

DOI: [10.30970/gpc.2026.1.5215](https://doi.org/10.30970/gpc.2026.1.5215);

УДК 551.791:624.131.23:551.343:550.42

## Ритмічна будова перигляціальної лесово-грунтової серії плейстоцену та її роль у міграції мікроелементів

Андрій Богуцький<sup>1</sup> ([orcid.org/0000-0002-9958-926X](https://orcid.org/0000-0002-9958-926X)), Олена Томенюк<sup>1,2\*</sup> ([orcid.org/0000-0002-4638-0585](https://orcid.org/0000-0002-4638-0585)), Петро Волошин<sup>1</sup> ([orcid.org/0000-0003-4193-6705](https://orcid.org/0000-0003-4193-6705))

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка,

<sup>2</sup> Інститут українознавства ім. І. Крип'якевича НАН України;

\* [olena.tomeniuk@lnu.edu.ua](mailto:olena.tomeniuk@lnu.edu.ua)

**Анотація.** Досліджено роль ритмічної будови перигляціальної лесово-грунтової серії плейстоцену у формуванні закономірностей вертикальної міграції мікроелементів на прикладі опорного розрізу Бояничі (Волинська височина). Лесово-грунтова товща потужністю понад 20 м представлена чергуванням лесових, палеоґрунтових і палеокріогенних горизонтів, що відображають зміну палеогеографічних умов плейстоцену. Комплекс досліджень передбачав літолого-стратиграфічний аналіз, визначення інженерно-геологічних властивостей (гранулометричний склад, щільність, пористість тощо) та геохімічне вивчення вмісту мікроелементів за розрізом.

Встановлено, що лесові горизонти (MIS 2, MIS 6, MIS 10) характеризуються підвищеною пористістю (0,70–1,22), нижчою щільністю (1,35–1,83 г/см<sup>3</sup>) і переважанням пилюватої фракції, що зумовлює їхню високу проникність і транзитну роль у міграції мікроелементів. Натомість палеоґрунтові та палеокріогенні горизонти (зокрема підгоризонт соліфлюкції 2a, горизонти викопних ґрунтів 3, 5, 7, 9 і 11) відзначаються підвищеним вмістом глинистої фракції, більшою щільністю та зниженою пористістю, що сприяє формуванню геохімічних бар'єрів і зон акумуляції мікроелементів. У межах цих горизонтів зафіксовано локальні максимуми концентрацій літофільних (Ti, Zr, Nb) та більш мобільних елементів (Mn, Zn, Cu, Pb).

Показано, що найефективнішими бар'єрами є луцький (MIS 9) і сокальський (MIS 11) викопні ґрунти, для яких характерні максимальні значення щільності (до 2,08 г/см<sup>3</sup>) і мінімальні коефіцієнти пористості (до 0,474). Водночас соліфлюкційні та оглеєні підгоризонти формують комбіновані сорбційно-редокс-бар'єри. Загалом вертикальна міграція мікроелементів має ритмічний, дискретний характер і підпорядковується чергуванню проникних і бар'єрних горизонтів.

Отримані результати засвідчують, що ритмічна будова лесово-грунтової серії є ключовим чинником диференціації геохімічного поля та контролює локалізацію зон акумуляції мікроелементів. Встановлені закономірності мають важливе значення для інтерпретації природного геохімічного фону, оцінки екологічних ризиків і прогнозування міграції забруднювальних речовин у приповерхнево-геологічному середовищі.

**Ключові слова:** перигляціал; лесово-грунтова серія; міграція мікроелементів; ритміка природних процесів; плейстоцен; екологічні ризики.



## Rhythmic structure of a periglacial Pleistocene loess-palaeosol sequence and its role in trace element migration

Andriy Bogucki<sup>1</sup> (orcid.org/0000-0002-9958-926X), Olena Tomeniuk<sup>1,2\*</sup> (orcid.org/0000-0002-4638-0585), Petro Voloshyn<sup>1</sup> (orcid.org/0000-0003-4193-6705)

<sup>1</sup> Ivan Franko National University of Lviv,

<sup>2</sup> I. Krypiakevych Institute of Ukrainian Studies of National Academy of Sciences of Ukraine;

\*olena.tomeniuk@lnu.edu.ua

**Abstract.** This study examines the role of the rhythmic structure of a periglacial Pleistocene loess-palaeosol sequence in controlling patterns of vertical trace element migration, using the Boyanychi key section (Volhynian Upland) as a case study. The loess-palaeosol sequence, exceeding 20 m in thickness, comprises an alternation of loess, palaeosol and palaeocryogenic horizons, reflecting changes in Pleistocene palaeogeographical conditions. The methodological framework integrates lithostratigraphic analysis, determination of engineering-geological properties (grain-size distribution, bulk density, porosity, etc.), and geochemical profiling of trace element concentrations throughout the section.

The loess horizons (MIS 2, MIS 6, MIS 10) are characterised by relatively high porosity (0.70–1.22), lower bulk density (1.35–1.83 g/cm<sup>3</sup>), and a predominance of silt-sized particles, which together account for their high permeability and their role as pathways for trace element migration. In contrast, palaeosol and palaeocryogenic horizons (including the solifluction sub-horizon 2a and palaeosol horizons 3, 5, 7, 9 and 11) exhibit higher clay contents, increased bulk density and reduced porosity, thereby promoting the development of geochemical barriers and zones of trace element accumulation. Within these horizons, local maxima of both lithophile elements (Ti, Zr, Nb) and more mobile elements (Mn, Zn, Cu, Pb) have been identified.

The Lutsk (MIS 9) and Sokal (MIS 11) palaeosols are shown to represent the most effective barriers, as evidenced by their highest bulk density values (up to 2.08 g/cm<sup>3</sup>) and lowest porosity coefficients (down to 0.474). In addition, solifluctional and gleyed sub-horizons act as combined sorption-redox barriers. Overall, vertical trace element migration exhibits a rhythmic and discontinuous pattern governed by the alternation of permeable and barrier horizons.

The results demonstrate that the rhythmic organisation of the loess-palaeosol sequence is a key factor in the differentiation of the geochemical field and exerts a primary control on the localisation of trace element accumulation zones. These findings are important for interpreting natural geochemical backgrounds, assessing environmental risks, and predicting contaminant migration within near-surface geological environments.

**Keywords:** periglacial; loess-palaeosol sequence; trace element migration; rhythmicity of natural processes; Pleistocene; environmental risks.

**Вступ.** Перигляціальна лесово-грунтова серія плейстоцену є одним із найінформативніших архівів палеогеографічних, палеокліматичних і геохімічних умов розвитку приповерхневого геологічного середовища Волино-Подільської височини та Передкарпаття – модельних регіонів для вивчення циклічності природних умов упродовж плейстоцену (Богущий та ін., 2021, 2023). Лесово-грунтова серія вкриває досліджуваний регіон майже суцільним плащем потужністю до 25 м і більше. Її ритмічна будова, зумовлена чергуванням холодних і відносно теплих фаз плейстоцену, відображає закономірності акумуляції відкладів, ґрунтоутворення та діагенетичних перетворень, однак роль цієї ритміки

у формуванні вертикальної міграції мікроелементів залишається недостатньо вивченою.

Найвні дослідження зосереджені здебільшого на стратиграфічних, літологічних і палеопедологічних аспектах вивчення лесово-грунтових товщ, тоді як геохімічні процеси, пов'язані з міграцією та акумуляцією мікроелементів у межах окремих ритмів, часто розглянуто фрагментарно. Водночас саме ритмічна організація відкладів визначає зміну фізико-хімічних властивостей середовища (гранулометричний склад, щільність природного ґрунту, вміст органічної речовини, окисно-відновний режим тощо), які контролюють інтенсивність і напрям міграції мікроелементів.

