодання, що перериває інтерстадіальну подію, яка спочатку складалася з GI-10 і GI-9. (Д) Вимірювання коефіцієнта повного відбиття осадів (sediment total reflectance, refl-L^*) в улоговині Кариак, який показує відсутність чіткого сигналу GS-10. Обернена полярність магнітного поля Землі (МПЗ) – світло-сірий стовпчик, фази переходу по боках – темно-сірі стовпчики, причому останні є найслабшими періодами магнітного поля Землі, які збігаються з GS-11 і GS-10. Зірочками показано події, які збігаються зі змінами геомагнітного поля під час Lashamp та проявляються в багатьох частинах світу (адаптовано з Cooper et al., 2021, Fig. 1, 4)

У (Channell, & Vigliotti, 2019) зазначено, що після покращення методів датувань та аналізу палеонтологічних знахідок, еволюційні події четвертинного періоду стали чіткіше обмеженими в часі. Довго вважалося, що на біологічну еволюцію впливає ультрафіолетове випромінювання, яке досягає поверхні Землі. На саме ультрафіолетове випромінювання може впливати величина дипольного магнітного поля Землі через свою роль у формуванні стратосферного озону (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020). Загибель неандертальців на рівні ~41 тис. років може бути зумовлена мінімумом напруженості геомагнітного поля як захисного екрана, що пов'язане з магнітним екскурсом Lashamp, а виживання анатомічно сучасних людей можна пояснити відмінностями в ариловому вуглеводневому рецепторі, який відіграє ключову роль в еволюційній реакції на потік ультрафіолету. Високі рештки з Австралії вказують на те, що пізні четвертинні вимирання мегафауни ссавців у часі співвідносяться з геомагнітними екскурсами Lashamp та Blake, а вік пізнього четвертинного вимирання в Північній Америці та Європі збігається зі значним зниженням напруженості геомагнітного поля на рівні ~13 тис. років.

Якщо вважати, що геомагнітне поле вплинуло на еволюцію великих ссавців-довгожителів через зміни ультрафіолетового випромінювання в періоди слабкої напруженості поля, то вогнища вимирань у різних регіонах можна пояснити геометрією руйнування стратосферного озону під час епізодів низької напруженості поля – озонові діри переважно розташовані у високих широтах, зважаючи на роль стратосферних температур і полярних стратосферних хмар у виснаженні озонового шару. Вимирання в Австралії під час екскурсів Lashamp і Blake може означати, що виснаження стратосферного озону в цей час відбувалося в основному в Південній півкулі, а в Північній півкулі вимирання пов'язане зі зниженням напруженості поля на ~13 тис. років (Channell, & Vigliotti, 2019).

У роботі (Orgeira, Sinoto, & Compuagnucci, 2016) зроблено огляд різних гіпотез про вплив змін сонячної активності та загального сонячного випромінювання (TSI), отриманих унаслідок змін земних орбітальних параметрів, та змін геомагнітного поля на клімат. Автори вважають, що такі зміни є важливими зовнішніми факторами кліматичної мінливості. На їхню думку, впродовж голоцену це сонячна та геомагнітна активність, для плейстоцену – зміни інсоляції, викликані змінами орбітальних параметрів, а також інверсії та екскурси геомагнітного поля. За (Orgeira, Sinoto, & Compuagnucci, 2016), механізм впливу геомагнітного поля пов'язаний з модуляцією потоків космічних променів, які, у свою чергу, можуть впливати на хмарний покрив.

