

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.838.5+551.79

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.05>

Володимир БАХМУТОВ¹, д-р геол. наук, проф.
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

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

ЕКСКУРСИ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ХРОНУ БРЮНЕС ЧАСТИНА 1: ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ

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

Застосування палеомагнітного методу у стратиграфії базується на встановленому факті як глобальних змін полярності геомагнітного поля (інверсій), так і на існуванні короткочасних (до 10 тисяч років) відхилень віртуального геомагнітного полюса від свого положення (еккурсів), що іноді відбуваються тільки в регіональному масштабі. Експурси як магнітостратиграфічні репери є потужним інструментом для кореляції четвертинних відкладів. У 1960–1990 рр. їм приділяли особливу увагу як важливим кореляційним маркерам під час побудови регіональних хроностратиграфічних шкал антропогену. Проте кількість еккурсів хрону Брюнес, їхнє стратиграфічне положення та вікова прив'язка досі залишалися суперечливими. За останні роки опубліковано багато праць з уточненням природи, віку і тривалості еккурсів у різних відкладах. У першій частині статті наведено детальний огляд еккурсів епохи Брюнес, розглянуто сучасний стан проблеми визначення їхньої достовірності.

Ключові слова: інверсії та експурси геомагнітного поля, магнітостратиграфія.

Часова шкала геомагнітної полярності. Вже більше ніж півстоліття палеомагнітні дослідження широко застосовуються для розв'язання ключових проблем геології, зокрема в галузях тектоніки та стратиграфії. Використання палеомагнітного методу у стратиграфії базується на тому фундаментальному факті, що під час геологічної історії магнітне поле Землі (МПЗ) багаторазово змінювало свою полярність, тобто відбувалися інверсії МПЗ. Вони фіксуються в "магнітній пам'яті" гірських порід унаслідок зміни орієнтації векторів природної залишкової намагніченості порід, коли остання синхронна з часом утворення відповідних товщ геологічного розрізу. Внаслідок багаторазових інверсій МПЗ розрізи осадових і вулканогенних товщ можна розчленувати на зони прямої та зворотної полярності. Такі записи змін полярності МПЗ у гірських породах (осадових та/або вулканічних) вивчає *магнітостратиграфія*. Магнітостратиграфічна шкала є бінарною шкалою магнітної полярності, що включає інверсії та магнітозони у їхній хронологічній (стратиграфічній) послідовності (рис. 1). Оскільки інверсія МПЗ явище глобальне, то виділені в розрізі палеомагнітні "маркери", з урахуванням їхньої комплексної вікової прив'язки, є фіксованими реперами для кореляції подій геологічної історії як у планетарному, так і в регіональному масштабі. Показовою у цьому відношенні є стратиграфічна прив'язка границі Матуяма–Брюнес – ключового палеомагнітного репера між середнім плейстоценом і калабрійським ярусом нижнього плейстоцену. Ідентифікація інверсії Матуяма–Брюнес дає змогу корелювати розрізи на всій земній поверхні незалежно від наявних стратиграфічних схем. Вік цієї границі оцінювався близько 780 тис. років тому (Tauxe et al.,

1996), але в останні роки, за новими дослідженнями лавових потоків (Singer et al., 2019), даними аналізу $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ (Simon et al., 2019), а також дослідженнями кореляції $\delta^{18}\text{O}$ у морських кернах з високою швидкістю седиментації (Channel et al., 2020 та посилання в ній) вік границі Матуяма–Брюнес встановлено як 773 ± 2 тис. років тому.

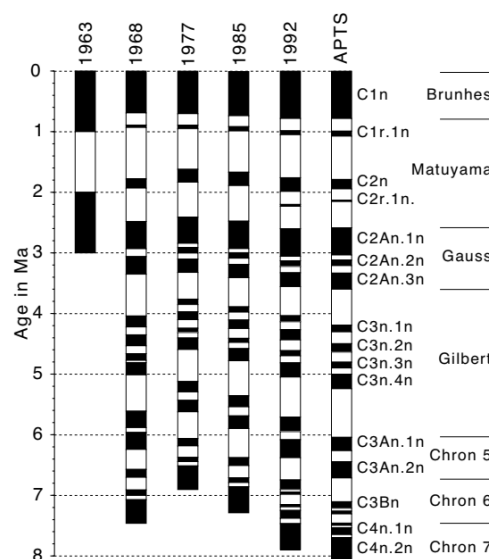


Рис. 1. Етапи створення часової шкали геомагнітної полярності (GPTS geomagnetic polarity time scale) за останні півстоліття. Шкала часу астрономічної полярності (APTS astronomical polarity time scale) (Langereis et al., 2010)

© Бахмутов Володимир, Мельник Галина, Главацький Дмитро, Поляченко Євген, 2023

Сьогодні, більш ніж через століття від часу відкриття інверсій геомагнітного поля у 1905 р. французьким ученим Бернардом Брюнесом (Bernard Brunhes) та наступним їх підтвердженням Мотонорі Матуєюмо наприкінці 1920-х років (див., наприклад, Kornprobst, & Lénat, 2014 та посилання в ній), та через півстоліття після створення першої часової шкали геомагнітної полярності, можна констатувати, що магнітостратиграфія є незамінним інструментом в науках про Землю, у тому числі зважаючи на успіхи в її астрономічному калібруванні (Langereis et al., 2010 та посилання в ній). Розвиток уявлень про шкалу геомагнітної полярності показано на рис. 1.

Дискусії щодо тривалості інверсій геомагнітного поля сьогодні продовжуються, вона оцінюється від кількох тисяч до 28000 років. Тривалість може змінюватися залежно від широти місця визначення: найбільша для високих широт, найменша для низьких, і за розрахунками становить у середньому 7000 (Clement, 2004), або менш як 5000 років (Ogg, 2020). Тобто у геологічних масштабах часу це досить швидкий процес, а отже палеомагнітний метод може застосовуватися для глобальної кореляції практично всіх порід різного віку.

Найкоротші інтервали полярності в GPTS зазвичай мають тривалість близько 30 тис. років, однак існують і варіації меншого масштабу (Langereis et al., 2010). Саме до таких короткочасних подій належать *субхрони* та *екскурси* (палеомагнітні аномалії). Krijgsman and Kent (2004) запропонували тривалість розділення субхронів та екскурсів на рівні 9–15 тис. років, однак можливість такого розділення обмежується точністю методів виявлення таких подій. Слід зазначити, що в деяких публікаціях субхрони та екурси окремо не розділяються, і тоді більш доцільно використовувати термін "геомагнітний епізод".

Альтернативним є визначення екскурсів за короткотривалим ($<10^4$ років) відхиленням віртуального геомагнітного полюса (ВГП, VGP) від геоцентричного осевого диполя. Палеомагнітну аномалію відносять до екскурсу коли ВГП, розрахований за напрямком поля в даній місцевості, відхиляється більш ніж на 45° (за іншими оцінками – на $60\text{--}180^\circ$) від свого усередненого за часом положення для цієї епохи, що не пов'язане зі зміною полярності (Merrill et al., 1996). Відповідно до (Петрова и др., 1992), екскурс – це короткочасна зміна геомагнітного поля, амплітуда якого не менше ніж у три рази перевищує рівень вікових варіацій для даного проміжку часу, а зміна полярності, якщо відбувається, не стійка. У (Laj, & Channell, 2007) запропоновано для подій тривалістю менш ніж 10^5 років, під час яких фіксується зміна полярності, використовувати термін "мікротрон", тоді термін "екскурс" буде використовуватися лише для особливостей, які представляють відхилення від нормальної вікової варіації, для яких повна зміна полярності не була встановлена. У своїй роботі для позначення подій у хроні Брюнес ми будемо використовувати термін "екскурси" за визначенням (Петрова и др., 1992).

Створення єдиної номенклатури послідовності інтервалів полярності, особливо тієї, яка включає короткочасні події, є складною проблемою. З находженням нового фактичного матеріалу, при виявленні нових епізодів зміни полярності, останні можуть проявлятися як глобально, так і тільки в межах окремих регіонів (див., наприклад, Langereis et al., 2010). У роботі (Laj, & Channell, 2007) запропоновано номенклатуру для інтервалів полярності та екскурсів, зокрема, у часовому еквіваленті, за тривалістю, події називають: мегахрон – 108–109 років, суперхрон – 107–108 років, хрон – 106–107 років, субхрон – 105–106 років, мікрохрон – <105 років,

екскурс або екскурсія – коротке відхилення від звичайної вікової варіації, криптохрон (cryptochron) – "крихітні ворухіння" (tiny wiggles, тобто дуже короткі та низькоінтенсивні аномалії невизначеного походження, які є або короткочасними інтервалами оберненої полярності, або коливаннями палеоінтенсивності (Langereis et al., 2010; Laj, & Channell, 2007). Самі ж автори наголошують, що застосування такої термінології, основаної на тривалості, досить проблематичне, особливо для короткочасних подій, оскільки їхня тривалість перебуває на межі точності методів датування. Номенклатура інтервалів полярності геомагнітного поля, згідно з уявленнями 70–80-х років минулого сторіччя, розглянута в (Третьак и др., 1989).

Зміни стосуються головного магнітного поля, яке є суперпозицією поля осевого ексцентричного диполя, недипольного поля та поля світових магнітних аномалій. Під час геомагнітних інверсій відбувається зменшення дипольного поля аж до повного зникнення, зміни знаку та поступового наступного наростання. У цей час зростає роль недипольної компоненти. Під час екскурсів дипольне поле зникає не завжди, може відбуватися зменшення його інтенсивності (напруженості) та відхилення від основного напрямку, а якщо і відбувається зміна напрямку, то вона короткочасна. Такі припущення використовуються для моделювання геомагнітного поля під час інверсій та екскурсів, оскільки їхні механізми досі не встановлені. Відповідно до теорії геодинамо магнітне поле Землі створюється у зовнішньому ядрі нашої планети внаслідок руху електропровідної рідини зовнішнього ядра, який підтримується конвекцією та силою Коріоліса, пов'язаною з обертанням Землі. Про стан геодинамо можна отримувати інформацію тільки за спостереженнями магнітного поля на поверхні Землі за допомогою прямих і непрямих методів. Тому для відтворення складної й хаотичної динаміки зовнішнього ядра використовують чисельні та експериментальні моделі (див., наприклад, Molina-Cardin et al., 2021 та посилання в ній). Однак пошук механізму інверсій та екскурсів ще далекий від завершення. Так само частота, амплітуда, тривалість та поведінка поля під час екскурсів є ключовими питаннями досліджень фізики твердої Землі (Roberts, 2008).