Актуальність дослідження також зумовлена зростаючою потребою у коректному розмежуванні природних і техногенних геохімічних аномалій у приповерхневих відкладах, особливо в умовах сучасного антропогенного навантаження. Розуміння закономірностей міграції мікроелементів у плейстоценових лесово-грунтових серіях є необхідним для раціональної інтерпретації сучасного геохімічного фону, оцінки екологічних ризиків і прогнозування можливого впливу забруднювальних речовин на ґрунти та підземні води.

Отже, дослідження ритмічної будови перигляціальної лесово-грунтової серії плейстоцену та її ролі у міграції мікроелементів є актуальним як з позицій фундаментальної палеогеографії й геохімії, так і з огляду на прикладні завдання екологічного моніторингу та інженерно-геологічного освоєння територій.

Історія досліджень лесово-грунтової серії Волино-Поділля і Передкарпаття охоплює понад століття. За цей час доволі детально розроблено її стратиграфію та хронологію. Плейстоценова лесово-грунтова серія має ритмічну будову і складається з низки самостійних лесових, палеоґрунтових та палеокріогенних горизонтів, що покладено в основу створення регіональної стратиграфічної схеми і її кореляції зі стратиграфічними схемами прилеглих територій (Богуцький та ін., 1998, 2021). У цьому регіоні виділено й досліджено низку опорних розрізів лесово-грунтової серії з використанням сучасних методів вивчення плейстоцену. Найважливішими опорними розрізами є Коршів, Бояничі, Торчин, Горохів, Волочиськ, Ванжулів, Великий Глибочок, Пронятин, Ігровиця, Скала-Подільська, Шаровечка, Збараж, Колодіїв, Галич та ін.

Питання проникнення мікроелементів через породи лесово-грунтової серії практично не розглядали, хоча геохімічний склад порід вивчали у багатьох розрізах території досліджень та інших районів лесового поясу Європи (Boguckij et al., 2006; Boguckij et al., 2009; Bonchkovskiy et al., 2023; Bosq et al., 2020; Jordanova et al., 2024; Łacka et al., 2007; Skurzyński et al., 2019, 2020, 2024; Sterckeman, 2006) та інших регіонів світу (Chen et al., 2008; Li et al., 2016; Yang et al., 2008; Zhang et al., 2018).

Метою статті є виявлення та аналіз закономірностей вертикальної міграції мікроелементів у межах ритмічно побудованої перигляціальної лесово-грунтової серії плейстоцену на прикладі опорного розрізу Бояничі, розташованого у межах Волинської височини, з урахуванням стратиграфічної, літологічної та інженерно-геологічної неоднорідності окремих ритмів і горизонтів.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких основних завдань:

– Схарактеризувати стратиграфічну будову лесово-грунтової серії плейстоцену опорного розрізу Бояничі з виділенням основних лесових, палеоґрунтових і палеокріогенних горизонтів.

– Проаналізувати літологічні та інженерно-геологічні властивості порід у межах кожного стратиграфічного підрозділу, зокрема гранулометричний склад, щільність, пористість і ознаки вторинних перетворень, що впливають на фільтраційні та сорбційні характеристики середовища.

– Визначити вміст і вертикальний розподіл основних мікроелементів у породах лесово-грунтової серії та встановити їхні концентраційні рівні в межах окремих ритмів.

– Оцінити особливості міграції й акумуляції мікроелементів у лесових і палеоґрунтових горизонтах з урахуванням змін фізико-хімічних умов осадонакопичення, ґрунтоутворення та діагенезу.

– З'ясувати роль ритмічної будови лесово-грунтової серії у формуванні геохімічних бар'єрів і зон підвищеної концентрації мікроелементів.

– Обґрунтувати значення отриманих результатів для інтерпретації природного геохімічного фону плейстоценових відкладів і оцінки потенційних шляхів міграції мікроелементів у сучасному приповерхневому геологічному середовищі.

**Методика досліджень.** Матеріалами дослідження слугували породи перигляціальної лесово-грунтової серії плейстоцену опорного розрізу Бояничі, розташованого в межах Волинської височини (див. рис. 1). Розріз є репрезентативним для регіону та характеризується чітко вираженою ритмічною будовою, зумовленою чергуванням лесових, палеоґрунтових і палеокріогенних горизонтів, що відображають зміну палеогеографічних умов плейстоцену.

*Польові дослідження.* Польові роботи передбачали детальний літолого-стратиграфічний опис розрізу з виокремленням основних горизонтів і підгоризонтів лесово-грунтової серії. Під час опису фіксували потужність шарів, колір, текстуру, структуру, наявність карбонатних новоутворень, особливостей педогенезу, вторинних перетворень та ознак кріогенних процесів, зокрема похованих діяльних шарів і псевдоморфоз по полігонально-жильних льодах. Проби відбирали пошарово з урахуванням стратиграфічної неоднорідності та потужностей ритмів, з метою забезпечення репрезентативності геохімічного аналізу.

*Літологічні та інженерно-геологічні дослідження.* Літологічні дослідження спрямовані на встановлення гранулометричного складу порід та їхньої текстурно-структурної організації тощо. Інженерно-геологічні властивості відкладів оцінювали за показниками щільності природного ґрунту та коефіцієнта пористості, які мають визначальний вплив на фільтраційні та сорбційні процеси у приповерхневих відкладах. Отримані дані використовували для аналізу умов проникнення й перерозподілу мікроелементів у межах окремих стратиграфічних горизонтів.

*Геохімічні методи.* Геохімічні дослідження передбачали визначення вмісту основних мікроелементів у відібраних пробах порід. Аналізи виконували за стандартними методиками, прийнятими у геохімічних дослідженнях пухких відкладів, із дотриманням вимог до підготовки проб, що забезпечувало

співставлення результатів. Отримані концентрації мікроелементів аналізували за розрізом з метою виявлення закономірностей їхнього поширення, зон акумуляції та можливих геохімічних бар'єрів.

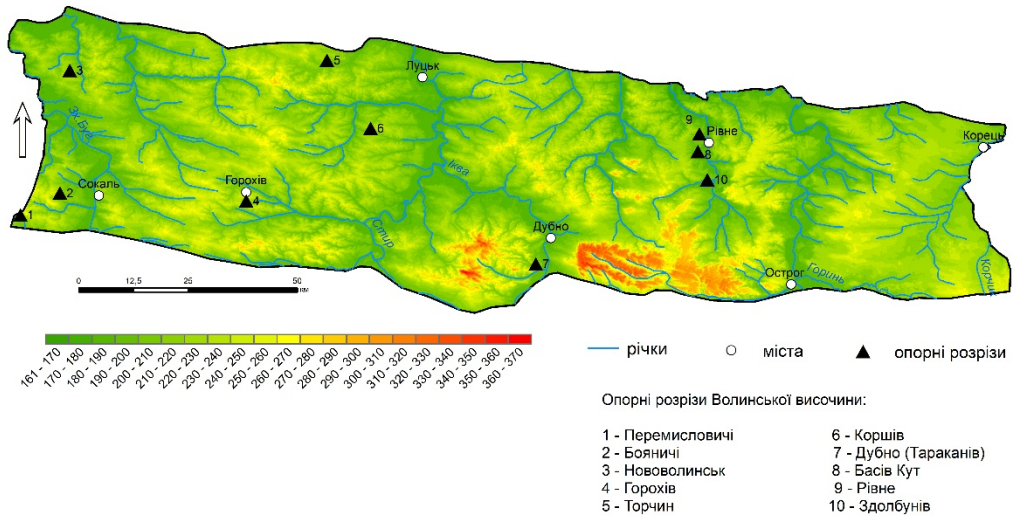


Рис. 1. Розташування опорного розрізу Бояничі серед інших опорних розрізів лесово-грунтової серії Волинської височини (карту побудовано за даними SRTM (Jarvis et al., 2008), межі Волинської височини – за Т. Новаком (2020))

Fig. 1. Location of the Boyanychi key section among other reference sections of the loess-palaeosol sequences of the Volhynian Upland (map based on SRTM data (Jarvis et al., 2008); boundaries of the Volhynian Upland after Novak (2020))

*Камеральна обробка та інтерпретація результатів.* Обробка отриманих результатів передбачала порівняльний аналіз вмісту мікроелементів у межах різних літолого-стратиграфічних підрозділів, а також зіставлення геохімічних показників з літологічними та інженерно-геологічними характеристиками порід. Особливу увагу приділяли встановленню зв'язків між ритмічною будовою лесово-грунтової серії та інтенсивністю міграції мікроелементів. Інтерпретацію результатів здійснено з урахуванням сучасних уявлень про геохімічні процеси у перигляціальних умовах і приповерхневих відкладах плейстоцену.