Важливим кроком у розробці механізмів впливу екскурсів геомагнітного поля на клімат є робота (Gao et al., 2022), де розраховані глобальні сітки жорсткості геомагнітного обрізання (кількісної міри здатності геомагнітного поля екранувати Землю від космічного випромінювання). Автори роботи наголошують, що цей параметр вперше розрахований для екскурсу Lashamp на основі моделі геомагнітного поля LSMOD.2, що охоплює період 50–30 тис. років. Розрахунки виконані для середньої точки екскурсу, коли дипольний момент близький до нуля, і домінують недипольні компоненти. Визначено, що в цей час жорсткість обрізання є нижчою за 4 ГВ (жорсткість обрізання на 60° геомагнітної широти, вище від якої інтенсивність космічного випромінювання майже постійна і приблизно вдвічі вища, ніж на екваторі, де для сучасного геомагнітного поля ефект екранування є максимальним та зменшується зі збільшенням геомагнітної широти). Вона майже не залежить від широти, що

вказує на те, що космічне випромінювання під час екскурсу було глобально приблизно вдвічі більшим, ніж на сучасному геомагнітному екваторі. Результати обчислення граничної жорсткості, представлені в (Gao et al., 2022), дають змогу оцінити швидкість виробництва космогенних ізотопів на основі реалістичної моделі геомагнітного поля під час екскурсу Lashamp. Якість розрахунків обмежується як точністю самої моделі LSMOD.2, яка, базується на палеомагнітних даних з притаманними їм хронологічними похибками, та нерівномірним просторовим і часовим покриттям земної кулі, так і відсутністю реалістичної моделі палеомагнітосфери під час екскурсу.

Інші автори (Chen et al., 2015) припускають тісний зв'язок між геомагнітними інверсіями (як гіпотетичними індикаторами збільшення теплового потоку на границі ядро-мантія), змінами клімату та швидкістю субдукції у масштабах десятків мільйонів років. Вони порівнювали частоту геомагнітних інверсій і циклічність змін клімату за останні 73 млн років і виявили їхню спільну періодичність, яка становить 13 млн років. Вона порушується на кінцях досліджуваного інтервалу, оскільки найновіший та найдавніший часові інтервали лежать за межами конуса рівня довіри 95 % при розрахунках періодів. Таку саму періодичність було виявлено і для швидкості субдукції тектонічних плит, оскільки автори виходили з припущення, що геомагнітні інверсії та утворення морського дна можуть бути пов'язані. Вейвлет-спектр швидкості субдукції показав період ~13 млн років між 70 і 17 млн років тому, так само як для геомагнітних інверсій та записів $\delta^{18}\text{O}$, а отже, автори роблять висновок, що всі ці параметри пов'язані між собою. Зміна швидкості субдукції або випереджає, або відстає від інших двох параметрів. Автори (Chen et al., 2015) дають пояснення для обох випадків (у першому це пов'язано зі збільшенням теплового потоку на межі ядро-мантія, у другому – зі змінами галактичної орбіти Сонячної системи, проходження Землі крізь темну матерію в галактичній площині та нагрівання ядра), хоча ці пояснення складні та часом неоднозначні.

Дискусія і висновки

В останні роки у лесово-ґрунтовій формації України було встановлено ряд екскурсів, зокрема Unnamed (430 тис. років тому) та Big Lost (540 тис. років тому). Результати додаткових палеомагнітних досліджень лесово-ґрунтового розрізу Роксолани вказують на положення зони оберненої полярності у нижньозавдавіському кліматоліті (MIS 11), яка зіставляється нами з подією Unnamed віком 430 тис. років тому в розрізах В'язівки і Меджибіж. Відсутність деяких добре задокументованих глобальних екскурсів у верхньоплейстоценових лесово-ґрунтових відкладах спричинена неповнотою відбору зразків, стратиграфічними перервами осадиконакопичення, особливостями палеомагнітного "запису" та недостатньою вивченістю магнітної мінералогії цих порід.

Питання впливу інверсій та екскурсів геомагнітного поля на зміни довкілля лежить у площині пошуку достовірних механізмів такого впливу на різних часових шкалах. Запропонований у (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) механізм може пояснювати зв'язок змін геомагнітного поля та клімату, особливо з огляду на те, що багато дослідників підкреслюють роль атмосферного озону у змінах клімату та довкілля. Це питання є досить дискусійним, має як прибічників, так і опонентів та потребує подальших досліджень.