Екскурси фіксуються в основному в морських глибоководних осадах і в озерних відкладах, проте наявні також "записи" в лавових потоках, субаеральних відкладах і на деяких археологічних об'єктах. Визначення екскурсів у геологічних записах гірських порід є досить непростою задачею, тому існує розбіжність у встановленні їхньої кількості для окремих епох. Раніше, у 1960–1990 рр. екскурсам хрону Брюнес приділяли увагу як важливим кореляційним маркерам при побудові регіональних хроностратиграфічних шкал антропогену. Проте їхня кількість, стратиграфічне положення та вікова прив'язка залишалися суперечливими. За останні роки вийшов ряд різноманітних праць з уточненням природи, віку і тривалості екскурсів у різних типах відкладів, зокрема, у субаеральних відкладах антропогену, їхній вплив на кліматичні зміни та довкілля (зокрема, на середовище проживання давніх людей), – ці роботи потребували синхронізації та узагальнення. Тому у цій статті ми наводимо детальний огляд проблеми екскурсів хрону (епохи) Брюнес як геомагнітних реперів для кореляції четвертинних відкладів.

Кількість екскурсів у хроні Брюнес. Встановлення кількості екскурсів у хроні Брюнес упродовж останніх кількох десятиліть було однією з найбільш дискусійних проблем магнітостратиграфії. Зі зростанням кількості палеомагнітних визначень деякі встановлені раніше

палеомагнітні аномалії отримували нові підтвердження, деякі все ще залишаються дискусійними, а від деяких довелося відмовитись.

У табл. 1 представлено уявлення про кількість екскурсів для хрону Брюнес за деякими оглядовими роботами за останні чотири десятиліття.

Таблиця 1

Сучасні уявлення про структуру геомагнітної епохи Брюнес

Геомагнітний епізод за (Champion et al., 1988), вік (тис. років тому)	Геомагнітний епізод за (Langereis et al., 1997), вік (тис. років тому)	Геомагнітний епізод за (Поспелова, 2004), вік (тис. років тому)	Геомагнітний епізод за (Ogg, 2020), вік (тис. років тому)
		Етрусія (2.8)	
		Соловки (6.0)	
			Tianchi (10)
		Гетенбург (13)	
			Hilina Pali? (17)
			Rockall (26)
			Mono Lake (32)
LASCHAMP (40–45)	Laschamp (40-45)	Каргаполово (45)	Laschamp (41)
	Norwegian-Greenland Sea (70–80)	Хаджимус (80)	
			Skalamaelifell (95)
			Post-Blake (104)
BLAKE (110–120)	Blake (110-120)	Блейк (128)	Blake (114)
Laguna Datong	Albuquerque/Fram Strait (155–165)		
			Iceland Basin (188)
JAMAICA (180)	Jamaica/Pringle Falls (205–215)	Ямайка (180)	Pringle Falls? (212)
Biwa I		Біва I (220)	
Albuquerque			
Old Crow			
	Fram Strait/CRO? (255–265)	Дніпро (270)	
Levantine (280–290)	Calabrian Ridge 1 (315–325)		Portuguese Orphan (286)
Biwa II, Alpha, Saala-Dnieper	Levantine (360–370)	Біва II (300)	
Chegan, Paoha, Summer Lake			
BIWA III (380–390)		Біва III (370)	
Beta, Kikhvin		Н. Коропець (410)	Bermuda (412)
Kasuri			
Emperior (450–460)	Unknown? (400–420)	Єлуніно-V, Емперор (460)	
			Orphan Knoll (495)
Elster II – Dainav	Calabrian Ridge 2 / West Eifel (515–525)		
			Big Lost (540)
BIG LOST (560–570)	Emperor/Big Lost/Cr3 (560–570)	Єлуніно-VI (560)	West Eifel suite (560)
			La Palma (580)
Gamma		Єлуніно-VII, Уреки-VII (620)	
Humboldt River			
Delta (640)			
			Osaka Bay (680)
Lishi		Єлуніно-VIII (710)	
Границя Матуяма-Брюнес (778)		773±2	

Примітка: Екскурси, які автори (Langereis et al., 1997) вважають надійно датованими і глобальними, виділено жирним шрифтом; прописними літерами в (Champion et al., 1988) наведено бажані назви найбільш достовірно встановлених подій; жирним шрифтом в колонці з даними (Поспелова, 2004) показано найбільш надійно встановлені екскурси глобального масштабу; в колонці (Ogg, 2020) жирним шрифтом виділено (на думку авторів) найбільш достовірно встановлені екскурси, знаком питання відмічено менш надійно встановлені події.

Більшість екскурсів, наведених у колонці 4 табл. 1 (крім Hilina Pali? та West Eifel suite) описані у роботі (Channell et al., 2020). Автори зазначають, що, хоча мінімуми палеонапруженості корелюють з аномаліями по кутових компонентах, вони не обов'язково означають екскурс та не повинні використовуватися для його визначення, так само як співвідношення $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ у відкладах або ізотопи ^{36}Cl і ^{10}Be у кернах льоду. Вони є важливими джерелами інформації про мінімуми напруженості геомагнітного поля у минулому, однак самі по собі не свідчать про наявність у той самий час магнітних екскурсів.

Разом з тим у роботі (Langereis et al., 2010) зазначено, що екскурси, під час яких відбувається повна зміна напруженості поля, обов'язково супроводжуються зменшенням його напруженості, яке починається перед самим екскурсом. У роботі (Channell et al., 2020) проаналізовано наявні дані щодо встановлення віку екскурсів за аномальними напрямками та низькою напруженістю головного геомагнітного поля (VADM) із залученням інших даних – ізотопних визначень віку морських відкладів $d^{18}\text{O}$, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ та ін. Це частково вирішує завдання, окреслені у (Roberts, 2008), щодо збільшення даних про глобальний

розподіл записів екскурсів, особливо з Південної півкулі, отримання записів з високою роздільною здатністю в осадових породах зі швидкістю осадонакопичення >10 см/тис. років та з надійними віковими прив'язками, а також записів екскурсів у вулканічних породах.

Експедиції з часів останнього льодовикового максимуму. Проблемним питанням є визначення кількості екскурсів в інтервалі 0–30 тис. років тому, що не може не викликати здивування – адже це новітній етап геологічної історії. Отримано багато даних, що у цьому часовому інтервалі було кілька палеомагнітних аномалій, які можна інтерпретувати як екскурси: *Sterno-Etrussia* ~2,7 тис. років, *Göthenburg* ~ 12 тис. років, *Lake Mungo* ~26 тис. років, *Hilina Pali* ~19 тис. років, *MD01-2444* з Іберійського узбережжя (*Iberian Margin*) на ~13 тис. років, *Tianchi* 10 тис. років, *Rockall* на ~26 тис. років (*Channell et al.*, 2020, та посилання в ній).

Експурс *Sterno-Etrussia* проаналізований у (*Dergachev et al.*, 2004), де автори вважають його однією з можливих причин похолодання ~2700 р. до н. е. у результаті модулювання геомагнітним полем космічного випромінювання. За різними результатами датування цей експурс відбувся в інтервалі часу 2800–2200 р. до н. е. Археологічні матеріали вказують на 8–4 століття до н. е. Під час експурсу відбулося одне (або два) різке зміщення віртуального геомагнітного полюса в бік екватора та його перехід в Південну півкулю. Тривалість цієї події була досить короткою, близько 100–200 років. У роботі (*Распопов и др.*, 2010) прояви цього експурсу зафіксовані у 17 місцях (Євразія, Аляска), але дані про нього у Південній півкулі, так само як і у Західній, відсутні.

На сьогодні не викликає сумніву, що в основі виділення деяких екскурсів були некондиційні палеомагнітні дані (*Бахмутов*, 2006). Показовою є історія з експурсом Гетеборг (*Göthenburg*), виявленим у 70-х роках у пізньольодовикових стрічкових глинах Швеції. Після появи першої публікації (*Mörner et al.*, 1971) протягом наступних років з'явилися десятки робіт, де вказувалося на виявлення цього експурсу у різних районах Землі. У Північній Америці його аналог був відомий як експурс *Epi* (*Creer et al.*, 1976). Багато його визначень було зроблено в межах Євразійського континенту, переважно завдяки дослідженням радянської школи палеомагнітологів (*Петрова и др.*, 1992). Ймовірно, тут відіграв роль так званий ефект підкріплення (*reinforcement syndrome*) (*Thompson, & Berglung*, 1976; *Snowball*, 2018), коли бажання "відкриття" довгоочікуваного магнітостратиграфічного маркера вплинуло на об'єктивність подальшого його "визначення" у пізньоплейстоценових породах різного генезису. Але вже на початковому етапі дослідження цього феномену вчені почали стикатися з наступними проблемами:

1. Оскільки експурс Гетеборг було зафіксовано в різних регіонах земної кулі, він є подією планетарного масштабу і його вік повинен визначатися у межах похибки датування. Однак його вік оцінювався в діапазоні від 7000 до 18700 років тому, і напевно чи такий розкид можна було пояснити лише похибками датування. Більшість дослідників оцінювали його вік у межах 13–11 тис. років тому.

2. Зміни геомагнітного поля під час цього експурсу у різних палеомагнітних "записах" проявлялися по-різному. В одних випадках це був епізод зворотної полярності тривалістю до 2000 років, в інших його тривалість оцінювалась сотнями й навіть десятками років, іноді він інтерпретувався як високоамплітудна флуктуація однієї з компонент поля. Передбачалося, що цей експурс може

бути пов'язаний із недипольним джерелом геомагнітного поля та, відповідно, є подією регіонального масштабу.