**Результати.** Опорний розріз Бояничі (див. рис. 1) розташований у західній частині Волинської височини у великому механізованому кар'єрі з видобутку цегельної сировини (рис. 2) для цегельних заводів, що у м. Сокаль Львівської обл. Розріз Бояничі є стратотипом сокальського викопного ґрунту (MIS 11), розвиненого на морені зледеніння сян 2 (MIS 12), а також бояницького палеокріогенного етапу (початок MIS 8) – найдавнішого у лесово-грунтовій серії України (Tomeniuk et al., 2022a, 2022b). Загальна потужність лесово-грунтової серії у кар'єрі перевищує 20 м. Результати дослідження розрізу Бояничі широко опубліковано (Boguckij et al., 1994; Bogucki et al., 1995; Богуцький та ін., 2014, 2021; Kusiak et al., 2012; Главацький та ін., 2016). Детальний опис розрізу Бояничі наведено, зокрема, й у монографічному дослідженні А. Богуцького, П. Волошина

і О. Томенюк (Богущий та ін., 2021). Нижче наводимо скорочений його опис для кращого сприйняття питання проникнення мікроелементів крізь ритмічну будову товщі плейстоценових відкладів.



Рис. 2. Загальний вигляд кар'єру у с. Бояничі. Фото А. Богущого  
 Fig. 2. General view of the quarry in the village of Boyanuchi. Photo by A. Bogucki

**Сучасний ґрунт, чорноземний (1, MIS 1).**

Гумусовий ( $A_1$ ) горизонт має потужність 0,5 м, складений темно-сірими супісками. Перехід поступовий.

Перехідний ( $A_1/B$ ) горизонт має потужність 0,4 м, складений легкими сірими та жовтуватато-сірими супісками. Перехід поступовий.

Горизонт  $B_{\text{карб., кротов.}}$  потужністю 0,8 м складений жовтуватато-бурими супісками. Нижній контакт ясний, за зміною кольору порід. Він фіксований також скупченням карбонатних конкрецій-дутиків до 5,0 см діаметром.

**Верхній горизонт верхньоплейстоценових лесів (2, MIS 2, бузький).** Морфологічно неоднорідний і розділений на низку підгоризонтів (зверху вниз).

*Підгоризонт лесів (2e)* супіщаний, простежується спорадично. Його потужність – до 0,5 м.

*Красилівський підгоризонт (2d)* є похованим діяльним шаром фінальноплейстоценового палеокріогенного етапу. Складений супісками голубувато-сірими, легкими, щільними, макропористими, просякнутими  $\text{CaCO}_3$ , з великою кількістю дутиків до 3,0 см у діаметрі. Нижній контакт ясний. Він фіксований зміною кольору і складнохвилястими смугами бурого озалізнєння.

Глибина, м  
 0,0–1,7

1,7–6,3

1,7–2,7

*Верхній підгоризонт верхнього горизонту верхньоплейстоценових лесів (2г)* складений супісками палевими, макропористими, однорідними. Нижній контакт хвилястий, підкреслений смугами бурого озалізнення і сизого оглеєння. 2,7–3,3

*Рівненський підгоризонт (2в)* складений супісками макропористими, щільними, пліквативно деформованими, з псевдоміцелієм, сірими, інколи з голубуватим відтінком. Нижній контакт поступовий. 3,3–3,7

*Нижній підгоризонт верхнього горизонту верхньоплейстоценових лесів (2б)*. Леси палеві, ділянками сірі, макропористі, щільні, неясношаруваті. Перехід за появою пліквативно деформованих лінзочок дубнівських суглинків. 3,7–5,2

*Підгоризонт наддубнівської соліфлюкції (2а)* виділяється чітко (за літологічними особливостями, морфологією і закипанням з соляною кислотою). 5,2–6,3

**Дубнівський ґрунт (3, MIS 3, витачівський)** гомогенно-глейовий. Складений суглинками голубувато-сірими (сизими), щільними, озалізненими, які в основній масі не взаємодіють з соляною кислотою. Зафіксовано плями і смуги бурого озалізнення, а також новоутворення типу кілець Лізеганга. Нижній контакт складнохвилястий, зафіксований смугами бурого озалізнення потужністю до 3,0 см, що переходять в ортзанди (рис. 3). 6,3–6,8 (±0,1)



Рис. 3. Дубнівський викопний ґрунт у розрізі Бояничі. Фото А. Богуцького  
Fig. 3. The Dubno palaeosol in the Boyanuchi section. Photo by A. Bogucki

*Нижній горизонт верхньоплейстоценових лесів (4, MIS 4, удайський)* складений суглинками. Вони карбонатні, жовтувато-коричневі (до сірих) у нижній половині шару, 6,8–7,8

червонувато-коричневі – у верхній. Ділянками суглинки сизі внаслідок оглеєння.

**Горохівський викопний ґрунтовий комплекс (5, MIS 5, прилуцький).** Западинний варіант (з потужним елювіальним ( $A_2$ ) горизонтом). Має добре диференційований профіль. 7,8–9,6 (і більше)

Гумусовий ( $A_1$ ) горизонт потужністю 0,6 м складений суглинками темно-сірими з червонуватим відтінком, щільними, безструктурними, які взаємодіють з соляною кислотою. Шар порушений соліфлюкційними процесами. Перехід ясний, за зміною кольору порід, інколи язичкуватий (з космами).

Елювіальний ( $A_2$ ) горизонт має потужність 0,15–0,20 м. Це біляста “пудра”-присипка з коричневим відтінком, безкарбонатна.

Ілювіальний ( $B$ ) горизонт має потужність 1,0–1,5 м і морфологічно неоднорідний. Перехід ясний.

**Лесовий горизонт середнього плейстоцену (6, MIS 6, тясминський)** морфологічно й генетично неоднорідний і розділений на низку підгоризонтів. Ділянками простежуються сліди криогенезу, спостерігаються плікативні (соліфлюкційні) деформації. 9,6–12,6

**Коршівський викопний ґрунтовий комплекс (7, MIS 7, кайдацький)** (рис. 4). Коршівський комплекс складений двома ґрунтами, які відповідають двом фазам ґрунтоутворення коршівського часу. 12,6–15,7



Рис. 4. Коршівський викопний ґрунтовий комплекс у розрізі Бояничі. Фото А. Богуцького  
 Fig. 4. The Korshiv palaeosol complex in the Boyanychi section. Photo by A. Bogucki

**Ґрунт другої фази ґрунтоутворення** (верхній, молодший, чорноземоподібний – 7б). 12,6–14,5

Гумусовий ( $A_1$ ) горизонт потужністю 1,3 м складений суглинками темно-сірими, зверху світлішими (до сірих), знизу – з жовтувато-бурим відтінком. Суглинки макропористі,

безструктурні, не взаємодіють з соляною кислотою, інтенсивно біогенно перероблені. Контакт язичуватий (косматий). Язички-косми глибиною до 1,0 м і більше регулярно (через 1,3 м) відходять від гумусового горизонту в підстильні шари.

