

Аномальне геомагнітне поле едіакарію: палеомагнітні дані з південно-західної частини Східноєвропейської платформи

В.Г. Бахмутов, Є.Б. Поляченко, С.І. Черкес, Д.В. Главацький, 2025

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

Представлено результати палеомагнітних досліджень трапової формації Волині та червоноколірних порід Поділля. Підтверджено аномальну поведінку геомагнітного поля в едіакарії, що проявляється у невідповідності одновікових палеомагнітних полюсів, гіперактивному режимі зміни полярності поля та вкрай низьких значеннях його палеонапруженості. Цим можуть бути обумовлені складнощі у палеогеографічних реконструкціях для цього періоду, а також радикальний вплив геомагнітних умов на навколишнє середовище, зокрема на еволюцію біоти.

Ключові слова: аномальне геомагнітне поле, едіакарій, трапи Волині.

Вступ. В еволюції нашої планети останній геологічний період неопротерозою — едіакарій (також відомий як венд, 635—541 млн років тому) — займає особливе

Citation: Bakhmutov, V.G., Poliachenko, I.B., Cherkes, S.I., & Hlavatskyi, D.V. (2025). Ediacaran anomalous geomagnetic field: paleomagnetic data from the southwestern margin of the east European Platform. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 175—181. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322501>.

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

місце. Він передував кембрійській епосі, коли на нашій планеті відносно швидко і майже одночасно виникло безліч нових біологічних форм (так званий «кембрійський вибух»). У пошуках пояснення такого загадкового еволюційного стрибка висунуто різні гіпотези щодо екстремальних подій, які відбулися в біосфері, кріосфері, гідросфері, атмосфері. У геології едіакарій займає особливе місце як один з ключових етапів історії планети, коли відбувалися глобальні заledenіння, тектонічна перебудова суперконтинентів, зміна режиму генерації геомагнітного динамо та інші глобальні процеси. У їх вивченні важливу роль відіграють палеомагнітні дані, які є основою глобальних палеогеографічних реконструкцій і дають змогу кількісно інтерпретувати переміщення та обертання окремих блоків земної кори. Щодо палеомагнітної вивченості едіакарію, то результати є неоднозначними і суперечливими. Для докембрійських платформ отримано групи практично одновікових, але різних за напрямком полюсів (див., наприклад, [Domeier et al., 2023] і посилання в ній). Для їхнього пояснення висунуто різні гіпотези, які умовно можна розділити на чотири групи: 1) аномально (стосовно фанерозою) швидкий рух тектонічних плит; 2) зміщення географічного полюса обертання Землі (істинна міграція полюса); 3) аномальна поведінка геомагнітного поля; 4) частина даних з різних причин не є інформативними і не можуть бути застосовані для палеогеодинамічних реконструкцій. Отримання надійних палеомагнітних даних для едіакарію є актуальною проблемою сучасної палеомагнітології. Автори провели детальні палеомагнітні дослідження на різних об'єктах південно-західної частини Східноєвропейської платформи (СЄП) в районі Волино-Поділля і виконали тестування різних гіпотез стосовно геомагнітного поля едіакарію.

Об'єкти і методи дослідження. Було досліджено вулканогенні (трапова формація Волині) та осадові (теригенні відклади Поділля) породи едіакарію потужністю 300—500 м, які поділяються на волинську,

могилів-подільську та канилівську серії [Гожик, 2013]. Зразки трапів волинської серії були відібрані як у кар'єрах, так і у свердловинах, результати палеомагнітних досліджень наведено у публікаціях [Shcherbakova et al., 2020; Бахмутов и др., 2021; Bakhmutov et al., 2022; Thallner et al., 2022]. Численні ізотопно-геохронологічні визначення віку ефузивної товщі обмежують вік її формування діапазоном 580—545 млн років тому [Бахмутов и др., 2021].