3. Було отримано численний фактичний матеріал із цього ж часового інтервалу, який не підтверджував його прояву як геофізичного феномену і вказував виключно на процеси седиментогенезу, внаслідок яких спотворювався палеомагнітний запис. Аналізуючи такі випадки та виконавши палеомагнітні дослідження пізньольодовикових стрічкових глин, у яких цей експурс було вперше виявлено, автори роботи (*Thompson, & Berglung*, 1976) дійшли висновку про його відсутність на території Швеції. Критичний огляд публікацій того часу по наймолодших експурсах наведено в (*Verosub*, 1982).

У результаті на початок 90-х років науковці згадували про експурс Гетеборг тільки як про прикрий помилку, але більшість представників палеомагнітної школи колишнього Радянського Союзу були іншої думки та вважали його магнітостратиграфічним маркером (*Petrova, & Pospelova*, 1990; *Петрова и др.*, 1992). Але питання щодо цього експурсу досі не вирішене, про що свідчать нещодавні роботи. За аналізом керна з озера Палео-Даньян на сході Китаю було ідентифіковано геомагнітний експурс *Göthenburg* на глибині 6,5–7,2 м віком 12494–13081 років (*Chen et al.*, 2020). Автори зазначають, що цей експурс добре фіксується у Східній Азії, у місцях, які зазнали безперервної седиментації з високою швидкістю осадонакопичення на межі плейстоцену-голоцену, а причиною відсутності його запису у відкладах вважають низьку швидкість осадонакопичення та перерви, пов'язані з ерозією. У роботі (*Nami et al.*, 2020) йдеться про помітні коливання нахилу протягом раннього голоцену на рівні $\geq 9,5$ тис. років тому і після ~12,0/13,0 тис. років тому під час палеомагнітних досліджень зразків із печери *Rose Cottage* в Південній Африці, а також вказується на відхилення палеомагнітних напрямків від звичайних у районі 10–13 тис. років тому, тобто на межі плейстоцену-голоцену, в Екваторі (*Nami*, 2015). Аномальні напрямки на рівні ~13 тис. років тому були зафіксовані у кернах з дна Іберійського узбережжя, а також біля Антарктичного півострова (див. посилання в *Channell et al.*, 2020). У межах похибки визначень віку таких відхилень перебуває й експурс *Tianchi* (10 тис. років тому), зафіксований у лавах однойменного вулкана на північному сході Китаю (див. посилання в *Channell et al.*, 2020). Також у лавах на Гавайях було зафіксовано низьку величину геомагнітного поля близько 17 тис. років тому (*Hilina Pali*). Низька палеонапруженість була зафіксована у лавах з вулкана *Changbaishan* у північно-східному Китаї, одна зі спроб встановлення віку якої показала близько 17 тис. років тому, однак ці визначення не вважаються достатньо точними (*Singer et al.*, 2014). У лесовій товщі на покинутих цегельнях у м. Рівному у двох зразках з лесів віком 18 тис. років тому з різних розрізів було виявлено намагніченість зворотної полярності. Автори (*Nawrocki et al.*, 2018) припускають, що це перший прояв експурсу *Hilina Pali*, задокументований у лесах. Попередні припущення про відповідність знайдених аномальних напрямків у зразках відкладів з острова Чеджу, Корея, вік яких близько 17 тис. років тому, висловлено в роботі (*Ahn et al.*, 2018). Ці аномальні напрямки автори співвідносять з експурсами *Tianchi* та *Hilina Pali*, зазначаючи, що це потребує подальших досліджень.

Віртуальні геомагнітні полюси, розраховані за даними з кернів донних відкладів Чорного моря, розташовуються вище 60° пн. ш., що вказує на нормальну полярність, але на високоамплітудну вікову варіацію під час "очікуваного" експурсу *Hilina Pali* (*Liu et al.*, 2018).

ВГП мігрували за годинниковою стрілкою лише вздовж узбережжя Північного Льодовитого океану від Північної Канади (20,0 тис. років) через Аляску (18,6 тис. років) і Північно-Східний Сибір (18,0 тис. років) до Шпіцбергену (17,0 тис. років), потім, петляючи за годинниковою стрілкою, дрейфували через схід Північного Льодовитого океану. Так само не спостерігається дрейф ВГП до широти 45° за даними лав з Хіліна Палі, осадових порід у південній Європі та Північній Америці, що свідчить, що цей еккурс не знайшов свого підтвердження за більшістю доступних палеомагнітних даних (Liu et al., 2018).

У керні MD04-2822 з жолоба Rockall у Північній Атлантиці виявлено однойменний еккурс, що фіксується близьким до оберненої полярності напрямком намагніченості на фоні мінімуму відносної палеонапруженості, який можна співвіднести з мінімумом напруженості геомагнітного поля, отриманим за потоками космогенних ізотопів з кернів льодовиків Гренландії (Channell et al., 2016). Вік еккурсу оцінюється у 26,5 тис. років тому, а його тривалість близько 350 років. Але, на думку самих авторів (Channell et al., 2016), його "виявлення" вносить ще більше плутанини щодо еккурсів у часовому інтервалі 0–30 тис. років тому.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що всі описані вище палеомагнітні аномалії не можна вважати достовірно встановленими. Як підкреслюється в (Snowball, 2018), глобальне значення еккурсу має базуватися на кількох наборах палеомагнітних даних, кожен з яких є безперервним і точно датованим (в ідеалі двома незалежними методами, які забезпечують подібні співвідношення між віком і глибиною). Можливо, наведені вище еккурси й мали місце, однак тут важливо не піддаватися "синдрому підкріплення", тобто оцінювати отриману інформацію об'єктивно. Тому на сьогодні вважається, що встановлення еккурсів у часовому проміжку 0–30 тис. років тому є проблемою, яка все ще далека від свого вирішення.

Еккурси останнього міжльодовиков'я та останнього льодовикового періоду. Еккурс Mono Lake (32 тис. років тому), вперше був зафіксований у донних відкладах озера Mono, східна Каліфорнія (Denham, & Cox, 1971; Liddicoat, & Coe, 1979), але його вікова прив'язка не була достатньо надійною. Пізніше палеомагнітну аномалію з незначними розбіжностями щодо віку зафіксували й в інших озерних відкладах у Каліфорнії, Орегоні та Неваді, в осадових породах біля східної Гренландії, у вулканічних породах Тенерифе та Нової Зеландії (Channell et al., 2020 та посилання в ній). Автори (Channell et al., 2020) вважають, що нечисленні й випадкові записи цього еккурсу в осадових і вулканічних архівах, а також за даними по космогенним ізотопам пояснюються його дуже короткою тривалістю – близько 100 років. Під час палеомагнітних досліджень кернів донних відкладів Чорного моря було виявлено мінімум відносної палеонапруженості та аномальні напрямки геомагнітного поля близько 34,5 тис. років тому, що вважається підтвердженням еккурсу Mono Lake, тоді як у молодших чорноморських відкладах зафіксовані лише відхилення на рівні вікової варіації (Liu et al., 2019). Аномалії схилання та нахилання у керні із затоки Девао (Філіппінські острови) хоч і відрізняються на $>2\sigma$ від середніх величин, однак не досягають "еккурсійних" значень. Їхній вік ~34,5 тис. років, і автори (Lund et al., 2017) пов'язують їх з еккурсом Mono Lake.

На сьогодні найкраще задокументованим вважається еккурс Laschamp віком 41 тис. років тому (Ogg, 2020). Вперше він був зафіксований у 1967 у лавових потоках Puy de Laschamp, Massif Central, Франція

(Bonhommet, & Babkine, 1967) і датований за піками ^{10}Be в льодових кернах Гренландії та спелеотемах Міссурі (огляд у Laj, & Channell, 2007). Отримано багато його підтверджень, він зафіксований у різних породах по всьому світу, а наявні дані вказують на його вік близько 41 тис. років тому та тривалість <1 тис. років (Channell et al., 2020). Магніто-хроностратиграфічні дані досліджень чорноморських відкладів дозволили отримати уявлення про просторову та часову динаміку геомагнітного поля під час Laschamp (Nowaczyk et al., 2012). За ними фіксується складний рух ВГП: спочатку він перемістився з Берингового моря через Північну Америку до Саргасового моря (до 15° пн.ш.) приблизно на 270 років, потім повернувся через північно-східну Америку до північно-східної частини Тихого океану на 45° пн.ш. і залишався там приблизно 300 років, а потім впродовж 200 років мігрував до високих південних широт ($>70^\circ$ пд.ш.) в Антарктиді, де залишався приблизно 440 років, після чого за 270 років перетнув Індійський океан через Гімалаї до Центрального Сибіру, "проживши" там 250 років, а, після короткої еккурсії (250 років) до Лабрадорського моря приблизно на 50° пн.ш., нарешті повернувся до Північного Льодовитого океану. Отже, під час Laschamp відбулася повна зміна полярності, яка тривала 440 років, а всі описані вище зміни відбувалися впродовж 3000 років. Центром часового інтервалу оберненої полярності визначено 41 тис. років тому. Під час цього еккурсу віртуальний осьовий дипольний момент (VADM) мав найнижчі значення у часовому інтервалі 14–68 тис. років тому і становив всього 25 % від сучасного значення (Nowaczyk et al., 2013). Ці та інші дані були використані для побудови моделей геомагнітного поля (див. розділ 2.5), хоча дані кернів донних відкладів з південно-східної частини Чорного моря викликають певні сумніви внаслідок наявності у відкладах грейгіту, що потребує додаткових досліджень (Nowaczyk et al., 2020).

Аналіз записів палеовікових варіацій високої роздільної здатності за останні 70 тис. років з трьох різних регіонів Землі (Бермуди та Блейк-Багамський хребет, південно-східна околиця Тихого океану / Чилі, Філіппіни / Індонезія) на основі палеомагнітних даних по озерних та глибоководних морських відкладах дозволив знайти прояви трьох еккурсів – Mono Lake (~34 тис. років тому), Lashamp (~42 тис. років тому) і еккурсу без назви на стадії OIS 4 (~61 тис. років тому) (Lund, 2018). Визначено, що ці еккурси відбулися під час найнижчої палеонапруженості поля та найвищої дисперсії векторів залишкової намагніченості у всіх трьох регіонах, що, за припущенням автора (Lund, 2018), може бути справедливим для еккурсів по всьому світу.