Внесок авторів: Володимир Бахмутов – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Галина Мельник – формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Главацький – методологія, валідація даних, написання (оригінальна чернетка); Євген Поляченко – формальний аналіз, методологія.

Подяка та джерела фінансування: Дослідження виконувалися за бюджетним асигнуванням відомчої фундаментальної тематики Національної академії наук України для наукової роботи "Магнетизм субаеральних відкладів антропогену України у вирішенні задачі стратиграфії, палеокліматології та екології" (шифр: III-5-24; № держ. реєстрації 0124U000085) та за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2020.02/0406 "Магнітні індикатори палеокліматичних змін у відкладах лесово-ґрунтової формації України".

Список використаних джерел

- Бахмутів, В., Мельник, Г., Главацький, Д., & Поляченко, Є. (2023). Екскурси геоманітного поля хроно Брунес. Ч. 1: Історичний огляд та сучасний стан досліджень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(103), 49–54.
- Бахмутів, В., & Главацький, Д. (2016). Проблеми магнітостратиграфії плейстоценових лесово-почвенних відкладів юга України. *Геофізический журнал*, 38(4), 59–74.
- Бахмутів, В. Г., Главацький, Д. В., Веклич, Ю. М., Шпыра, В. В., & Якухно, В. І. (2021). Граница Матуйама–Брунес в лесово-почвенном разрезе Долинское, южная Украина. *Геофізический журнал*, 43(5), 95–110.
- Большаков, В. А. (1995). Палеомагнитная запись геоманітних екскурсів і вторична намагніченість порід. *Фізика Землі*, 1, 66–70.
- Большаков, В. А. (2004). Определение климатостратиграфического положения инверсии Матуйама–Брунес в отложениях лёссово-почвенных формации как комплексная проблема наук о Земле. *Фізика Землі*, 12, 58–76.
- Большаков, В. А. (2007). Геоманітні екскурси – надійне средство кореляції геологічних відкладів? *Фізика Землі*, 9, 68–78.
- Главацький, Д. В., Степанчук, В. Н., Кузина, Д. М., Поляченко, Є. Б., Шпыра, В. В., Скарбовийчук, Т. В., Якухно, В. І., & Бахмутів, В. Г. (2021). Петромагнітні та палеомагнітні дослідження лесово-почвенних розрізів – стоянок нижнього палеоліта в долині Южного Буга (Меджибож, Головинці). *Геофізический журнал*, 43(1), 3–37.
- 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.
- 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), 65–86.
- Boguckiy, A. B., Łanczont, M., Łacka, B., Madeyska, T., & Nawrocki, J. (2009). Quaternary sediment sequence at Skala Podil'ska, Dniester River basin (Ukraine): Preliminary results of multi-proxy analyses. *Quaternary International*, 198, 173–194.
- Bolshakov, 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, 293–310.
- Bondar, K., & Ridush, B. (2015). Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International*, 357, 125–135.
- Channell, J. E. T., & Vigliotti, L. (2019). The role of geomagnetic field intensity in Late Quaternary evolution of humans and large mammals. *Reviews of Geophysics*, 57, 709–738.
- Chen, J., Kravchinsky, V. A., & Liu, X. (2015). The 13 million year Cenozoic pulse of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 256–263.
- Cooper, A., Turney, C. S. M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst, J., Lorrey, A. M., Heaton, T. J., Russell, J. M., McCracken, K., Anet, J. G., Rozanov, E., Friedel, M., Suter, I., Peter, T., Muscheler, R., Adolphi, F., Dosseto, A., Faith, J. T., Fenwick, P., Fogwill, C. J., Hughes, K., Lipson, M., Liu, J., Nowaczyk, N., Rainsley, E., Ramsey, C. B., Sebastianelli, P., Soulimi, Y., Stevenson, J., Thomas, Z., Tobler, R., & Zech, R. (2021). A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*, 371, 811–818. <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism*. Academic Press.
- Fang, X. M., Li, J. J., Van der Voo, R., MacNiocaill, C., Dai, R. X., Kemp, R. A., Derbyshire, E., Cao, J. X., Wang, J. M., & Wang, G. (1997). A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 73–82.
- Gao, J., Korte, M., Panovska, S., Rong, Z., & Wei, Y. (2022). Effects of the Laschamps excursion on geomagnetic cutoff rigidities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC010261.