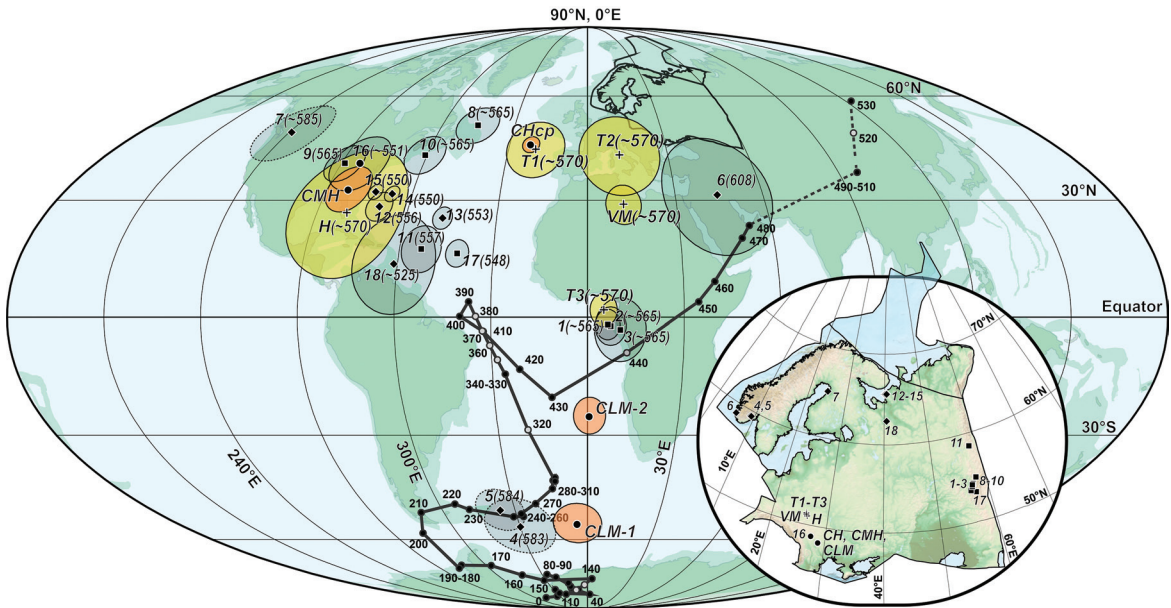
Вимірювання магнітних параметрів виконувалися на апаратурі ЦКК магнітометричною апаратурою Інституту геофізики НАН України. Зразки піддавалися стандартній процедурі поступового розмагнічування температурою і змінними магнітними полями, досліджувалися їх магнітна текстура. Комплексом магніто-мінералогічних методів досліджувалися магнітні мінерали — носії залишкової намагніченості, для їх визначення також залучалися результати оптичної мікроскопії та електронно-мікророзондового аналізу тощо. Додатково дослідження магніто-мінералогічних властивостей зразків, а також визначення напруженості давнього геомагнітного поля класичними (Тельє—Тельє і Вілсона) методами виконувались у палеомагнітній лабораторії Геофізичної обсерваторії «Борок» філіалу ІФЗ РАН та у геомагнітній лабораторії університету Ліверпуля, Великобританія (2019—2022).

Результати. На зразках «низькотитанистих» базальтів і туфів волинської серії було виділено високотемпературну характеристичну компоненту намагніченості, яка за всіма ознаками є первинною. На це вказує: а) її біполярність у зразках базальтів і туфів з різних покривів; б) позитивний тест контакту; в) ідентифіковані гетерофазно окислені титаномagnetити з блокуючими температурами понад 500 °С, які представлені псевдо- та однодоменними зернами; г) незалежність магнітної текстури та палеомагнітних напрямків; д) узгодження отриманих палеомагнітних напрямків із попередніми результатами інших авторів. Це дало змогу отримати надійні визначення палеомагнітних напрям-

ків і палеонапруженості на цих зразках. Розраховані палеомагнітні полюси $T1$, $T2$ та VM (рисунок) добре узгоджуються з раніше отриманими даними по цих базальтах [Nawrocki et al., 2004; Elming et al., 2007]. На зразках «високотитанистих» базальтів характеристична компонента намагніченості виділяється в діапазоні низьких блокуючих температур (200—400 °С) і за низьких змінних магнітних полів (до 25 мТл). Є підстави вважати цю компоненту первинною, але розрахований за нею полюс потрапляє на кембрійський сегмент референтної траєкторії позірної міграції полюса (ТПМП), що викликає підозру на перемагнічуван-

ня. За результатами досліджень осадових червоноколірних порід грушкинської світи в діапазоні деблокуючих температур 200—360 °С було виділено дві низькотемпературні компоненти і за ними розраховані палеополіси $CLM-1$ і $CLM-2$ та високотемпературну (CH) характеристичну компоненту намагніченості в діапазоні температур 650—700 °С (див. рисунок).