Ми представили лише деякі з робіт, присвячених еккурсу Lashamp. Етапи його виявлення та дослідження наведено в оглядових статтях (наприклад, Channell et al., 2020, Ogg, 2020). Еккурс Norwegian-Greenland Sea у цих роботах не розглядається. На його існування вказано у роботі (Langereis et al., 1997) у часовому інтервалі 70–80 тис. років та у роботі (Поспелова, 2004), де він має назву Хаджимус з віком близько 80 тис. років (перша і третя колонка в табл. 1). У роботах з аналізу даних з морських відкладів Чорного моря цей еккурс датується віком 64,5 тис. років (Nowaczyk et al., 2013). Водночас спостерігається другий найглибший мінімум відносної палеонапруженості за останні 69 тис. років (Nowachuk et al., 2018). Аномальні напрямки геомагнітного поля також виявлені при дослідженнях кернів з Тихого океану (Філіппінські острови). Хоча вони й не підпадають під визначення "еккурсійних", їхній вік сягає $\sim 61 \pm 2$ тис. років і їх пов'язують з еккурсом Norwegian-Greenland Sea (Lund et al., 2017).

Екскурс Skalamaelifell (вік 95 тис. років тому) вперше зафіксований у лавових потоках на південному заході Ісландії (Kristjánsson, & Gudmundsson, 1980). Спочатку вважалося, що це було проявом екскурсу Lashamp, і тільки після уточнювального датування за даними $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ у поєднанні з ізохронами U-Th середній вік лавових потоків було визначено у $94,1 \pm 7,8$ тис. років (Jicha et al., 2011). Також цей і давніший екскурс PostBlake, датовані U-Th методом у $98,5\text{--}92,0$ ka та $105,8\text{--}103,5$ ka відповідно, були визначені у сталагміті SX11 з печери Саньсін на півдні Китаю (Chou et al., 2018). Інші прояви цих екскурсів зареєстровані в осадах Лак-дю-Буше-маар, Франція, віком ~ 104 та ~ 95 тис. років та підтверджені даними про співвідношення $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ у відкладах, які вказують на низьку палеонапруженість. До цього ж можна віднести й перехідні напрямки залишкової намагніченості в андезитових лавах Італії та базальтах Нью-Мексико віком відповідно 104 ± 1 та 103 ± 12 тис. років тому, що може бути проявом екскурсу PostBlake (Channell et al., 2020 та посилання в ній).

Екскурс PostBlake задокументовано за даними дослідження кернів ODP (програма буріння океану), в озерних відкладах та інших місцях. Цю подію також задокументовано у сталагміті з Південного Китаю віком 104 ± 1 тис. років (Ogg, 2020). Є припущення що інтервал $99\text{--}120$ тис. років характеризується мінімумом напруженості геомагнітного поля, що і може бути причиною екскурсів Blake, Post-Blake та Skalamaelifell (Channell et al., 2020 та посилання).

Екскурс Blake вважається іншою, поряд з екскурсом Lashamp, найбільш надійно зареєстрованою подією короточасної зміни полярності геомагнітного поля у хроні Брюнес. Понад 50 років тому його було зафіксовано у кернях глибоководних відкладів із зовнішнього хребта Блейка та встановлено вік у 108 і 114 тис. років тому (Smith, & Foster, 1969). Відтоді екскурс виявляли у морських відкладах, лесових товщах, спелеотемах, а також у лавових потоках (див. посилання у Channell et al., 2020). Однак проблемним питанням залишається встановлення точних часових рамок екскурсу. У (Singer, 2014) підсумовано результати його досліджень, де вказано, що екскурс може бути зумовлений одним із п'яти найінтенсивніших мінімумів дипольного моменту під час хрону Брюнес, який тривав приблизно 30 тис. років між 125 та 95 тис. років. Оцінки його віку попадають у діапазон від 118 до 100 тис. років тому. Вони були отримані на основі порівняння ізотопного складу кисню форамініфер з базовими кривими глобальної морської ізотопної стадії (MIS) і вказують на те, що він близький до межі MIS 5e/5d. Записи з високою роздільною здатністю показують, що екскурс Blake проявляється у двох коротких інтервалах близько до зворотної полярності геомагнітного поля, розділених коротким періодом нормальної полярності (Laj, & Channell, 2007). Тоді як цей екскурс надійно фіксується в осадових відкладах різних районів земної кулі, його записи у лавових потоках залишаються сумнівними через відсутність надійних даних про датування $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом. Єдиним вулканічним об'єктом є слабонамагнітний потік лави на острові Амстердам у південній частині Індійського океану, вік якого визначено у 120 ± 12 тис. років (Singer, 2014).

Екскурс Blake було виявлено також під час палеомагнітних досліджень вапнякового туфу останнього міжльодовикового періоду на археологічній ділянці Каурс (Північна Франція) (Sier et al, 2015), і авторами було запропоновано цікаву гіпотезу. Як додаткові індикатори віку цієї події автори (Sier et al, 2015 та посилання в ній) вказують на послідовність виявленого пилку,

характерного для Eemian міжльодовиків'я, а екскурс Blake тут спостерігається після піку MIS 5e. Іншим важливим часовим індикатором є розташування археологічних шарів поселення Каурса в межах Eemian *sensu stricto*, що вказує на час заселення цього місця, а саме що це відбулося значно пізніше "вікна можливостей" для розширення ареалу поселення неандертальців у Велику Британію, тобто до останнього міжльодовикового максимуму рівня моря. Коли неандертальці поселилися в Каурсі, "сухий шлях до Великої Британії" вже був затоплений високим рівнем моря на деякий час, а морська вода в Ла-Манші, можливо, була основною перешкодою для останнього міжльодовикового заселення Англії неандертальцями (Sier et al, 2015).

Екскурси середнього плейстоцену. Екскурс Iceland Basin реєструється в основному в осадових відкладах. Вперше його було надійно виявлено в керні в центральній частині Північної Атлантики, хоча назву свою він отримав завдяки першим знахідкам біля Ісландії (огляд Channell, 2014 та посилання в ньому). Відтоді екскурс зареєстровано у кернях з багатьох досліджених ділянок по програмі ODP в Атлантичному та Тихому океанах, а також у відкладах озера Байкал (Oda et al., 2002). Екскурси Blake та Iceland Basin виявлено і при дослідженнях осадових відкладів з півдня Піренейського півострова, де вікові прив'язки були уточнені за допомогою інтерпретації палинологічних даних та циклостратиграфії (Valero et al., 2023). Вік екскурсу Blake тут визначено у межах $116,5$ тис. $\pm 0,7$ тис. та 112 тис. $\pm 1,9$ тис. років, а екскурсу Iceland Basin – між $192,7$ і $187,7$ тис. років. Проблемною залишається ідентифікація цього екскурсу у наземних лавових потоках. Перехідні напрямки намагніченості в лавовому потоці на вулкані Унзен (Японія) ймовірно відповідають цьому екскурсу (Shibuya et al., 2007), однак залишається проблема встановлення надійного віку цього потоку. Зроблено висновок, що екскурс охоплює межу MIS 6/7 і триває ~ 3 тис. років, чим і пояснюється значне поширення його записів порівняно з іншими більш короточасними екскурсами (Channell et al., 2020). Таким чином, Iceland Basin можна вважати третім надійно зареєстрованим екскурсом у хроні Брюнес.

Екскурс Pringle Falls вперше виявлено в озерних відкладах біля однойменного водоспаду в штаті Орегон в кінці 1980-х – на початку 1990-х рр. (посилання у Channell et al., 2020). Його підтвердили й пізніші палеомагнітні дослідження зразків з цього ж місця (Herrero-Bervera, & Cañón-Tapia, 2013) з віком 211 ± 13 тис. років, хоча спочатку його вік оцінювався у 221 ± 20 тис. років. Екскурси приблизно цього віку були зафіксовані у вулканічних породах Альбукерке та Нової Зеландії (посилання у Channell et al., 2020), а також у деяких кернях морських відкладів біля східної Гренландії та Бермуд (посилання у Channell et al., 2020). Нещодавно у вулканічних породах Мауна-Лоа на Гавайях були виявлені перехідні/екскурсійні напрямки, які автор пов'язує з геомагнітними екскурсами Lashamp (приблизно 41 тис. років) та Pringle Falls (приблизно 211 ± 13 тис. років) (Herrero-Bervera, 2021). Однак визначення віку мають досить широкі часові інтервали (Singer, 2014), і, як наслідок, у (Channell et al., 2020) висловлено припущення, що у часовому інтервалі 240–210 тис. років є два різних екскурси.

У (Singer, 2014) наголошено, що екскурси хрону Брюнес умовно можна розділити на дві групи – ранню (730–520 тис. років тому) та пізню, (220–15 тис. років тому), а у проміжку між ними чітко визначених екскурсів немає, а середня напруженість геомагнітного поля залишалася досить високою. Тому залишається питання, чи

це є недоліком відбору та аналізу зразків, чи відображає довгострокові зміни напруженості поля у процесі генерації геодинамо. Як можливий екскурс у цьому часовому інтервалі виділено перехідні напрямки намагніченості у лавовому потоці в Аргентині з $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ віком 343 ± 33 тис. років (Singer, 2014), однак подальшого підтвердження ця подія не отримала. Пізніше, у (Channell, 2017), вказується на можливі екскурси з віком 286, 495, 540 та 590 тис. років, виявлені у Північній Атлантиці за результатами ODP. Екскурс з віком близько 286 тис. років, названий Portuguese Orphan, оскільки вперше його було зафіксовано біля берегів Португалії (Thouveny et al., 2004), у вулканічних породах не був виявлений.

Екскурс Bermuda припадає на мінімум відносної палеонапруженості на ~ 412 тис. років в MIS 11 (Channell et al., 2020). Він був зареєстрований в окремих зразках з ділянки ODP 1063 біля Бермуд. Можливо, його ж було зафіксовано у спелеотемі з північної Італії, де широта ВГП досягає 40° , а за U/Th методом вік становить 417 ± 8 тис. років. До того ж у вулканічному полі Гаррат-Рахат (Саудівська Аравія) визначено від'ємне нахилення $411,5 \pm 5,9$ тис. років тому за $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (посилання у Channell et al., 2020).