- Hawkes, J. (2021). Comment on "A global environmental crisis 42,000 years ago". *Science*, 374(6570).
- Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchovskiy, 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. *Geophysical Journal*, 43(3), 3–26.
- 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, 43.
- Hlavatskyi, D. V. (2019). Refined magnetostratigraphic position of the Shyrokyne unit in loess sequences from Central Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geocology*, 28(2), 301–312.
- Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2019). Magnetostratigraphy of the key loess-palaeosol sequence at Roksolany (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.
- 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.
- 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, 411–454.
- Kilifarska, N. A., Bakhmutov, V. G., & Melnyk, G. V. (2020). *The hidden link between Earth's magnetic field and climate*. Elsevier.
- Laj, C., Channell, J. E. T., & Kissel, C. (2021). Magnetostratigraphy: From a Million to a Thousand Years. In Ramstein, G., Landais, A., Bouttes, N., Sepulchre, P., Govin, A. (eds). *Paleoclimatology*. Frontiers in Earth Sciences. Springer, Cham.
- Łanczont, M., Madeyska, T., Bogucki, A., Sytnyk, O., Kusiak, J., Frankowski, Z., Komar, M., Nawrocki, J., & Żogała, B. (2014). Stratigraphic position and natural environment of the oldest Middle Palaeolithic in central Podolia, Ukraine: New data from the Velykiy Glybochok site. *Quaternary International*, 326–327, 191–212.
- Łanczont, M., Madeyska, T., Sytnyk, O., Bogucki, A., Komar, M., Nawrocki, J., Holub, B., & Mroczek, P. (2015). Natural environment of MIS 5 and soil catena sequence along a loess slope in the Seret River valley: Evidence from the Pronyatyn Palaeolithic site (Ukraine). *Quaternary International*, 365, 74–97.
- Liu, Q., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess–paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139–167.
- Nawrocki, J., Bogucki, A., & Łanczont, M. (2007). Palaeomagnetic studies of the loess-palaeosol sequence from the Kolodiv section (East Carpathian Fore land, Ukraine). *Geological Quarterly*, 51(2), 161–166.
- Nawrocki, J., Bogucki, A., Łanczont, M., Werner, T., Standzikowski, K., & Pańczyk, M. (2018). The Hilina Pali palaeomagnetic excursion and possible self-reversal in the loess from western Ukraine. *Boreas*, 47, 954–966.
- Orgeira, M. J., Sinito, A. M., & Compagnucci, R. H. (2016). The Influence of the Geomagnetic Field in Climate Changes. In: Gasparini, G., Rabassa, J., Deschamps, C., Tonni, E. (eds). *Marine Isotope Stage 3 in Southern South America*, 60 KA B.P. – 30 KA B.P. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham.
- Shcherbakova, V. V., Bakhmutov, V. G., Thallner, D., Shcherbakov, V. P., Zhidkov, G. V., & Biggin, A. J. (2020). Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International*, 220(3), P.1928–1946.
- Snowball, I. (2018). Is the Hilina Pali 'palaeomagnetic excursion' becoming another example of the reinforcement syndrome? A comment inspired by Nawrocki et al. (2018). *Boreas*, 47, 967–968.
- Sümegi, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümegi, B. P., Almond, P. C., Vandenbergh, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Töröcsik, 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.
- Sun, Y. B., Qiang, X. K., Liu, Q. S., Bloemendal, J., & Wang, X. L. (2013). Timing and lock-in effect of the Laschamp geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 4952–4961.
- Suter, I., Zech, R., Anet, J. G., & Peter, T. (2014). Impact of geomagnetic excursions on atmospheric chemistry and dynamics. *Climate of the Past*, 10, 1183–1194.
- Zhu, R. X., Zhang, R., Deng, C. L., Pan, Y. X., Liu, Q. S., & Sun, Y. B. (2007). Are Chinese loess deposits essentially continuous? *Geophysical Research Letters*, 34(17).
- Zhu, R. X., Zhou, L. P., Laj, C., Mazaud, A., & Ding, Z. L. (1994). The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophysical Research Letters*, 21(8), 697–700.