Отримано нові палеомагнітні полюси, а також здійснено вибірку полюсів з бази даних PALEOMAGIA, що охоплює породи різного генезису вікового діапазону 525—608 млн років тому в межах СЄП [Бахмутов и др., 2021, табл. 8]. Результати можна роз-



Вибірка палеомагнітних полюсів з колами довіри A_{95} для едіакарію СЄП [Бахмутов и др., 2021, з доповненнями]. Хрестами і кружечками позначено полюси з південно-західної частини СЄП по трапам Волині та червоноколірним породам Поділля відповідно, квадратами — полюси із східної частини (Урал), ромбами — із північної частини СЄП. Інтервали довіри A_{95} для нових полюсів залиті помаранчевим (для грушкинської світи) та жовтим (для волинських трапів). Окремо чорною та пунктирною лініями позначено референтну ТПМП для Балтики, а чорні/сірі точки визначають положення розрахованих/інтерпольованих полюсів, вік яких наведений цифрами в млн р. У вкладці наведено райони досліджень у межах СЄП.

A selection of palaeomagnetic poles with the corresponding 95 % confidence levels for the Ediacaran of East European Platform [Bakhmutov et al., 2021, with modification]. Crosses and circles indicate poles from the southwestern part of the East European Platform for Volyn traps and red beds of Podillia correspondingly, squares — from the eastern part (Ural), rhombus — from the northern part of the East European Platform. The A_{95} confidence intervals for the new poles are filled in orange (for the Hrushka suite) and yellow (for the Volyn traps). The apparent polar wander path of Baltic craton is shown by solid and dashed lines, where the small black/gray circles correspond to mean position of the defined/interpolated poles, the age of the poles is given in Ma. The sampling locations are given in the inset.

ділити на три групи. Перша (6, 8, 9, 10, VM, T2 і T1) вікового діапазону 608—560 млн років має тенденцію зміщення в західному напрямку з омолодженням віку. Розрахований полюс *СНСр* майже збігається з полюсом T1 базальтів лучичівської світи. Друга група є послідовним продовженням першої і містить полюси 16, 15, 14, 12, 13, 17, 11 і 18 вікового діапазону 557—525 млн років, які розташовані вздовж східного узбережжя США і на схід від Карибського басейну. До неї тяжіє наш полюс *СМН* червоноколірних порід, а також розрахований для високотитанистих базальтів полюс *Н*. Третя група містить полюси 1, 2 і 3, які вибиваються із загального тренду міграції полюсів і розташовуються трохи на схід від перетину екватора з Гринвіцьким меридіаном, її вік 560—565 млн років, у цю групу потрапляє наш полюс *ТЗ*. Полюси цієї групи розташовуються поблизу нижньосилурійської (440 млн років) ділянки референтної ТПМП, яка розрахована методом інтерполяції і не є надійною. Полюс 7 не можна віднести до жодної з груп. Полюси, розраховані за низькотемпературними компонентами *CLM-1* і *CLM-2*, як і полюси 4 та 5, тяжіють до пермсько-тріасового і силурійського сегментів ТПМП відповідно.

За результатами досліджень зразків з п'яти свердловин, що охоплюють волинську серію, було виділено щонайменше шість епізодів зміни полярності поля [Bakmutov et al., 2022], що узгоджуються з іншими даними по свердловинах з цього ж району [Глевасская и др., 2006]. Відносно невелика за розмірами Волинська магматична провінція навряд чи формувалася довше ніж 1 млн років. Зважаючи на оцінку кількості інверсій для періоду 560—545 млн років тому близько 15 на 1 млн років і навіть більше, накопичення трапів відбулося протягом не більше ніж за 0,5 млн років, що вказує на аномальну гіперактивність змін магнітного поля. Аномальна поведінка поля підтверджується низькими значеннями напруженості, яка була визначена на зразках волинських базальтів (2,6—13,0 мкТл). Розраховані величини віртуального дипольного моменту як по базальтах з

кар'єрів $((0,4-1,0) \cdot 10^{22} \text{ Am}^2)$, так і зі свердловин $((0,3-1,0) \cdot 10^{22} \text{ Am}^2)$ [Shcherbakova et al., 2020; Thallner et al., 2022], що майже на порядок нижче за величину сучасного геомагнітного поля (~50 мкТл) і узгоджується з низькими значеннями напруженості поля з інших районів Балтики і Лаврентії [Bono et al., 2019; Domeier et al., 2023].