Екскурс Orphan Knoll виявлено лише на одній ділянці IODP (Integrated Ocean Drilling Program, після 2004 р. у неї трансформовано ODP), за ізотопом кисню його вік становить 495 тис. років у межах MIS 13a (Channell, 2017).

Екскурс Big Lost (540 тис. років, у межах MIS 14) виявлений у морських відкладах на ділянках IODP (Channell, 2017), вперше був зареєстрований у лавах з Айдахо (Champion et al., 1988) і датований за $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ у цьому місці як 559 ± 14 тис. років.

Датований віком 580 тис. років у межах MIS 15b/c зареєстровано екскурс La Palma під час IODP (Channell, 2017). Екскурсійні напрямки такого ж приблизно віку знайдені у лавах на Ла-Пальма, однак Singer et al. (2002) пов'язують їх з екскурсом Big Lost, вказуючи на те, що події у цьому часовому інтервалі потребують точнішого датування.

West Eifel suite (560 тис. років) є одним із п'яти екскурсів, зареєстрованих у вулканічному полі Вест-Ейфель між 530 і 730 тис. років, причому вважається, що значна частина цього часового інтервалу характеризується аномальною поведінкою напруженості магнітного поля, під час якого відбулося шість екскурсів (Singer, 2014), однак це не знайшло підтвердження за даними глибоководних відкладів (Channell et al., 2020). Channell et al. (2020) висловлюють припущення, що вказані три екскурси є досить короткими за тривалістю, тому їх неможливо точно зареєструвати, хоча всі три пов'язані з помітними мінімумами відносної палеонапруженості.

Екскурс Osaka Bay (680 тис. років в MIS 17) був зареєстрований в Осацькій затоці (Biswas et al., 1999) і на ділянці ODP в Північній Атлантиці (Channell et al., 2020 та посилання в ній). Також як прояв цього екскурсу у (Channell et al., 2020) вважають знайдені зворотні напрямки у лавових потоках в південній Мексиці віком 671 ± 12 тис. років та 673 ± 10 тис. років, хоча самі автори (Michalk et al., 2013) вважали це окремим екскурсом.

Геоманітне поле під час екскурсів. Палеомагнітні визначення є точковими, а уявлення про глобальний розподіл напруженості геомагнітного поля, у тому числі й під час екскурсів, отримують за допомогою побудови сферичних гармонічних моделей. Такі моделі ґрунтуються на емпіричних даних і дають змогу розрахувати поле та його компоненти на різних рівнях під і над поверхнею Землі та на самій поверхні. Сама модель залежить від набору даних спостережень, які використовуються для її

побудови. Тому у роботі (Korte et al., 2019a) побудована серія моделей для різних наборів палеомагнітних даних вулканогенних та осадових порід. Порівняння цих моделей дозволило визначити особливості поведінки поля у часовому інтервалі 50–30 тис. років, який включає екскурси Lashamp (~ 41 тис. років) і Mono Lake (~ 33 тис. років), спільні для всіх наборів даних. Однак автори зауважують, що морфологію поля на межі ядро-мантія (СМВ) або індивідуальні варіації потужності сферичних гармонічних коефіцієнтів слід інтерпретувати з обережністю. За даними всіх моделей під час екскурсу Lashamp відбувається розпад поля осьового диполя без значного впливу екваторіального диполя чи недипольних компонент. Поле осьового диполя зменшується до нуля, однак не змінює напрямку, що призводить до глобальної, але нерівномірної зміни поля на поверхні Землі. За тими ж даними екскурс Mono Lake може бути серією аномальних подій між 36 і 30 тис. років, а не одним екскурсом. Зменшення напруженості поля осьового диполя на межі СМВ у цей час менш виражене, воно подібне до інтенсивності недипольного поля. У проміжку часу 30–50 тис. років за модельними даними виділяють три фази: (1) стабільна фаза з домінуванням осьового диполя (50–43 тис. років); (2) екскурс Lashamp тривалістю ~ 5 тис. років (43–38 тис. років) основного екскурсу з проявом у полі на поверхні Землі впродовж ~ 2 тис. років (42–40 тис. років); (3) слабка фаза, під час якої осьова дипольна та недипольна складові на СМВ порівнянні за величинами, що призводить до реалізації більш ніж одного екскурсу між 36 та 30 тис. років (Korte et al., 2019a).

Моделі глобального поля для ширшого часового інтервалу, для останніх 100 тис. років, побудовані у (Korte et al., 2019b), так само припускають, що екскурси, викликані значним ослабленням внеску поля осьового диполя порівняно з внеском недипольних складових, проявляються глобально, тоді як регіональні екскурси, ймовірно, відповідають менш різкому зниженню поля осьового диполя. Глобальний прояв у цьому часовому інтервалі має лише Lashamp, тоді як PostBlake (~ 95 тис. років), Norwegian-Greenland Sea (~ 60 тис. років), Mono Lake (~ 33 тис. років) і Hilina Pali (~ 17 тис. років) зафіксовані лише в окремих регіонах або мають меншу кількість записів, а їхній вік загалом визначений менш точно і має значні розбіжності при визначенні різними методами. Також автори припускають, що екскурси Mono Lake та Hilina Pali можуть бути серією зміщених у часі регіональних екскурсів протягом тривалих періодів низького поля осьового диполя. Отже, як радять автори, слід бути обережним, розглядаючи геомагнітні екскурси як стратиграфічні маркери для цілей датування, а інтерпретуючи дані моделювання, слід враховувати певні обмеження моделей через розподіл, надійність і хронологію доступних даних (Korte et al., 2019b).

Глобальні та регіональні відмінності поведінки магнітного поля на поверхні Землі та на границі ядро – мантія під час екскурсів Norwegian-Greenland Sea, Lashamp, та Mono Lake / Auckland в інтервалі часу 70–15 тис. років за модельними даними розглянуті в (Panovska et al., 2021). Для екскурсу Norwegian-Greenland Sea (65 тис. р.) отримані низькі значення дипольного моменту та екскурсійні значення індексу палеовікових варіацій (PSV). Цей індекс кількісно визначає як інтенсивність, так і напрямки поля, звичайні його значення лежать у межах 0,05–0,30, "екскурсійними" вважаються величини понад 0,50 (Panovska, & Constable, 2017). Під час екскурсу Mono Lake / Auckland (34,5 тис. років) спостерігається лише незначне збільшення індексу PSV, яке не досягає

порогового значення для глобальної екскурсійної події, хоча на регіональному рівні цей поріг перевищений. Також показано, що під час екскурсу Laschamp осьова дипольна компонента змінила свій знак протягом 300 років (з 41,25 до 40,93 тис. років), що трохи коротше, ніж 500 років у попередній версії моделі, GGFSS70.1 (Liu et al., 2020). Під час екскурсу Laschamp поле осьового диполя ослаблене значно більше порівняно з екскурсами Norwegian-Greenland Sea та Mono Lake / Ockland, тоді як недипольна складова поля зберігається приблизно на однаковому рівні для всіх подій. Два мінімуми дипольного поля в Laschamp збігаються з моментами, коли осьовий диполь змінюється, але перший мінімум менш виражений, він супроводжується незначним зниженням недипольної складової. За даними моделювання для екскурсів Norwegian-Greenland Sea та Mono Lake / Ockland таке не спостерігається. Тому питання, чи може таке зменшення недипольної складової, що супроводжує розпад диполя, бути характерною ознакою для великих глобальних геомагнітних екскурсів, під час яких осьовий диполь змінює знак, потребує підтвердження або спростування шляхом аналізу більшої кількості екскурсів такого типу. Це та визначення інших характеристик екскурсів потребує високоякісних палеомагнітних даних з високою роздільною здатністю та з хорошим, незалежним контролем віку (Panovska et al., 2021).

Отже, за даними й цієї моделі, як і попередніх, можна стверджувати, що екскурси можуть інтерпретуватися зовсім по-різному в записках даних з різних регіонів, що слід мати на увазі, розглядаючи геомагнітні екскурси як стратиграфічні маркери або виводячи глобальні властивості поля з окремих записів.

Висновки

Впродовж останніх десятиліть палеомагнітні дослідження широко застосовуються для вирішення задач геології та стратиграфії гірських порід. Зокрема, результати початкових магнітостратиграфічних досліджень субаеральних товщ антропогену (у 1960–1990-х рр.) вказували на виявлення численних екскурсів і спершу здавалися багатонадійними при побудові регіональних хроностратиграфічних схем. Проте з розвитком палеомагнітного методу і впровадженням нової палеомагнітної апаратури, ці дані здебільшого були спростовані. Зокрема, хибні результати щодо ідентифікації екскурсів у лесових породах можна пояснити значним впливом в'язкої компоненти намагніченості на первинну намагніченість (через наявність суперпарамагнітних зерен магнетиту) (Bakhmutov et al., 2023).

Значне поширення та підвищення якості палеомагнітних визначень в останнє десятиліття дали змогу оновити часову шкалу подій еволюції геомагнітного поля – дані про його інверсії та екскурси (Ogg, 2020), що є необхідним для магнітостратиграфії. Однак ця шкала не є остаточною. Зокрема, у хроні Брюнес надійно встановленими вважаються екскурси Laschamp (41 тис. років тому), Blake (114 тис. років тому), Iceland Basin (188 тис. років тому). Решта потребують додаткового підтвердження, особливо за новими даними із Південної півкулі. Найбільш суперечливим питанням є встановлення екскурсів у часовому інтервалі 0–30 тис. років тому. Екскурси Етрусія та Соловки відзначаються тільки у роботах російських авторів на території Європи та частково Азії, решта теж мають недостатню кількість визначень, щоб вважатися достовірно встановленими, що потребує подальших досліджень.

Моделювання геомагнітного поля під час екскурсів показало, що вони можуть мати як глобальний, так і

регіональний прояв (наприклад, Panovska et al., 2021), що необхідно враховувати під час вирішення задач магнітостратиграфії.