Горизонт *B* потужністю 0,6 м складений порівняно однорідними жовтими суглинками з інтенсивною біогенною переробленістю (багато червоточин – “леопардовість”, кротовин). Перехід ясний, фіксований зміною кольору, смугами оглеєння й озалізнєння.

*Грунт першої фази коршівського ґрунтоутворення* (нижній, старший – 7а). 14,5–15,7

Гумусовий (*A*<sub>1</sub>) горизонт потужністю 0,3 м представлений щільними, однак макропористими суглинками, однорідними, безструктурними. Перехід за зміною кольору, щільності й структури порід, загалом ясний.

Ілювіальний (*B*) горизонт потужністю 0,9 м представлений червонувато-жовтими, щільними, оструктуреними (грудкуватими) суглинками, з плямами бурого озалізнєння і сизого оглеєння до 10,0 см у діаметрі. Перехід ясний, за зміною щільності, структури порід, появою смуг бурого озалізнєння.

*Лесовий горизонт середнього плейстоцену* (8, MIS 8, 15,7–16,8

**дніпровський**) морфологічно неоднорідний. Верхні 0,5 м складені суглинками щільними, порівняно однорідними, жовтувато-сірими, лесоподібними. Це материнська порода коршівського ґрунтоутворення. Нижні 0,6 м шару – тонкошарувата пачка, яка складається з супісків оглеєних, сизих, що не взаємодіють із соляною кислотою, озалізнєних, із залістості-мангановими новоутвореннями, і пісків дрібно- й тонкозернистих, білястих (пудра), які, можливо, є матеріалом горизонту *A*<sub>2</sub> луцького викопного ґрунту. Потужність супіщаних прошарків становить максимально 10 см, пісків – 1–2 см. Нижні 0,6 м шару можна розглядати як похований діяльний шар *бояницького* палеокріогенного етапу. Нижній контакт ясний. Добре видно, що білястий матеріал проникає в горизонт *B* луцького ґрунту.

*Луцький викопний ґрунт* (9, MIS 9, **потягайлівський**) 16,8–17,6

представлений лише ілювіальним (*B*) горизонтом. Ілювіальний (*B*) горизонт луцького ґрунту складений суглинками щільними, червонувато-коричневими, оструктуреними, грудкуватими, озалізнєними, з численними залістості-мангановими новоутвореннями. Суглинки порушені соліфлюкцією, найінтенсивніше у верхній частині шару.

*Лесовий горизонт середнього плейстоцену* (10, MIS 10, 17,6–18,0

**орельський**) складений суглинками. Вони порівняно однорідні, світло-жовті, з плямами оглеєння і поодинокими гніздами піску до 20 см у діаметрі, часто соліфлюкційно деформовані.

*Сокальський викопний ґрунт* (11, MIS 11, **завадівський**) 18,0–18,4

розвинутий на морені й має чіткий генетичний профіль.

Гумусовий ( $A_1$ ) горизонт потужністю 0,2 м складений суглинками інтенсивно соліфлюкційно порушеними, сірими, глейовими, унаслідок чого вони мають голубуватий відтінок.

Ілювіальний ( $B$ ) горизонт потужністю 0,2 м складений червонувато-коричневими опідзоленими суглинками, щільними, серед яких інколи трапляються включення уламкового матеріалу.

**Морена (окська, сян 2) (12, MIS 12).** Колір верхньої частини морени червонувато-бурий, ближче до підошви – зеленкувато-сірий. Морена суглиниста, піщаниста, містить гнізда і тріщинні (по тріщинах) включення різнозернистих бурих пісків до 0,20–0,30 м потужністю. Включення крупноуламкового (гравійного, галечникового, валунного та ін.) матеріалу простежуються по всьому шару, найбільша кількість матеріалу тяжіє до піщаних ділянок морени. У складі включень – кремень, кварц, кварцити, гнейси, різної зернистості та ступеня звітрілості граніти, залишки фауни (белемніти та ін.) тощо. Уламковий матеріал різної обкатаності, діаметр включень – до 0,4 м і більше. Максимальні розміри валунів перевищують 1,0 м у діаметрі.

**Горизонт середнього плейстоцену (12, MIS 12, тилігульський).** У горизонті можна виокремити низку шарів різного гранулометричного складу.

*Піски* бурі кварцові, дрібнозернисті, шаруватість лінзо-подібно-хвиляста. По нижньому контакту потужна (понад 3,0 см) смуга бурого озалізнання.

*Супіски* палеві, у нижній частині сірі, шаруваті, з тонкими (близько 1,0 см) піщаними прошарками.

*Піски* білі, сірі, косошаруваті, різнозернисті. У тонких (до 5,0–7,0 см) прошарках і лінзах вони грубозернисті з включеннями кварцу, кременю і кристалічних порід тощо до 3,0 см у поперечнику.

*Глинисті піски і легкі супіски* коричневого кольору, у нижній частині з включеннями крейди (у тому числі добре обкатаними), кварцу, кварцитів, кременів, кристалічного матеріалу тощо до 20,0 см у діаметрі. Багато кристалічних включень сильно звітрілі. Залягають глинисті піски на нерівній поверхні крейди.

З глибини 21,4 м залягають **верхньокрейдові мергелі**. Їхня поверхня дуже нерівна, що мало значний вплив на збереження і потужності морени й підморенних пісків.

Вважаємо за доцільне наголосити на комплексному вивченні інженерно-геологічних властивостей порід, включаючи їхні гранулометричний склад, пористість, показники щільності, вологості, просадочності тощо (рис. 5, Богущий та ін., 2014).

Коротко схарактеризуємо закономірні зміни показників інженерно-геологічних властивостей порід лесово-грунтової серії Боянич, які безпосередньо впливають на міграцію через лесово-грунтову пачку мікроелементів.