References

- 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. <https://dx.doi.org/10.7306/gq.1705>.
- Bakhmutov, V., Melnyk, G., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Geomagnetic field excursions of the Brunhes chron. P. 1: a historical overview and current state of research. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(103), 49–54. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.103.05> [in Ukrainian].
- Bakhmutov, V. G., & Hlavatskyi, D. V. (2016). Problems of magnetostratigraphy of Pleistocene loess-soil deposits in the South of Ukraine. *Геофізический Журнал*, 38(4), 59–75. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107801> [in Russian].
- 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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 95–110. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244065> [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), 65–86. <https://doi.org/10.1134/S1069351317050020>.
- Boguckiy, A. B., Łanczont, M., Łacka, B., Madeyska, T., & Nawrocki, J. (2009). Quaternary sediment sequence at Skala Podil'ska, Dniester River basin (Ukraine): Preliminary results of multi-proxy analyses. *Quaternary International*, 198, 173–194. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.010>.
- Bolshakov, V. A. (1995). Paleomagnetic record of geomagnetic episodes and secondary magnetization of rocks. *Fizika Zemli*, 1, 66–70 [in Russian].
- Bolshakov, V. A. (2004). Determination of climate-stratigraphic position of Matuyama-Brunes inversion in loess formation sediments as a complex problem. *Fizika Zemli*, 12, 58–76 [in Russian].
- Bolshakov, V. A. (2007). Are geomagnetic episodes reliable for geological sediments correlation? *Fizika Zemli*, 9, 68–78 [in Russian].
- Bolshakov, 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, 293–310. <https://doi.org/10.1134/S1069351317020033>.
- Bondar, K., & Ridush, B. (2015). Rockmagnetic and palaeomagnetic studies of unconsolidated sediments of Bukovynka Cave (Chernivtsi region, Ukraine). *Quaternary International*, 357, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.025>.
- Channell, J. E. T., & Vigliotti, L. (2019). The role of geomagnetic field intensity in Late Quaternary evolution of humans and large mammals. *Reviews of Geophysics*, 57, 709–738. <https://doi.org/10.1029/2018RG000629>.
- Chen, J., Kravchinsky, V. A., & Liu, X. (2015). The 13 million year Cenozoic pulse of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 431, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.033>.
- Cooper, A., Turney, C. S. M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst, J., Lorrey, A. M., Heaton, T. J., Russell, J. M., McCracken, K., Anet, J. G., Rozanov, E., Friedel, M., Suter, I., Peter, T., Muscheler, R., Adolphi, F., Dosseto, A., Faith, J. T., Fenwick, P., Fogwill, C. J., Hughen, K., Lipson, M., Liu, J., Nowaczyk, N., Rainsley, E., Ramsey, C. B., Sebastianelli, P., Soulimi, Y., Stevenson, J., Thomas, Z., Tobler, R., & Zech, R. (2021). A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*, 371, 811–818. <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press.
- Fang, X. M., Li, J. J., Van der Voo, R., MacNiocall, C., Dai, R. X., Kemp, R. A., Derbyshire, E., Cao, J. X., Wang, J. M., & Wang, G. (1997). A record of the Blake event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 73–82. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(96\)00222-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00222-1).
- Gao, J., Korte, M., Panovska, S., Rong, Z., & Wei, Y. (2022). Effects of the Laschamps excursion on geomagnetic cutoff rigidities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC0010261. <https://doi.org/10.1029/2021GC0010261>.
- Hawks, J. (2021). Comment on "A global environmental crisis 42,000 years ago". *Science*, 374(6570). <https://doi.org/10.1126/science.abb1878eab1878>.
- 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. *Geophysical Journal*, 43(3), 3–26. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378>.
- 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, 43. <https://doi.org/10.3390/quaternary4040043>.