У другій частині статті буде представлено актуальні питання залучення екскурсів у розв'язанні проблем стратиграфії, палеокліматології та екології антропогену, зокрема власні результати досліджень екскурсів у субаеральних відкладах плейстоцену України.

Подяки та джерела фінансування. Дослідження виконувалися за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2020.02/0406 "Магнітні індикатори палеокліматичних змін у відкладах лесово-ґрунтової формації України".

Список використаних джерел

- Бахмутов, В.Г. (2006). *Палеогеомагнітні варіації*. Наукова думка.
- Петрова, Г.Н., Нечаева, Т.Б., Поспелова, Г.А. (1992). *Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом*. Наука.
- Поспелова, Г.А. (2004). *Геомагнитные экскурсы. Краткая история и современное состояние геомагнитных исследований в Институте физики Земли РАН. ИФЗ РАН*.
- Распопов, О.М., Гуськова, Е.Г., Дергачев, В.А. (2010). Проявление геомагнитного экскурса Этрессия-Стерно в полярных сияниях? Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. *Материалы международного семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород, Санкт-Петербург*, с. 113–121.
- Третьяк, А.Н., Вигилянская, Л.И., Макаренко, В.Н., Дудкин, В.П. (1989). *Тонкая структура геомагнитного поля в позднем кайнозое*. Научная думка.
- Ahn, H.S., Sohn, Y.K., Lee, J.Y., Kim, J.C. (2018). Preliminary paleomagnetic and rock magnetic results from 17 to 22 ka sediment of Jeju Island, Korea: Geomagnetic excursions behavior or rock magnetic anomalies? *Earth Planets Space*, 70, 78.
- Bakhmutov, V.G., Hlavatskyi, D.V., Poliachenko, I.B. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-paleosol sequences in Ukraine and Moldova: a historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, in press.
- Biswas, D.K., Hyodo, M., Taniguchi, Y., Kaneko, M., Katoh, S., Sato, H. et al. (1999). Magnetostratigraphy of Plio-Pleistocene sediments in a 1700-m core from Osaka Bay, southwestern Japan and short geomagnetic events in the middle Matuyama and early Brunhes chron. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 148, 233–248.
- Bonhommet, N., Babbine, J. (1967). Sur la presence d'aimantation inverse dans la Chaine des Puys. *C.R. Hebs. Seances Acad. Sci. Ser. B*, 264, 92–94.
- Champion, D., Lanphere, M., Kuntz, M. (1988). Evidence for a new geomagnetic reversal from lava flows in Idaho: discussion of short polarity reversals in the Brunhes and Late Matuyamapolarity chron. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 93 (B10), 11667–11680.
- Channell, J.E.T. (2014). The Iceland Basin excursion: age duration, and excursion field geometry. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 4920–4935.
- Channell, J.E.T. (2017). Mid-Brunhes magnetic excursions in marine isotope stages 9, 13, 14, and 15 (286, 495, 540, and 590 ka) at North Atlantic IODP Sites U1302/3, U1305, and U1306. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 18, 473–487.
- Channell, J.E.T., Harrison, R.J., Lascu, I., McCave, I.N., Hibbert, F.D., Austin, W.E.N. (2016). Magnetic record of deglaciation using FORC-PCA, sortable-silt grain size, and magnetic excursion at 26 ka, from the Rockall Trough (NE Atlantic). *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 17, 1823–1841.
- Channell, J.E.T., Singer, B.S., Jicha, B.R. (2020). Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives. *Quaternary Science Reviews*, 228, 106114.
- Chen, Z., Yuan, F., Zhang, J., Shen, S., Li, X., Li, X. et al. (2020). Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, 104140.
- Chou, Y., Jiang, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C., Liu, J., Jiang, Z., Lee, T., Wang, C., Song, Y., Chiang, C., Tan, L., Lone, M.A., Pan, Y., Zhu, R., He, Y., Chou, Y., Tan, A., Roberts, A.P., Zhao, X., & Shen, C. (2018). Multidecadally resolved polarity oscillations during a geomagnetic excursion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (36), 8913–8918.
- Clement, B. (2004). Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature*, 428, 637–640.
- Creer K.M., Anderson T.W., Levis C.F.M. (1976). Late Quaternary geomagnetic stratigraphy recorded in Lake Erie sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 31, 37–47.
- Denham, C.R., Cox, A. (1971). Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13,300–34,000 years ago. *Earth and Planetary Science Letters*, 13, 181–190.
- Dergachev, V.A., Raspopov, O.M., van Geel, B., Zaitseva, G.I. (2004). The "SternoEtrussia" geomagnetic excursion around 2700 BP and changes of solar activity, cosmic ray intensity, and climate. *Radiocarbon*, 46, 661–681.
- Herrero-Bervera, E. (2021). On the Possibility of Obtaining Geomagnetic Volcanic Records of the Short-Term Behavior of the Laschamp and Pringle

Falls Excursions from the Long Sequence of Kahuku and Ninole Hills, Big Island of Hawaii, USA. *Open Journal of Geology*, 11, 712–733.

Herrero-Bervera, E., Cañón-Tapia, E. (2013). On the directional geomagnetic signature of the Pringle Falls excursion recorded at Pringle Falls, Oregon, USA. *Geological Society London Special Publications*, 373(1), 261–278.

Jicha, B.R., Kristjánsson, L., Brown, M.C., Singer, B.S., Beard, B.L., Johnson, C.M. (2011). New age for the Skalamaeifell excursion and identification of a global geomagnetic event in the late Brunhes Chron. *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 509–517.

Kornprobst, J., Lénat, J.-F., (2014). Centenary of the Discovery of Earth's Magnetic Field Reversals. *Eos*, 4 November. Retrieved from <https://eos.org/articles/centenary-discovery-earths-magnetic-field-reversals>.

Korte, M., Brown, M.C., Panovska, S., Wardinski, I. (2019a). Robust Characteristics of the Laschamp and Mono Lake Geomagnetic Excursions: Results From Global Field Models. *Frontiers in Earth Science*, 7:86.

Korte, M., Panovska, S., Constable, C. (2019b). A Global View on Geomagnetic Excursions Through the Past 100 kyr. *Abstracts, AGU 2019 Fall Meeting (San Francisco, USA 2019)*, GP34A-02, 1 p.

Krijgsman, W., Kent, D.V. (2004). Non-uniform occurrence of short-term polarity fluctuation in the geomagnetic field? New results from middle to late Miocene sediments of the north Atlantic (DSDP Site 608). In: Channell JET, et al. (eds.) *AGU Geophysical Monograph Series*, 145: *Timescales of the Geomagnetic Field*. (p. 161–174). Washington, DC: AGU.

Kristjánsson, L., Gudmundsson, A. (1980). Geomagnetic excursion in late-glacial basalt, outcrops in south-western Iceland. *Geophysical Research Letters*, 7, 337–340.

Laj, C., Channell, J.E.T. (2007). Geomagnetic excursions. *Treatise on Geophysics*, 5, 373–416.

Langereis, C.G., Dekkers, M.J., de Lange, G.J., Paterne, M., van Santvoort, P.J.M. (1997). Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophysical Journal International*, 129, 75–94.

Langereis, C.G.; Krijgsman, W., Muttoni, G., Menning, M. (2010). Magnetostratigraphy concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy*, 43(3), 207–233.

Liddicoat, J.C., Coe, R.S. (1979). Mono Lake geomagnetic excursion. *Journal of Geophysical Research*, 84, (B1), 261–271.

Liu, J., Nowaczyk, N.R., Panovska, S., Korte, M., Arz, H.W. (2020). The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake excursions recorded in a Black Sea sedimentary sequence spanning from 68.9 to 14.5 ka. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB019225.

Liu, J., Nowaczyk, N.R., Ute, F., Arz, H.W. (2018). A 20–15 ka high-resolution paleomagnetic secular variation record from Black Sea sediments – no evidence for the 'Hilina Pali excursion'? *Earth and Planetary Science Letters*, 492, 174–185.

Liu, J., Nowaczyk, N.R., Ute, F., Arz, H.W. (2019). Geomagnetic paleosecular variation record spanning from 40 to 20 ka – implications for the Mono Lake excursion from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 509, 114–124.

Lund, S.P. (2018). A new view of long-term geomagnetic field secular variation. *Frontiers of Earth Science*, 6, 40.

Lund, S.P., Schwartz, M., Stott, L. (2017). Long-term palaeomagnetic secular variation and excursions from the western Equatorial Pacific Ocean (MIS2-4). *Geophysical Journal International*, 209, 587–596.

Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. (1996). *The magnetic field of the Earth: paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*. USA: Academic press.

Michalk, D.M., Böhm, H.N., Nowaczyk, N.R., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., Ownby, S., Negendank, J.F.W. (2013). Evidence for geomagnetic excursions recorded in Brunhes and Matuyama Chron lavas from the trans-Mexican volcanic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2648–2669.

Molina-Cardín, A., Dinis, L., Osete, M.L. (2021). Simple stochastic model for geomagnetic excursions and reversals reproduces the temporal asymmetry of the axial dipole moment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(10), e2017696118.

Mörner, N.A., Lanser, J.P., Hospers, J. (1971). Late Weichselian palaeomagnetic reversal. *Nature Physical Science*, 234, 173–174.

Nami, H.G. (2015). New Paleomagnetic results and evidence for a geomagnetic field excursion during the pleistocene-holocene transition at Pichincha province, Ecuador. *Geofísica Internacional*, 54(2), 127–148.

Nami, H.G., Vasquez, C.A., Wadley, L., De la Peña, P. (2020). Detailed palaeomagnetic record at Rose Cottage Cave, South Africa: Implications for the Holocene geomagnetic field behaviour and chronostratigraphy. *South African Journal of Science*, 116(1/2), Art.#6550.

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.

Nowaczyk, N.R., Arz, H.W., Frank, U., Kind, J., Plessen, B. (2012). Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 351–352, 54–69.

Nowaczyk, N.R., Frank, U., Kind, J., Arz, H.W. (2013). A high-resolution paleointensity stack of the past 14 to 68 ka from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 384, 1–16.

Nowaczyk, N.R., Liu, J., Arz, H.W. (2020). Records of the Laschamps geomagnetic polarity excursion from Black Sea sediments: magnetite versus greigite, discrete sample versus U-channel data. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1079–095.