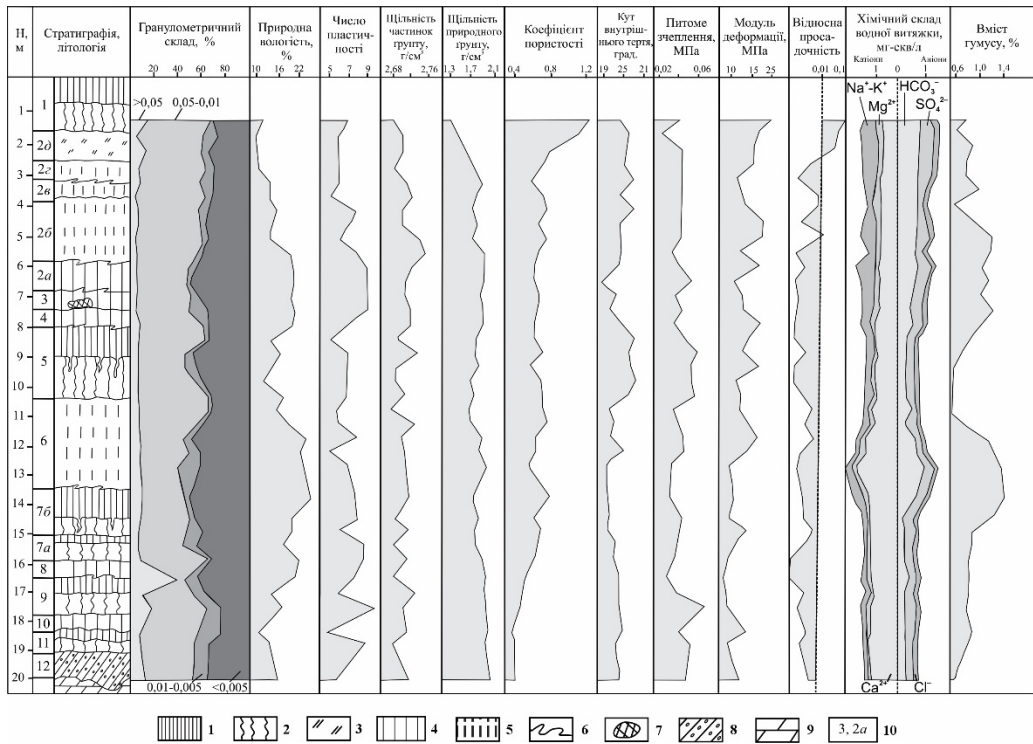


Рис. 5. Інженерно-геологічні властивості порід лесово-грунтової серії опорного розрізу Бояничі: 1 – горизонти А сучасних і викопних ґрунтів; 2 – горизонти В сучасних і викопних ґрунтів; 3 – горизонти оглеєння; 4 – леси суглинисті; 5 – леси супіщані; 6 – пликативні деформації; 7 – лінзи інтенсивно гумусованих суглинків (гіття); 8 – морена; 9 – мергелі верхньої крейди; 10 – номер стратиграфічного горизонту, підгоризонту (відповідно до стратиграфічної схеми (Богуцький та ін., 2021)); 11 – піски з включеннями уламкового матеріалу

Fig. 5. Engineering-geological properties of deposits within the loess-palaeosol sequence of the Boyanychi key section: 1 – A horizons of modern and palaeosols; 2 – B horizons of modern and palaeosols; 3 – gley horizons; 4 – loamy loess; 5 – sandy loess; 6 – plicative deformation structures; 7 – lenses of intensely humified loam (gyttja); 8 – moraine; 9 – Upper Cretaceous marls; 10 – stratigraphic horizon and sub-horizon numbers (according to the stratigraphic scheme of Bogucki et al., 2021); 11 – sands with inclusions of clastic material

Гранулометричний склад лесових горизонтів середнього плейстоцену (MIS 6 і MIS 10) загалом подібний до складу верхнього горизонту верхньоплейстоценових лесів (MIS 2) і не демонструє суттєвих відмінностей. Для лесового горизонту MIS 2 характерні середні значення: вміст піщаної фракції становить близько 6 %, пілуватої – 59 %, глинистої – 22 %. У межах лесового горизонту MIS 8 відзначається тенденція до зменшення частки пілуватих фракцій (до 53 %) за одночасного зростання вмісту глинистих частинок (до 29 %). Підгоризонти соліфлюкції та оглеєння, що входять до складу зазначених товщ, також характеризуються підвищеною глинистістю.

Ґрунти коршівського викопного ґрунтового комплексу та луцького викопного ґрунту за гранулометричними показниками близькі до горохівського викопного

грунтового комплексу. Вони містять у середньому 6–13 % піщаної фракції, 46–51 % пилуватої та 25–27 % глинистої.

Сокальський викопний ґрунт, на відміну від інших досліджених палеопедогенних утворень, характеризується підвищеним вмістом пилуватих частинок (близько 55 %) і водночас зниженим вмістом глинистої фракції (приблизно 19 %).

Загалом у гранулометричному складі лесово-грунтової товщі чітко простежується закономірність, що полягає у підвищеній пилуватості та зниженій глинистості лесових горизонтів, тоді як викопні ґрунти, ґрунтові комплекси та соліфлюкційні горизонти відзначаються відносно меншою часткою пилуватих і більшою часткою глинистих фракцій.

*Щільність природного ґрунту* в межах дослідженого розрізу варіює у широких межах – від 1,35 до 2,13 г/см<sup>3</sup>, демонструючи суттєві відмінності між різновіковими лесовими, палеоґрунтовими та палеокріогенними горизонтами. Найменші значення щільності (1,35–1,83 г/см<sup>3</sup>) характерні для маловологих і відносно пухких ґрунтів верхнього горизонту верхньоплейстоценових лесів, а також лесового горизонту (MIS 6) середнього плейстоцену. Натомість підвищені показники (1,94–1,96 г/см<sup>3</sup>) притаманні нижньому горизонту верхньоплейстоценових лесів (MIS 4) і лесовому горизонту (MIS 8) середнього плейстоцену.

Ґрунти горохівського викопного ґрунтового комплексу характеризуються нижчою щільністю, порівняно з нижнім горизонтом верхньоплейстоценових лесів (1,83 г/см<sup>3</sup>) і ґрунтами коршівського викопного ґрунтового комплексу (1,93 г/см<sup>3</sup>). Найвищі значення щільності (2,01–2,08 г/см<sup>3</sup>) зафіксовано для луцького та сокальського викопних ґрунтів. Максимальне абсолютне значення (2,13 г/см<sup>3</sup>) встановлено у горизонті (MIS 12) середнього плейстоцену, перекритому окською мореною. Для ґрунтів соліфлюкційних горизонтів характерні значення щільності у межах 1,92–1,95 г/см<sup>3</sup>.

Значення *коефіцієнта пористості* тісно узгоджуються з показниками щільності та характеризуються значною варіабельністю в межах розрізу. Вони достатньо чітко відображають мікстратиграфічну будову лесово-грунтової товщі. Найвищі значення коефіцієнта пористості (0,70–1,22) притаманні лесам верхніх горизонтів верхнього (MIS 2) та середнього (MIS 6) плейстоцену, сформованим в умовах сухого та холодного клімату, що зумовило їхній підвищений ступінь недоущільнення. Для порід нижнього горизонту верхньоплейстоценових лесів, а також лесового горизонту (MIS 8) середнього плейстоцену значення коефіцієнта пористості не перевищують 0,700.

Ґрунти горохівського та коршівського викопних ґрунтових комплексів характеризуються коефіцієнтами пористості 0,688 і 0,720 відповідно. Найменші значення цього показника встановлено для луцького та сокальського викопних ґрунтів, де вони становлять 0,566 і 0,474, відповідно.

Деякі відхилення від виявлених закономірностей можуть внести різновікові псевдоморфози по полігонально-жильних льодах, які зазвичай заповнені найпухкішим матеріалом і можуть відігравати роль своєрідних дренажних каналів.

Під час проведення Львівською геологорозвідувальною експедицією еколого-геологічного картографування низки листів Львівської обл. масштабу 1:200 000

нам вдалось пошарово відібрати зразки у пробуреній свердловині з усього розрізу Бояничі на вміст мікроелементів (вони проаналізовані напівкількісним спектральним методом у лабораторії Львівської геологорозвідувальної експедиції). Результати відображено на рис. 6. Ці дані є новими.