- Hlavatskyi, D., Stepanchuk, V., Kuzina, D., Poliachenko, I., Shpyra, V., Skarbiovychuk, T., Yakukhno, V., & Bakhmutov, V. (2021). Rock magnetic and palaeomagnetic studies of loess-palaeosol sections – Lower Palaeolithic sites within the Southern Bug Valley (Medzhybizh, Holovchyntsi). *Geophysical Journal*, 43(1), 3–37. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225539> [in Russian].
- 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 Roksolany (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://ggq.pgi.gov.pl/article/view/26160>.
- 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, 411–454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.022>.
- Kilifarska, N. A., Bakhmutov, V. G., & Melnyk, G. V. (2020). *The hidden link between Earth's magnetic field and climate*. Elsevier.
- Laj, C., Channell, J. E. T., & Kissel, C. (2021). *Magnetostratigraphy: From a Million to a Thousand Years*. In Ramstein, G., Landais, A., Bouttes, N., Sepulchre, P., Govin, A. (Eds.). *Paleoclimatology. Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3_7.
- Łanczont, M., Madeyska, T., Bogucki, A., Sytnyk, O., Kusiak, J., Frankowski, Z., Komar, M., Nawrocki, J., & Żogała, B. (2014). Stratigraphic position and natural environment of the oldest Middle Palaeolithic in central Podolia, Ukraine: New data from the Velykyi Glybochok site. *Quaternary International*, 326–327, 191–212. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.08.045>.
- Łanczont, M., Madeyska, T., Sytnyk, O., Bogucki, A., Komar, M., Nawrocki, J., Holub, B., & Mroczek, P. (2015). Natural environment of MIS 5 and soil catena sequence along a loess slope in the Seret River valley: Evidence from the Pronyatyn Palaeolithic site (Ukraine). *Quaternary International*, 365, 74–97. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.035>.
- Liu, Q., Hu, P., Jiang, Z., Ge, K., & Roberts, A. (2015). Magnetostratigraphy of Chinese loess–paleosol sequences. *Earth-Science Reviews*, 150, 139–167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.009>.
- Nawrocki, J., Bogucki, A., Łanczont, M., Werner, T., Standzikowski, K., & Pańczyk, M. (2018). The Hilina Pali palaeomagnetic excursion and possible self-reversal in the loess from western Ukraine. *Boreas*, 47, 954–966. <https://doi.org/10.1111/bor.12305>. ISSN 0300-9483
- Nawrocki, J., Bogucki, A., & Łanczont, M. (2007). Palaeomagnetic studies of the loess-palaeosol sequence from the Kolodiv section (East Carpathian Fore land, Ukraine). *Geological Quarterly*, 51(2), 161–166.
- Orgeira, M. J., Sinito, A. M., & Compagnucci, R. H. (2016). The Influence of the Geomagnetic Field in Climate Changes. In: Gasparini, G., Rabassa, J., Deschamps, C., Tonni, E. (eds). *Marine Isotope Stage 3 in Southern South America*, 60 KA B.P.–30 KA B.P. Springer Earth System Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40000-6_4.
- Shcherbakova V. V., Bakhmutov V. G., Thallner D., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., & Biggin A. J. (2020) Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International*. 220(3), 1928–1946. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz566>.
- Snowball, I. (2018). Is the Hilina Pali 'palaeomagnetic excursion' becoming another example of the reinforcement syndrome? A comment inspired by Nawrocki et al. (2018). *Boreas*, 47, 967–968. <https://doi.org/10.1111/bor.12329>.
- Sümegi, P., Gulyás, S., Molnár, D., Sümegi, B. P., Almond, P. C., Vandenberghe, J., Zhou, L., Pál-Molnár, E., Töröcsik, 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>.
- Sun, Y. B., Qiang, X. K., Liu, Q. S., Bloemendal, J., & Wang, X. L. (2013). Timing and lock-in effect of the Laschamps geomagnetic excursion in Chinese Loess. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 4952–4961. <https://doi.org/10.1002/2013GC004828>.
- Suter, I., Zech, R., Anet, J. G., & Peter, T. (2014). Impact of geomagnetic excursions on atmospheric chemistry and dynamics. *Climate of the Past*, 10, 1183–1194. <https://doi.org/10.5194/cp-10-1183-2014>.
- Zhu, R. X., Zhang, R., Deng, C. L., Pan, Y. X., Liu, Q. S., & Sun, Y. B. (2007). Are Chinese loess deposits essentially continuous? *Geophysical Research Letters*, 34(17). <https://doi.org/10.1029/2007GL030591>.
- Zhu, R. X., Zhou, L. P., Laj, C., Mazaud, A., & Ding, Z. L. (1994). The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. *Geophysical Research Letters*, 21(8), 697–700. <https://doi.org/10.1029/94GL00532>.