Nowaczyk, N.R., Liu, J., Ute, F., Arz, H.W. (2018). A high-resolution paleosecular variation record from Black Sea sediments indicating fast directional changes associated with low field intensities during marine isotope stage (MIS) 4. *Earth and Planetary Science Letters*, 484, 15–29.

Oda, H., Nakamura, K., Ikehara, K., Nakano, T., Nishimura, M., Khlystov, O. (2002). Paleomagnetic record from Academician Ridge, Lake Baikal: a reversal excursion at the base of marine oxygen isotope stage 6. *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 117–132.

Ogg, J.G. (2020). Chapter 5 - Geomagnetic Polarity Time Scale. In Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M. (Eds.), *Geologic Time Scale*. (p. 159–192). Elsevier.

Panovska, S., Constable, C.G. (2017). An activity index for geomagnetic paleosecular variation, excursions, and reversals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 1366–1375.

Panovska, S., Korte, M., Liu, J., Nowaczyk, N. (2021). Global evolution and dynamics of the geomagnetic field in the 15–70 kyr period based on selected paleomagnetic sediment records. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022681.

Petrova G.N., Pospelova G.A. (1990). Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 63, 135–143.

Roberts, A.P. (2008). Geomagnetic excursions: Knowns and unknowns. *Geophysical Research Letters*, 35, L17307.

Shibuya, H., Iwasaki, Y., Tanaka, H., Hoshizumi, H. (2007). Paleomagnetism of Unzen volcano: a volcanic record (Senbongi excursion) of the Iceland Basin event and the Brunhes VGP distribution for Japan. *Earth Planets Space*, 59, 763–774.

Sier, M.J., Parés, J.M., Antoine, P., Loch, J.-L., Dekkers, M.J., Limondin-Lozouet, N., Roebroeks, W. (2015). Evidence for the Blake Event recorded at the Eemian archaeological site of Caours, France. *Quaternary International*, 357, 149–157.

Simon, Q., Suganuma, Y., Okada, M., Henda, Y., ASTER Team, (2019). High-resolution 10 Be and paleomagnetic recording of the last polarity reversal in the Chiba composite section: age and dynamics of the Matuyama-Brunhes transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 519, 92–100.

Singer, B.S. (2014). A Quaternary geomagnetic instability time scale. *Quaternary Geochronology*, 21, 29–52.

Singer, B.S., Jicha, B.R., He, H., Zhu, R. (2014). Geomagnetic field excursion recorded 17 ka at Tianchi Volcano, China: new 40Ar/39Ar age and significance. *Geophysical Research Letters*, 41, 2794–2802.

Singer, B.S., Jicha, B.R., Mochizuki, N., Coe, R.S. (2019). Synchronizing volcanic, sedimentary, and ice core records of Earth's last magnetic polarity reversal. *Science Advances*, 5(8), eaaw4621.

Singer, B.S., Relle, M.R., Hoffman, K.A., Battle, A., Guillou, H., Laj, C., Carracedo, J.C. (2002). Ar/Ar ages of transitionally magnetized lavas on La Palma, canary islands, and the geomagnetic instability timescale. *Journal of Geophysical Research*, 107(B11), 2307.

Smith, J.D., Foster, J.H. (1969). Geomagnetic reversal in the Brunhes normal polarity epoch. *Science*, 163, 565–567.

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.

Tauxe, L., Herbert, T., Shackleton, N.J., Kok Y.S. (1996). Astronomical calibration of the Matuyama-Brunhes boundary: Consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates and Asian loess sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 133–146.

Thompson, R., Berglund, B. (1976). Late Weichselian geomagnetic "reversal" as a possible example of the reinforcement syndrome. *Nature*, 263, 490–491.

Thouveny, N., Carcaillet, J., Moreno, E., Leduc, G., Nerini, D. (2004). Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP; a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 377–396.

Valero, L., García-Alix, A., Jiménez-Moreno, G., Camuera, J., López-Avilés, A., Ramos-Román, M.J., Jiménez-Espejo, F.J., Beaud, E., Maestre, E., Anderson, R.S. (2023). Evidences of the Blake and Iceland Basin magnetic excursions in southeastern Iberia and chronological implications for the Padul sedimentary record. *Quaternary Geochronology*, 74, 101421.

Verosub, K.L. (1982). Geomagnetic excursions: a critical assessment of the evidence as recorded in sediments of the Brunhes Epoch. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. *Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 306, 161–168.

References

Ahn, H.S., Sohn, Y.K., Lee, J.Y., Kim, J.C. (2018). Preliminary paleomagnetic and rock magnetic results from 17 to 22 ka sediment of Jeju Island, Korea: Geomagnetic excursions behavior or rock magnetic anomalies? *Earth Planets Space*, 70, 78.

Bakhmutov, V.G. (2006). *Paleovekovyye geomagnitnye variatsii*. Naukova dumka [in Russian].

Bakhmutov, V.G., Hlavatskyi, D.V., Poliachenko, I.B. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: a historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, in press.

Biswas, D.K., Hyodo, M., Taniguchi, Y., Kaneko, M., Katoh, S., Sato, H. et al. (1999). Magnetostratigraphy of Plio-Pleistocene sediments in a 1700-m core from Osaka Bay, southwestern Japan and short geomagnetic events in the middle