Зважаючи на отримані нові дані про палеомагнітні полюси, частоту інверсій та аномально низьку напруженість в едіакарії, наші результати можна пояснити у рамках гіпотези, згідно з якою геомагнітне поле на межі докембрію та кембрію відрізнялося від геомагнітного поля більшості наступних епох, було аномальним і характеризувалося двома різними квазістабільними режимами генерації, які змінювали один одного. Чергування тривалих періодів панування аксіального дипольного поля з відносно короткочасними (тривалістю близько сотень тисяч років) епохами інверсуючого екваторіального (або середньоширотного) диполя відповідає теоретичним і модельним розрахункам. Обидві конфігурації визначаються комбінацією електричної провідності і в'язкості провідного флюїду і потужністю провідного шару. Ці параметри залежать від значень теплового потоку в ядрі та на межі ядро—мантія, складу, розміру та віку внутрішнього ядра, теплових властивостей мантії тощо, тобто від характеристик, які для геологічної історії Землі залишаються недостатньо з'ясованими.

Аномальне магнітне поле едіакарію може бути обумовлене ослабленням дипольної компоненти, і тоді виникає питання: якщо була така конфігурація поля, то чи можуть палеомагнітні полюси, розраховані для цього часового інтервалу, використовуватися для побудови адекватних палеогеографічних реконструкцій? Це також стосується тестування гіпотези геосинхронного осевого диполя, яка є основою для палеомагнітних реконструкцій дрейфу континентів.

Інша гіпотеза стосується феномену «кембрійського вибуху». При такому слабкому «геомагнітному захисті» магнітосфе-

ри Земля могла піддаватися сильному впливу ультрафіолетового випромінювання. Едіакарська біота містить найдавніші багатоклітинні організми, які еволюціонували за досить короткий період (575—541 млн років тому). Ймовірний зв'язок між аномальними величинами (конфігурацією) геомагнітного поля та еволюцією біоти розглядається в низці публікацій (див., наприклад, [Bono et al., 2019; Huang et al., 2024] і посилання в них), де зроблено висновки, що геомагнітні умови (у геологічному масштабі часу) можуть змінюватися досить швидко і радикально впливати на навколишнє середовище. Послання наднизького дипольного моменту та гіперактивного режиму генерації геомагнітного поля могло впливати на еволюцію життя в едіакарії через особливість геометрії поля під час центральної фази інверсій, коли магнітні полюси розташовані поблизу екватора. При такій конфігурації поля сонячне і космічне випромінювання буде набагато глибше проникати у верхні шари атмосфери та стимулювати магнітні бурі, поле збурень яких буде більшим відносно головного геомагнітного поля.

Список літератури

- Бахмутов В.Г., Поляченко Е.Б., Черкес С.И., Щербакowa В.В., Главацкий Д.В. Палеомагнетизм вендских траппов Вольны, юго-западная окраина Восточноевропейской платформы. Ч. 1: палеомагнитные направления и полюсы. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 6. С. 70—119. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251555>.
- Глевасская А.М., Кравченко С.Н., Косовский Ю.А. Магнитостратиграфия трапповой формации юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 121—130.
- Гожик П.Ф. (Ред.). (2013). *Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України у двох томах. (Т.1). Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України.* Київ: Логос, 637 с.
- Bakhmutov, V., Poliachenko, I., Cherkes, S., & Hlavatskyi, D. (2022). Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European Platform, part 2: magnetostratigraphy. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 3—23. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273638>
- Bono, R.K., Tarduno, J.A., Nimmo, F., & Cottrell, R.D. (2019). Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. *Nature Geoscience*, 12(2), 143—147. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0288-0>.
- Domeier, M., Robert, B., Meert, J.G., Kulakov, E.V., McCausland, P.J.A., Trindade, R.I.F., & Torsvik, T. H. (2023). The enduring Ediacaran paleomagnetic enigma. *Earth-Science Reviews*, 242, 10444. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104444>.
- Elming, S. A., Kravchenko, S. N., Layer, P., Rusakov, O. M., Glevasskaya, A. M., Mikhailova, N. P., & Bachtadse, V. (2007). Palaeomag-

Висновки. За результатами палеомагнітних досліджень трапів Волині та осадових порід Поділля підтверджується гіпотеза про аномальну поведінку геомагнітного поля в едіакарії з частою зміною полярності та дуже низькою напруженістю, майже на порядок нижчою за сучасну. Геомагнітне поле на межі докембрію та кембрію суттєво відрізнялося від поля більшості наступних епох фанерозою і характеризувалося наявністю квазістабільних режимів генерації, які змінювали один одного. Гіпотетично це можна пояснити процесами, що передували утворенню твердого внутрішнього ядра та геометрією магнітного поля Землі в періоди його наднизької інтенсивності. Це ставить під сумнів застосування гіпотези геоцентричного осьового диполя для інтерпретації палеомагнітних даних на границі едіакарію — кембрію, чим можна пояснити існування різних груп палеомагнітних полюсів і проблеми палеогеографічних реконструкцій для цього періоду. Такі «геомагнітні умови» (у геологічному масштабі часу) могли радикально впливати на навколишнє середовище і на еволюцію біоти.