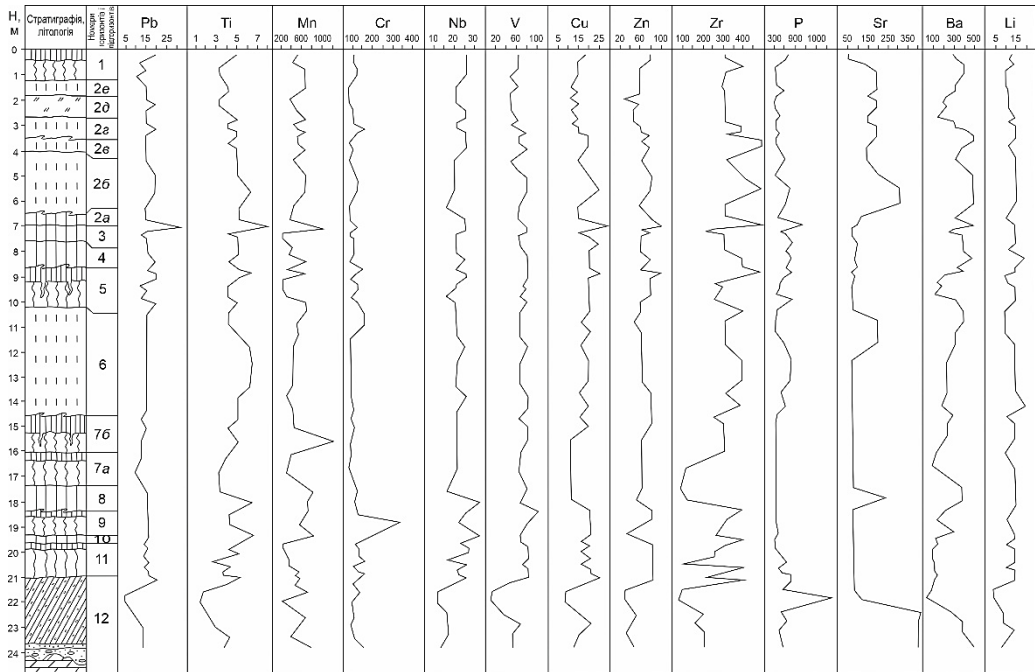


Рис. 6. Розподіл мікроелементів по горизонтах лесово-грунтової серії опорного розрізу Бояничі (Волинська височина). Умовні позначення див. на рис. 5

Fig. 6. Distribution of trace elements across the horizons of the loess-palaeosol sequence in the Boyanychi key section (Volhynian Upland). For legend, see Fig. 5

**Обговорення.** Отримані результати дослідження засвідчують, що ритмічна будова лесово-грунтової серії розрізу Бояничі визначає просторову диференціацію фільтраційних властивостей порід і формування системи геохімічних бар'єрів, які контролюють вертикальну міграцію мікроелементів. Погоризонтне зіставлення профілів інженерно-геологічних показників (див. рис. 5) із розподілом мікроелементів (див. рис. 6) демонструє, що лесові горизонти виконують переважно *транзитну функцію*, тоді як палеоґрунтові та криогенно перетворені горизонти – *аккумулятивно-бар'єрну*.

Леси верхніх горизонтів верхнього (MIS 2) та середнього (MIS 6) плейстоцену (горизонти 2d, 2b, 6) характеризуються підвищеною пористістю (0,70–1,22), відносно низькою щільністю (1,35–1,83 г/см<sup>3</sup>) і домінуванням пилюватої фракції (~59%). Такий комплекс властивостей зумовлює їхню підвищену проникність і сприяє інфільтрації розчинів без істотного затримання мікроелементів. Це підтверджується вирівняним характером профілів більшості елементів (Pb, Ti, Mn, Cr, Zn) у межах зазначених горизонтів, без чітко виражених локальних максимумів (див. рис. 6).

Натомість у межах підгоризонту 2а, що містить ознаки соліфлюкції та оглеєння, та горизонту 3 (дубнівський ґрунт) спостерігається зростання частки глинистої фракції (до ~29%), зниження пористості, порівняно з покривними лесами, та підвищення щільності. Це супроводжується формуванням локальних максимумів концентрацій низки елементів (зокрема Mn, Zn, Cu), що вказує на розвиток *комбінованих сорбційного та редокс-бар'єрів*. Аналогічні закономірності простежуються у межах горизонту 5 (горохівський викопний ґрунтовий комплекс), де поєднання підвищеної глинистості та ознак педогенезу зумовлює акумуляцію як літофільних (Zr, Nb), так і більш мобільних елементів.

Ґрунти горохівського та коршівського викопних ґрунтових комплексів (горизонти 5, 7а та 7б) характеризуються вмістом глинистої фракції 25–27%, коефіцієнтами пористості 0,688–0,720 та помірно підвищеною щільністю. У цих горизонтах чітко зафіксовано зони підвищених концентрацій мікроелементів, що узгоджується з їхньою підвищеною сорбційною ємністю та наявністю органічної речовини. Доволі показовим є підгоризонт 7б, де спостерігаємо узгоджене зростання вмісту Mn, Cu, Zn і частково Pb, що засвідчує функціонування ефективного геохімічного бар'єра.

Найменші значення коефіцієнта пористості (0,566 і 0,474) та підвищена щільність (2,01–2,08 г/см<sup>3</sup>) притаманні луцькому та сокальському викопним ґрунтам (горизонти 9, 11), що вказує на їхню високу ущільненість і низьку фільтраційну здатність. У межах цих горизонтів зафіксовано контрастні піки концентрацій окремих елементів (зокрема Cr, Ba, Zr, Zn), що дає підставу інтерпретувати їх як *інтенсивні акумулятивні бар'єри*, пов'язані з тривалими стадіями ґрунтоутворення та стабілізації поверхні.

Лесові горизонти середнього плейстоцену MIS 8, MIS 10 і MIS 12 (зокрема, горизонти 8, 12) демонструють відносно нижчу пористість ( $\leq 0,700$ ) та підвищену щільність (до 2,13 г/см<sup>3</sup> у горизонті 12). Попри це, їхній геохімічний профіль залишається відносно згладженим, що засвідчує обмежену, але все ж транзитну функцію. Водночас у подошві розрізу (горизонт 12), перекритій моренними відкладами, простежуємо локальну зміну характеру розподілу елементів, що може бути пов'язано з умовами гідрогеохімічної ізоляції.

Отже, вертикальна міграція мікроелементів у лесово-ґрунтовій серії опорного розрізу Бояничі контролюється чергуванням проникних лесових горизонтів і бар'єрних палеоґрунтових та палеокріогенних стратиграфічних одиниць. Ритмічна будова товщі формує ієрархічну систему геохімічних бар'єрів різного генезису – редокс- та сорбційних тощо, що визначають локалізацію зон акумуляції та перерозподіл елементів у профілі.

**Висновки.** Отримані результати демонструють, що ритмічна організація лесово-ґрунтової серії розрізу Бояничі визначає не лише стратиграфічну будову товщі, але й слугує ключовим чинником просторової диференціації геохімічного поля та характеру міграції мікроелементів. Зіставлення інженерно-геологічних показників із профілями вмісту мікроелементів засвідчує чітку приуроченість зон підвищених концентрацій до окремих стратиграфічних горизонтів, передусім палеоґрунтових і палеокріогенних (зокрема, підгоризонту 2а, а також горизонтів 3, 5, 7 і 11), тоді як лесові товщі (наприклад, горизонти 2д, 2б, 6, 10, 12) характеризуються відносно вирівняним або зниженим вмістом більшості елементів. Така закономірність корелює з контрастами у гранулометричному

складі, пористості та щільності порід: більш дисперсні, структурно перетворені та збагачені органічною речовиною горизонти мають підвищену сорбційну ємність і виконують функцію геохімічних бар'єрів, тоді як однорідніші леси з вищою проникністю сприяють транзитній міграції елементів. Доволі показовим є узгоджений характер варіацій як для літофільних (Ti, Zr, Nb), так і для потенційно мобільніших елементів (Mn, Zn, Cu), що вказує на комплексний контроль їхнього перерозподілу – поєднання гранулометричних, сорбційних і, ймовірно, редокс-умов у межах окремих ритмів. Отже, лесово-грунтова серія – це ієрархічно організована система чергування проникних і бар'єрних горизонтів, у якій саме ритмічність визначає локалізацію зон акумуляції та напрям вертикальної міграції мікроелементів.

Результати аналізу вмісту мікроелементів з урахуванням циклічної будови перигляціальної лесово-грунтової серії дають підставу зробити такі висновки:

- Закономірності розподілу проникнення мікроелементів у перигляціальній лесово-грунтовій серії не плавні, а підпорядковуються ритміці палеогеографічних умов плейстоцену.
- Над найщільнішими горизонтами (наприклад, дубнівським викопним ґрунтом, MIS 3) вміст мікроелементів помітно вищий, порівняно з пухкішими верхньоплейстоценовими лесовими горизонтами.
- Горизонтами-бар'єрами є луцький (MIS 9) та сокальський (MIS 11) викопні ґрунти.