Отримано редакцією журналу / Received: 02.09.24
 Прорецензовано / Revised: 13.10.24
 Схвалено до друку / Accepted: 20.12.24

Volodymyr BAKHMUTOV¹, DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Galyna MELNYK¹, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Dmytro HLAVATSKYI¹, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Ievgen POLIACHENKO¹, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

¹Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GEOMAGNETIC FIELD EXCURSIONS OF THE BRUNHES CHRON. PART 2: MAGNETOSTRATIGRAPHY OF SUBAERIAL DEPOSITS AND IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Background. *The current state and problems in the study of the Brunhes chron geomagnetic excursions have been discussed in the part 1. In particular, Laschamp (41 thousand years ago), Blake (114 thousand years ago), Iceland Basin (188 thousand years ago) excursions are considered as the most reliable geomagnetic events. The second part of the article provides a detailed overview of the application of the Brunhes chron geomagnetic excursions in the correlation of subaerial deposits of the Pleistocene, in particular loess-palaeosol sequences of Ukraine and nearby European countries.*

Methods. *Studies of loess-palaeosol deposits were carried out by paleomagnetic and rock magnetic methods. The calculation of the characteristic component of magnetization was performed by statistical methods of spherical data.*

Results. *New results of the study of the Roksolany loess-soil section, which supplement the previous magnetostratigraphic scale, are presented. In the section, an excursion of reversed polarity at the level of the Lower Zavadivka pedocomplex (S4; correlative of MIS 11) has been revealed, which, in our interpretation, corresponds to the Unnamed event of 430 thousand years ago, described earlier in the Vyazivok and Medzhybizh loess sections. Recent studies of the impact of excursions on environmental changes, for instance, on palaeoecological and climatic changes during the Last Glacial Period, are discussed.*

Conclusions. *Unnamed (430,000 years ago) and Big Lost (540,000 years ago) excursions have been manifested in recent studies of the loess-palaeosol sequences of Ukraine. The absence of other well-documented excursions in Upper Pleistocene loess-soil deposits can be explained by sampling gaps, stratigraphic hiatuses in sediment accumulation, peculiarities of the paleomagnetic "records" and the insufficient study of the magnetic mineralogy of these deposits. The impact of geomagnetic field inversions and excursions on environmental changes is a debatable issue that requires further research, especially in terms of mechanisms of such effects. Since many researchers emphasize the role of atmospheric ozone in climate and environmental changes, the mechanism proposed in (Kilifarska, Bakhmutov, & Melnyk, 2020) may explain the relationship of geomagnetic field and climate changes.*

Keywords: *geomagnetic field inversions and reversals, magnetostratigraphy, loess-palaeosol sequences, environmental changes, Pleistocene.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.