- netism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. *Journal of the Geological Society*, 164(5), 969—982. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-163>.
- Huang, W., Tarduno, J.A., Zhou, T. et al. (2024). Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period. *Communications Earth & Environment*, 5, 207. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01360-4>.
- Nawrocki, J., Boguckiy, A., & Katinas, V. (2004). New Late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309—316.
- 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>.
- Thallner, D., Shcherbakova, V., Bakhmutov, V., Shcherbakov, V., Zhidkov, G., Poliachenko, I., & Biggin, A. (2022). New palaeodirections and palaeointensity data from extensive profiles through the Ediacaran section of the Volyn Basalt Province (NW-Ukraine). *Geophysical Journal International*, 231(1), 474—492. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac186>.

Ediacaran anomalous geomagnetic field: paleomagnetic data from the southwestern margin of the east European Platform

V.G. Bakhmutov, I.B. Poliachenko, S.I. Cherkes, D.V. Hlavatskyi, 2025

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

The results of palaeomagnetic studies of the Volyn trap formation and red beds of Podillia are presented. The geomagnetic field's anomalous behavior is confirmed, manifested in the discrepancy of paleomagnetic poles of the same age, a hyperactive mode of field polarity change, and extremely low values of field palaeointensity. These may be related to the problems of palaeogeographic reconstructions in the Ediacaran, as well as the drastic influence of geomagnetic conditions on the environment and biota evolution.

Key words: geomagnetic field, Ediacaran, Volyn traps.

References

- Bakhmutov V.G., Poliachenko I.B., Cherkes S.I., Shcherbakova V.V., & Hlavatskyi D.V. (2021). Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European platform. P 1: palaeomagnetic directions and poles. *Geofizicheskij Zhurnal*, 43(6), 70—119. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251555> (in Russian)
- Glevasskaya A.M., Kravchenko S.N., & Kosovskiy Y.A. (2006). Magnetostratigraphy of the trap formation of the southwestern margin of the East European Platform. *Geofizicheskij Zhurnal*, 28(5), 121—130 (in Russian).
- Gozhyk, P.F. (Ed.). (2013). *Stratigraphy of Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine*. (Vol. 1). *Stratigraphy of Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine*. Kyiv: Logos, 637 p. (in Ukrainian).
- Bakhmutov V., Poliachenko I., Cherkes S., & Hlavatskyi D. (2022). Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European Platform, part 2: magnetostratigraphy. *Geofizicheskij Zhurnal*, 44(6), 3—23. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273638>.
- Bono R.K., Tarduno J.A., Nimmo F., & Cot-

- trell R.D. (2019). Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. *Nature Geoscience*, 12(2), 143—147. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0288-0>.
- Domeier M., Robert B., Meert J.G., Kulakov E.V., McCausland P.J.A., Trindade R.I.F., & Torsvik T.H. (2023). The enduring Ediacaran paleomagnetic enigma. *Earth-Science Reviews*, 242, 10444. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104444>.
- Elming, S A., Kravchenko S N., Layer P., Ruskov O M., Glevasskaya A M., Mikhailova N P., & Bachtadse V. (2007). Palaeomagnetism and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. *Journal of the Geological Society*, 164(5), 969—982. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-163>.
- Huang W., Tarduno J.A., Zhou T. et al. (2024). Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period. *Communications Earth & Environment*, 5, 207. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01360-4>.
- Nawrocki J., Boguckij A., & Katinas V. (2004). New Late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309—316.
- 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>.
- Thallner, D., Shcherbakova V., Bakhmutov V., Shcherbakov V., Zhidkov G., Poliachenko I., & Biggin A. (2022). New palaeodirections and palaeointensity data from extensive profiles through the Ediacaran section of the Volyn Basalt Province (NW-Ukraine). *Geophysical Journal International*, 231(1), 474—492. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac186>.