Отримані результати необхідно враховувати під час господарського освоєння території розвитку лесово-грунтових серій плейстоцену. Певні відхилення від встановлених закономірностей можуть бути зумовлені наявністю різновікових псевдоморфоз за полігонально-жильними льодами, які зазвичай заповнені розущільненим матеріалом і виконують функцію локальних дренажних шляхів. Аналогічні дослідження доцільно провести і на інших розрізах лесово-грунтової серії для виявлення локальних та регіональних закономірностей у розподілі мікроелементів по-вертикалі. Ритмічна будова лесово-грунтової серії та індивідуальні властивості її конкретних горизонтів однозначно впливають і на характер проникнення та розподілу різних видів забруднювальних речовин на поверхнях найщільніших і малопроникних шарів.

**Подяки.** Дослідження частково профінансоване Національним фондом досліджень України, номер проєкту 2025.07/0260.

#### БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- Богуцький А., Волошин П., Томенюк О. Лесовий покрив Волинської височини: стратиграфія, опорні розрізи, інженерно-геологічна характеристика. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 172 с.
- Богуцький А., Волошин П., Томенюк О. Лесовий покрив Подільської височини: стратиграфія, опорні розрізи, інженерно-геологічна характеристика. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2023. 248 с.
- Богуцький А., Богуцький О., Волошин П. Лесовий покрив Волинської височини // Українське Полісся: вчора, сьогодні, завтра : зб. наук. праць. Луцьк : Надстир'я, 1998. С. 105–107.
- Богуцький А., Волошин П. Інженерно-геологічна характеристика порід лесово-грунтової серії опорного розрізу Бояничі (Волинська височина) // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геогр. 2014. Вип. 47. С. 18–29. <http://dx.doi.org/10.30970/vgg.2014.47.813>.
- Главацький Д., Бахмутов В., Богуцький А., Волошин П. Петромагнетизм і палеомагнетизм субаеральних відкладів розрізів Бояничі і Коршів (Волинська височина) // Вісник Київського

- національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: геологія. 2016. Вип. 1(72). С. 43–51. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.06>.
- Новак Т. Рельєф Волинської височини: проблеми просторової диференціації: дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.04 / Новак Тарас Андрійович; М-во освіти і науки України, Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка; М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Львів, 2020. 223 с.
- Bogucki A., Maruszczak H., Nawrocki J. Stratygraficzna i paleogeograficzna interpretacja wyników analiz podatności magnetycznej lessów w Bojanicach (Ukraina NW) // *Annales UMCS. Sect. B.* 1995. Vol. 50(10). P. 51–64.
- Boguckij A., Łanczont M., Łącka B., Madeyska T., Sytnyk O. Age and the palaeoenvironment of the West Ukrainian Palaeolithic: the case of Velykyi Glybochok multi-cultural site. *Journal of Archaeological Science.* 2009. Vol. 36, Is. 7. P. 1376–1389. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.01.027>.
- Boguckij A., Racinowski R. Analiza litostatystyczna składu minerałów ciężkich w profilu lessów Bojanice (Ukraina NW) // *Georama. Sosnowiec*, 1994. Vol. 2. P. 69–78.
- Boguckij A., Łanczont M., Łącka B., Madeyska T., Zawidzki P. Stable isotopic composition of carbonates in Quaternary sediments of the Skala Podil'ska sequence (Ukraine) // *Quaternary International.* 2006. Vol. 152–153. S. 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.12.016>.
- Bonchkovskiy O., Hlavatskiy D., Kuraieva I., Kravchuk I., Bonchkovskiy A. Lithology, Geochemistry and Magnetic Susceptibility of the Best Developed Late Pleistocene Loess-Palaeosol Sequence in North-Western Ukraine, Novyi Tik // *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»*. 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510099>.
- Bosq M., Bertran P., Degeai J.-P., Queffelec A., Moine O. Geochemical signature of sources, recycling and weathering in the Last Glacial loess from the Rhône Valley (southeast France) and comparison with other European regions // *Aeolian Research.* 2020. Vol. 42. Article number 100561. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.100561>.
- Chen Y., Li X., Han Z., Yang S., Wang Y., Yang D. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province // *Journal of Geographical Sciences.* 2008. Vol. 18. P. 341–352. <https://doi.org/10.1007/s11442-008-0341-9>.
- Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the Globe Version4: CGIAR-CSI SRTM 90 m database. 2008. Available from: [srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org).
- Jordanova D., Jordanova N. Geochemical and mineral magnetic footprints of provenance, weathering and pedogenesis of loess and paleosols from North Bulgaria // *CATENA.* 2024. Vol. 243. Article number 108131. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108131>.
- Kusiak J., Łanczont M., Bogucki A. New exposure of loess deposits in Boyanychi (Ukraine) – results of thermoluminescence analyses // *Geochronometria.* 2012. Vol. 39(1). P. 84–100. <https://doi.org/10.2478/s13386-011-0054-1>.
- Li Y., Song Y., Chen X., Li J., Mamadjanov Y., Aminov J. Geochemical composition of Tajikistan loess and its provenance implications // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2016. Vol. 446. P. 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.025>.
- Łącka B., Łanczont M., Madeyska T., Boguckij A. Geochemical composition of Vistulian loess and micromorphology of interstadial palaeosols at the Kolodiiiv site (East Carpathian Foreland, Ukraine) // *Geological Quarterly.* 2007. Vol. 51(2). P. 127–146.
- Skurzyński J., Jary Z., Fenn K., Lehmkuhl F., Raczyk J., Stevens T., Wiczorek M. Implications of the geochemistry of L1LL1 (MIS2) loess in Poland for paleoenvironment and new normalizing values for loess-focused multi-elemental analyses // *Quaternary Research.* 2024. Vol. 120. P. 18–35. <https://doi.org/10.1017/qua.2023.69>.
- Skurzyński J., Jary Z., Kenis P., Kubik R., Moska P., Raczyk J., Seul C. Geochemistry and mineralogy of the Late Pleistocene loess-palaeosol sequence in Złota (near Sandomierz, Poland): Implications for weathering, sedimentary recycling and provenance // *Geoderma.* 2020. Vol. 375. Article number 114459. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114459>.
- Skurzyński J., Jary Z., Raczyk J., Moska P., Korabiewski B., Ryzner K., Krawczyk M. Geochemical characterization of the Late Pleistocene loess-palaeosol sequence in Tyszowce (Sokal Plateau-Ridge,

- SE Poland) // *Quaternary International*. 2019. Vol. 502. P. 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.04.023>.
- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schwartz C., Carignan J. Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France // *European Journal of Soil Science*. 2006. Vol. 5. P. 392–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00750.x>.
- Tomeniuk O., Bogucki A. Correlation of Quaternary glaciations and palaeocryogenic stages in the loess-palaeosol sequences of Volhyn-Podillya (Ukraine) // XXVII Konferencja naukowo-szkoleniowa Stratygrafia plejstocenu Polski “Późnoczwartorzędowe środowiska sedymentacyjne Pomorza Wschodniego” (Stara Kiszewa, 05-09.09.2022 r.). 2022a. P. 52–54.
- Tomeniuk O., Bogucki A. The oldest palaeocryogenic stages in the Quaternary loess-palaeosol sequences of Ukraine // EGU General Assembly 2022 (Vienna, Austria, 23–27 May 2022), 2022b. EGU22-5740. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5740>.
- Yang Y., Li B., Qiu S., Wu Z., Gao Q., Li Y. Climatic changes indicated by trace elements in the Chagelebulu Stratigraphic Section, Badain Jaran Desert, China, since 150 kyr B.P. *Geochemistry International*. 2008. Vol. 46(1). P. 96–103. <https://doi.org/10.1134/S0016702908010096>.
- Zhang W., Zhao J., Chen J., Ji J., Liu L. Binary sources of Chinese loess as revealed by trace and REE element ratios // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 166. P. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.017>.