- Matuyama and early Brunhes chrons. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 148, 233–248.
- Bonhommet, N., Babkine, J. (1967). Sur la presence d'alimentation inverse dans la Chaîne des Puys. *C.R. Hebs. Seances Acad. Sci. Ser. B*, 264, 92–94.
- Champion, D., Lanphere, M., Kuntz, M. (1988). Evidence for a new geomagnetic reversal from lava flows in Idaho: discussion of short polarity reversals in the Brunhes and Late Matuyamapolarity chrons. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 93 (B10), 11667–11680.
- Channell, J.E.T. (2014). The Iceland Basin excursion: age duration, and excursion field geometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 4920–4935.
- Channell, J.E.T. (2017). Mid-Brunhes magnetic excursions in marine isotope stages 9, 13, 14, and 15 (286, 495, 540, and 590 ka) at North Atlantic IODP Sites U1302/3, U1305, and U1306. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 473–487.
- Channell, J.E.T., Harrison, R.J., Lascu, I., McCave, I.N., Hibbert, F.D., Austin, W.E.N. (2016). Magnetic record of deglaciation using FORC-PCA, sortable-silt grain size, and magnetic excursion at 26 ka, from the Rockall Trough (NE Atlantic). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 1823–1841.
- Channell, J.E.T., Singer, B.S., Jicha, B.R. (2020). Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives. *Quaternary Science Reviews*, 228, 106114.
- Chen, Z., Yuan, F., Zhang, J., Shen, S., Li, X., Li, X. et al. (2020). Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, 104140.
- Chou, Y., Jiang, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C., Liu, J., Jiang, Z., Lee, T., Wang, C., Song, Y., Chiang, C., Tan, L., Lone, M.A., Pan, Y., Zhu, R., He, Y., Chou, Y., Tan, A., Roberts, A.P., Zhao, X., & Shen, C. (2018). Multidecadally resolved polarity oscillations during a geomagnetic excursion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (36), 8913–8918.
- Clement, B. (2004). Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature*, 428, 637–640.
- Creer K.M., Anderson T.W., Levis C.F.M. (1976). Late Quaternary geomagnetic stratigraphy recorded in Lake Erie sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 31, 37–47.
- Denham, C.R., Cox, A. (1971). Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13,300–34,000 years ago. *Earth and Planetary Science Letters*, 13, 181–190.
- Dergachev, V.A., Raspopov, O.M., van Geel, B., Zaitseva, G.I. (2004). The "SternoEtrussia" geomagnetic excursion around 2700 BP and changes of solar activity, cosmic ray intensity, and climate. *Radiocarbon*, 46, 661–681.
- Herrero-Bervera, E. (2021). On the Possibility of Obtaining Geomagnetic Volcanic Records of the Short-Term Behavior of the Laschamp and Pringle Falls Excursions from the Long Sequence of Kahuku and Ninole Hills, Big Island of Hawaii, USA. *Open Journal of Geology*, 11, 712–733.
- Herrero-Bervera, E., Cañón-Tapia, E. (2013). On the directional geomagnetic signature of the Pringle Falls excursion recorded at Pringle Falls, Oregon, USA. *Geological Society London Special Publications*, 373(1), 261–278.
- Jicha, B.R., Kristjánsson, L., Brown, M.C., Singer, B.S., Beard, B.L., Johnson, C.M. (2011). New age for the Skalamafell excursion and identification of a global geomagnetic event in the late Brunhes Chron. *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 509–517.
- Kornprobst, J., Lénat, J.-F., (2014). Centenary of the Discovery of Earth's Magnetic Field Reversals. *Eos*, 4 November. Retrieved from <https://eos.org/articles/centenary-discovery-earths-magnetic-field-reversals>.
- Korte, M., Brown, M.C., Panovska, S., Wardinski, I. (2019a). Robust Characteristics of the Laschamp and Mono Lake Geomagnetic Excursions: Results From Global Field Models. *Frontiers in Earth Science*, 7:86.
- Korte, M., Panovska, S., Constable, C. (2019b). A Global View on Geomagnetic Excursions Through the Past 100 kyr. *Abstracts, AGU 2019 Fall Meeting (San Francisco, USA 2019)*, GP34A-02.
- Krijgsman, W., Kent, D.V. (2004). Non-uniform occurrence of short-term polarity fluctuation in the geomagnetic field? New results from middle to late Miocene sediments of the north Atlantic (DSDP Site 608). In: Channell JET, et al. (eds.) *AGU Geophysical Monograph Series*, 145: *Timescales of the Geomagnetic Field*. (p. 161–174). Washington, DC: AG.
- Kristjánsson, L., Gudmundsson, A. (1980). Geomagnetic excursion in late-glacial basalt, outcrops in south-western Iceland. *Geophysical Research Letters*, 7, 337–340.
- Laj, C., Channell, J.E.T. (2007). Geomagnetic excursions. *Treatise on Geophysics*, 5, 373–416.
- Langereis, C.G., Dekkers, M.J., de Lange, G.J., Paterne, M., van Santvoort, P.J.M. (1997). Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophysical Journal International*, 129, 75–94.
- Langereis, C.G.; Krijgsman, W., Muttoni, G., Menning, M. (2010). Magnetostratigraphy concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy*, 43(3), 207–233.
- Liddicoat, J.C., Coe, R.S. (1979). Mono Lake geomagnetic excursion. *Journal of Geophysical Research*, 84, (B1), 261–271.
- Liu, J., Nowaczyk, N.R., Panovska, S., Korte, M., Arz, H.W. (2020). The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake excursions recorded in a Black Sea sedimentary sequence spanning from 68.9 to 14.5 ka. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB019225.
- Liu, J., Nowaczyk, N.R., Ute, F., Arz, H.W. (2018). A 20–15 ka high-resolution paleomagnetic secular variation record from Black Sea sediments – no evidence for the 'Hilina Pali excursion'? *Earth and Planetary Science Letters*, 492, 174–185.
- Liu, J., Nowaczyk, N.R., Ute, F., Arz, H.W. (2019). Geomagnetic paleosecular variation record spanning from 40 to 20 ka – implications for the Mono Lake excursion from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 509, 114–124.
- Lund, S.P. (2018). A new view of long-term geomagnetic field secular variation. *Frontiers of Earth Science*, 6, 40.
- Lund, S.P., Schwartz, M., Stott, L. (2017). Long-term palaeomagnetic secular variation and excursions from the western Equatorial Pacific Ocean (MIS2–4). *Geophysical Journal International*, 209, 587–596.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. (1996). *The magnetic field of the Earth: paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*. USA: Academic press.
- Michalk, D.M., Böhnell, H.N., Nowaczyk, N.R., Aguirre-Diaz, G.J., López-Martínez, M., Ownby, S., Negendank, J.F.W. (2013). Evidence for geomagnetic excursions recorded in Brunhes and Matuyama Chron lavas from the trans-Mexican volcanic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 2648–2669.
- Molina-Cardín, A., Dinis, L., Osete, M.L. (2021). Simple stochastic model for geomagnetic excursions and reversals reproduces the temporal asymmetry of the axial dipole moment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(10), e2017696118.
- Mörner, N.A., Lanser, J.P., Hospers, J. (1971). Late Weichselian palaeomagnetic reversal. *Nature Physical Science*, 234, 173–174.
- Nami, H.G. (2015). New Paleomagnetic results and evidence for a geomagnetic field excursion during the pleistocene-holocene transition at Pichincha province, Ecuador. *Geofísica Internacional*, 54(2), 127–148.
- Nami, H.G., Vasquez, C.A., Wadley, L., De la Peña, P. (2020). Detailed palaeomagnetic record at Rose Cottage Cave, South Africa: Implications for the Holocene geomagnetic field behaviour and chronostratigraphy. *South African Journal of Science*, 116(1/2), Art.6550, 9 pages.
- Nawrocki, J., Bogucki, A., Lanczont, 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.
- Nowaczyk, N.R., Arz, H.W., Frank, U., Kind, J., Plessen, B. (2012). Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 351–352, 54–69.
- Nowaczyk, N.R., Frank, U., Kind, J., Arz, H.W. (2013). A high-resolution paleointensity stack of the past 14 to 68 ka from Black Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 384, 1–16.
- Nowaczyk, N.R., Liu, J., Arz, H.W. (2020). Records of the Laschamps geomagnetic polarity excursion from Black Sea sediments: magnetite versus greigite, discrete sample versus U-channel data. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1079–1095.
- Nowaczyk, N.R., Liu, J., Ute, F., Arz, H.W. (2018). A high-resolution paleosecular variation record from Black Sea sediments indicating fast directional changes associated with low field intensities during marine isotope stage (MIS) 4. *Earth and Planetary Science Letters*, 484, 15–29.
- Oda, H., Nakamura, K., Ikehara, K., Nakano, T., Nishimura, M., Khlystov, O. (2002). Paleomagnetic record from Academician Ridge, Lake Baikal: a reversal excursion at the base of marine oxygen isotope stage 6. *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 117–132.
- Ogg, J.G. (2020). Chapter 5 - Geomagnetic Polarity Time Scale. In Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M. (Eds.), *Geologic Time Scale*. Elsevier, p. 159–192.
- Panovska, S., Constable, C.G. (2017). An activity index for geomagnetic paleosecular variation, excursions, and reversals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, 1366–1375.
- Panovska, S., Korte, M., Liu, J., Nowaczyk, N. (2021). Global evolution and dynamics of the geomagnetic field in the 15–70 kyr period based on selected paleomagnetic sediment records. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB02681.
- Petrova G.N., Pospelova G.A. (1990). Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 63, 135–143.
- Petrova, G.N., Nechaeva, T.V., Pospelova, G.A. (1992). *Characteristic changes in the geomagnetic field in the past*. Nauka [in Russian].
- Pospelova, G.A. (2004). *Geomagnetic episodes. Short history and current status of geomagnetic investigation in Institute of Earth's physics RAS*. Publ. IPE RAS, p. 44–55 [In Russian].
- Raspopov, O.M., Guskova, E.G., Dergachev, V.A. (2010). Proyavlenie geomagnitnogo ekskursa Etrussiya-Sterno v polyarnykh siyaniyah? Paleomagnetizm i magnetizm gornyyh porod. *Materialy mezhdunarodnogo seminaru po problemam paleomagnetizma i magnetizma gornyyh porod, Sankt-Peterburg*, (p. 113–121) [in Russian].
- Roberts, A.P. (2008). Geomagnetic excursions: Knowns and unknowns. *Geophysical Research Letters*, 35, L17307.
- Shibuya, H., Iwasaki, Y., Tanaka, H., Hoshizumi, H. (2007). Paleomagnetism of Unzen volcano: a volcanic record (Senbongi excursion) of the Iceland Basin event and the Brunhes VGP distribution for Japan. *Earth Planets Space*, 59, 763–774.
- Sier, M.J., Parés, J.M., Antoine, P., Lochet, J.-L., Dekkers, M.J., Limondin-Lozouet, N., Roebroeks, W. (2015). Evidence for the Blake Event recorded at the Eemian archaeological site of Caours, France. *Quaternary International*, 357, 149–157.
- Simon, Q., Suganuma, Y., Okada, M., Henda, Y., ASTER Team, (2019). High-resolution 10 Be and paleomagnetic recording of the last polarity reversal in the Chiba composite section: age and dynamics of the Matuyama-Brunhes transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 519, 92–100

Singer, B.S. (2014). A Quaternary geomagnetic instability time scale. *Quaternary Geochronology*, 21, 29–52.

Singer, B.S., Jicha, B.R., He, H., Zhu, R. (2014). Geomagnetic field excursion recorded 17 ka at Tianchi Volcano, China: new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and significance. *Geophysical Research Letters*, 41, 2794–2802.

Singer, B.S., Jicha, B.R., Mochizuki, N., Coe, R.S. (2019). Synchronizing volcanic, sedimentary, and ice core records of Earth's last magnetic polarity reversal. *Science Advances*, 5(8), eaaw4621.

Singer, B.S., Relle, M.R., Hoffman, K.A., Battle, A., Guillou, H., Laj, C., Carracedo, J.C. (2002). Ar/Ar ages of transitionally magnetized lavas on La Palma, canary islands, and the geomagnetic instability timescale. *Journal of Geophysical Research*, 107(B11), 2307.

Smith, J.D., Foster, J.H. (1969). Geomagnetic reversal in the Brunhes normal polarity epoch. *Science*, 163, 565–567.

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.

Tauxe, L., Herbert, T., Shackleton, N.J., Kok Y.S. (1996). Astronomical calibration of the Matuyama-Brunhes boundary: Consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates and Asian loess sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 133–146.

Thompson, R., Berglund, B. (1976). Late Weichselian geomagnetic "reversal" as a possible example of the reinforcement syndrome. *Nature*, 263, 490–491.

Thouveny, N., Carcaillet, J., Moreno, E., Leduc, G., Nerini, D. (2004). Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP; a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 377–396.

Tretyak, A.N., Vigilyanskaya, L.I., Makarenko, V.N., Dudkin, V.P. (1989). *Tonkaya struktura geomagnitnogo polya v pozdnem kainozoe*. Naukova dumka [in Russian].

Valero, L., García-Alix, A., Jiménez-Moreno, G., Camuera, J., López-Avilés, A., Ramos-Román, M.J., Jiménez-Espejo, F.J., Beamud, E., Maestre, E., Anderson, R.S. (2023). Evidences of the Blake and Iceland Basin magnetic excursions in southeastern Iberia and chronological implications for the Padul sedimentary record. *Quaternary Geochronology*, 74, 101421.

Verosub, K.L. (1982). Geomagnetic excursions: a critical assessment of the evidence as recorded in sediments of the Brunhes Epoch. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. *Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 306, 161–168.

Отримано редакцією журналу / Received: 20.09.23

Прорецензовано / Revised: 05.10.23

Схвалено до друку / Accepted: 08.10.23

Volodymyr BAKHMUTOV¹, DSc (Geol.), Prof., Head of Department

ORCID ID: 0000-0003-3804-9953

e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Halyna 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 P.1: A HISTORICAL OVERVIEW AND CURRENT STATE OF RESEARCH

The use of the palaeomagnetic method in stratigraphy is based on the evidence of geomagnetic field polarity changes (inversions) as well as the existence of excursions, short-term (up to 10 ka) deviations of the virtual geomagnetic pole from its usual position, which occurred sometimes only on a regional scale. The excursions as magnetostratigraphic benchmarks are a powerful tool in the correlation of the Quaternary deposits. In 1960–1990 particular attention was paid to them as important correlation markers across the regional chronostratigraphic scales of the Quaternary. However, the quantity of the Brunhes chron excursions, their stratigraphic position and ages have been debatable. In recent years, many papers have been published clarifying the nature, age, and duration of excursions in various deposits. In the first part of the article a detailed overview of the Brunhes chron excursions is provided, considering the current state of the issue of determining their suitability.

K e y w o r d s : geomagnetic field inversions and excursions, magnetostratigraphy.

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.