#### REFERENCES

- Bogucki, A., Voloshyn, P., & Tomeniuk, O. (2021). *Loess Cover of the Volhynian Upland: stratigraphy, key sections, engineering and geological characteristics*. Lviv, 172 p. (in Ukrainian).
- Bogucki, A., Voloshyn, P., & Tomeniuk, O. (2023). *Loess Cover of the Podolian Upland: stratigraphy, key sections, engineering and geological characteristics*. Lviv, 248 p. (in Ukrainian).
- Bogucki, A., Voloshyn, P., & Tomeniuk, O. (1998). Loess Cover of the Volhynian Upland. In *Ukrainske Polissia: vchora, sohodni, zavtra* (p. 105–107). Lutsk: Nadstyria. (in Ukrainian).
- Bogucki, A., & Voloshyn, P. (2014). Engineering-geological characteristic of the sediments of the loess-soil series from the key section Boyanychi (Volhynian Upland). *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 47, 18–29. <https://doi.org/10.30970/vgg.2014.47.813>. (in Ukrainian).
- Hlavatskyi, D., Bakhmutov, V., Bogucki, A., & Voloshyn, P. (2016). Petromagnetism and palaeomagnetism of subaerial deposits of Boyanychi and Korshiv sections (Volhynian upland). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 72, 43–51. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.06>. (in Ukrainian).
- Novak, T. (2020). Relief Volynskoi vysochyny: problemy prostorovoi dyferentsiatsii: dys. ... kand. heohr. nauk: 11.00.04. Novak Taras Andriiovych; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Lviv. nats. un-t im. Ivana Franka; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Kyiv. nats. un-t im. Tarasa Shevchenka. Lviv, 223 p. (in Ukrainian).
- Bogucki, A., Maruszczak, H., & Nawrocki, J. (1995). Stratygraficzna i paleogeograficzna interpretacja wyników analiz podatności magnetycznej lessów w Bojanicach (Ukraina NW). *Annales UMCS. Sect. B*, 50(10), 51–64.
- Boguckij, A., Łanczont, M., Łacka, B., Madeyska, T., & Sytnyk, O. (2009). Age and the palaeoenvironment of the West Ukrainian Palaeolithic: the case of Velykyi Glybochok multi-cultural site. *Journal of Archaeological Science*, 36(7), 1376–1389. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.01.027>.
- Boguckij, A., & Racinowski, R. (1994). Analiza litostatystyczna składu minerałów ciężkich w profilu lessów Bojanice (Ukraina NW). *Georama*, 2. Sosnowiec, 69–78.
- Boguckij, A. B., Łanczont, M., Łacka, B., Madeyska, T., & Zawadzki, P. (2006). Stable isotopic composition of carbonates in Quaternary sediments of the Skala Podil'ska sequence (Ukraine). *Quaternary International*, 152–153, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.12.016>.
- Bonchkovskiy, O., Hlavatskyi, D., Kuraieva, I., Kravchuk, I., & Bonchkovskiy, A. (2023). Lithology, Geochemistry and Magnetic Susceptibility of the Best Developed Late Pleistocene Loess-Palaeosol Sequence in North-Western Ukraine, Novyi Tik. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510099>.
- Bosq, M., Bertran, P., Degeai, J.-P., Queffelec, A., & Moine, O. (2020). Geochemical signature of sources, recycling and weathering in the Last Glacial loess from the Rhône Valley (southeast France)

- and comparison with other European regions. *Aeolian Research*, 42, 100561. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.100561>.
- Chen, Y., Li, X., Han, Z., Yang, S., Wang, Y., & Yang, D. (2008). Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 18(3), 341–352. <https://doi.org/10.1007/s11442-008-0341-9>.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the Globe Version4: CGIAR-CSI SRTM 90 m database. Available from: [srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org).
- Jordanova, D., & Jordanova, N. (2024). Geochemical and mineral magnetic footprints of provenance, weathering and pedogenesis of loess and palaeosols from North Bulgaria. *CATENA*, 243, 108131. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108131>.
- Kusiak, J., Łanczont, M., & Bogucki, A. (2012). New exposure of loess deposits in Boyanychi (Ukraine) – results of thermoluminescence analyses. *Geochronometria*, 39(1), 84–100. <https://doi.org/10.2478/s13386-011-0054-1>.
- Li, Y., Song, Y., Chen, X., Li, J., Mamadjanov, Y., & Aminov, J. (2016). Geochemical composition of Tajikistan loess and its provenance implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 446, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.025>.
- Łacka, B., Łanczont, M., Madeyska, T., & Boguckij, A. (2007). Geochemical composition of Vistulian loess and micromorphology of interstadial palaeosols at the Kolodiiv site (East Carpathian Foreland, Ukraine). *Geological Quarterly*, 51(2), 127–146.
- Skurzyński, J., Jary, Z., Fenn, K., Lehmkuhl, F., Raczyk, J., Stevens, T., & Wieczorek, M. (2024). Implications of the geochemistry of L1LL1 (MIS2) loess in Poland for paleoenvironment and new normalizing values for loess-focused multi-elemental analyses. *Quaternary Research*, 120, 18–35. <https://doi.org/10.1017/qua.2023.69>.
- Skurzyński, J., Jary, Z., Kenis, P., Kubik, R., Moska, P., Raczyk, J., & Seul, C. (2020). Geochemistry and mineralogy of the Late Pleistocene loess-palaeosol sequence in Żłota (near Sandomierz, Poland): Implications for weathering, sedimentary recycling and provenance. *Geoderma*, 375, 114459. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114459>.
- Skurzyński, J., Jary, Z., Raczyk, J., Moska, P., Korabiewski, B., Ryzner, K., & Krawczyk, M. (2019). Geochemical characterization of the Late Pleistocene loess-palaeosol sequence in Tyszowce (Sokal Plateau-Ridge, SE Poland). *Quaternary International*, 502, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.04.023>.
- Sterckeman, T., Douay, F., Baize, D., Fourrier, H., Proix, N., Schvartz, C., & Carignan, J. (2005). Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France. *European Journal of Soil Science*, 57(3), 392–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00750.x>.
- Tomaniuk, O., & Bogucki, A. (2022a). Correlation of Quaternary glaciations and palaeocryogenic stages in the loess-palaeosol sequences of Volhyn-Podillya (Ukraine). In *XXVII Konferencja naukowo-szkoleniowa Stratygrafia plejstocenu Polski “Późnoczwartorzędowe środowiska sedymentacyjne Pomorza Wschodniego”* (Stara Kiszewa, 05-09.09.2022 r.), 52–54.
- Tomaniuk, O., & Bogucki, A. (2022b). The oldest palaeocryogenic stages in the Quaternary loess-palaeosol sequences of Ukraine. *EGU General Assembly 2022* (Vienna, Austria, 23–27 May 2022). EGU22-5740. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5740>.
- Yang, Y., Li, B., Qiu, S., Wu, Z., Gao, Q., & Li, Y. (2008). Climatic changes indicated by trace elements in the Chagelebulu Stratigraphic Section, Badain Jaran Desert, China, since 150 kyr B.P. *Geochemistry International*, 46(1), 96–103. <https://doi.org/10.1134/S0016702908010096>.
- Zhang, W., Zhao, J., Chen, J., Ji, J., & Liu, L. (2018). Binary sources of Chinese loess as revealed by trace and REE element ratios. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.017>.

Стаття надійшла в редакцію 08.04.2026

Прийнято до друку 29.04.2026

Дата публікації 19.05.2026