

Review of the spatial distribution of kimberlite pipes in the tectonic structures of the world

Andrii Luniachek

V. N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine)

article info

key words

kimberlite pipes, tectonic structures, diamonds, cratons, shields, platforms, rift zones.

correspondence to

Andrii Luniachek; V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Square, 61022 Kharkiv, Ukraine;
Email: serval185@gmail.com
orcid: 0009-0008-9428-6551

article history

Submitted: 17.02.2025. Revised: 10.04.2025. Accepted: 30.06.2025

cite as

Luniachek, A., 2025. Review of the spatial distribution of kimberlite pipes in the tectonic structures of the world. *GEO&BIO*, 27: 101–114 [In Ukrainian, with English summary]

abstract

Kimberlite pipes are vertical or inclined cylindrical or cone-shaped bodies filled with kimberlite, an ultramafic igneous rock. The diameter of kimberlite pipes can vary from a few metres to 1.5 km, and their depth reaches several kilometres. The geological significance of kimberlite pipes is that they are the main source of diamonds and may contain other minerals: gold, platinum, ilmenite, rutile, and chromite. In addition, kimberlites provide valuable information about the composition and structure of the Earth's mantle, as well as about deep magmatic processes. The article researches the spatial distribution of kimberlite pipes in the tectonic structures of the world. Kimberlite pipes can be found on all continents. Their location is uneven, with a fuzzy concentration in certain geographical regions. The main regions where kimberlite pipes are concentrated are South Africa, Yakutia, Canada, and Australia. In addition, kimberlite pipes have also been found in South America, West Africa, Northern Europe, India, and China. It has been shown that kimberlite pipes are located exclusively on continents within ancient platforms (cratons) with basement of Archean and Early Proterozoic age. Most of the pipes are located on basement elevations—shields, anteklises, and near rift zones. There are no kimberlite pipes in the oceans. The age of the pipes and the age of their host rocks do not correlate with each other. The age of the host rocks is Archean or Paleoproterozoic (3500 to 1600 Ma), while the age of kimberlite pipes varies in a wide range, from the Neoproterozoic to the Eocene (2800 to 45 Ma). In most diamond-bearing regions, there are kimberlite pipes located relatively close to each other, but with significantly different ages (for example, the Slave craton, the pipes of the Dayavik and Snap Lake deposits—55 and 535 Ma, respectively, with a distance of 100 km between them). Understanding the patterns of spatial distribution of kimberlite pipes should help to identify perspective areas for the exploration of new pipes, which may lead to the discovery of new diamond deposits.

© 2025 The Author(s); Published by the National Museum of Natural History, NAS of Ukraine on behalf of GEO&BIO. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY-SA 4.0), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Огляд просторового розподілу кімберлітових трубок по тектонічних структурах світу

Андрій Лунячек

Резюме. Кімберлітові трубки — це вертикальні або похилі циліндричні або конусоподібні тіла, заповнені кімберлітом — ультраосновною магматичною породою. Діаметр кімберлітових трубок може варіювати від декількох метрів до 1,5 км, а їхня глибина сягає декількох кілометрів. Геологічне значення кімберлітових трубок полягає в тому, що вони є головним джерелом алмазів та можуть містити інші корисні копалини: золото, платину, ільменіт, рутит, хроміт; окрім того, кімберліти дають цінну інформацію про склад та структуру мантії Землі, а також про глибинні магматичні процеси. У статті досліджено просторовий розподіл кімберлітових трубок по тектонічних структурах світу. Кімберлітові трубки можна зустріти на всіх континентах. Їх розташування нерівномірне, з нечіткою концентрацією у певних географічних регіонах. Основні регіони, де зосереджені кімберлітові трубки: Південна Африка, Якутія, Канада, Австралія. Окрім зазначеного, кімберлітові трубки також виявлені в Південній Америці, Західній Африці, Північній Європі, Індії та Китаї. Показано, що кімберлітові трубки розташовані винятково на материках в межах древніх платформ (кратонів) з фундаментом архейського та ранньопротерозойського віку. Більшість трубок знаходиться на піднятих фундаментах — щитах, антеклізах, а також поблизу рифтових зон. В океанах кімберлітові трубки відсутні. Вік трубок та вік порід, що їх вміщують, між собою не корелюють. Вік вміщуючих порід — архейський або ранньопротерозойський (від 3500 до 1600 млн років тому), тоді як вік кімберлітових трубок варіює у значному діапазоні — від пізньоархейського до еоценового (від 2800 до 45 млн років тому). У межах більшості алмазоносних регіонів простежується існування кімберлітових трубок, розташованих відносно близько одна від одної, але суттєво відмінних за віком утворення (наприклад, кратон Слейв, трубки родовищ Дайавік і Снеп Лейк — 55 і 535 млн років тому відповідно, відстань між ними складає 100 км). Розуміння закономірностей просторового розподілу кімберлітових трубок має сприяти виявленню перспективних районів для пошуку нових трубок, що може зумовити відкриття нових родовищ алмазів.

Ключові слова: кімберлітові трубки, тектонічні структури, алмази, кратони, щити, платформи, рифтові зони.

Адреса для зв'язку: Андрій Лунячек; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022; Email: serval185@gmail.com; orcid: 0009-0008-9428-6551

Вступ

Кімберлітові трубки — це унікальні геологічні утворення, що мають виняткове значення для розуміння процесів, що відбуваються в надрах Землі. Їх вивчення дає можливість не лише отримати цінну інформацію про склад та структуру мантії, але й розробити більш ефективні методи пошуку корисних копалин, зокрема алмазів [Geiko *et al.* 2004; Woodhead *et al.* 2019]¹.

Одним із ключових аспектів дослідження кімберлітових трубок є встановлення закономірностей їх розташування. У 1966 році Кліффорд проаналізував локалізацію родовищ корисних копалин в Африці та дійшов висновку, що корінні родовища алмазів розташовані на ділянках земної кори, які залишалися стабільними впродовж, принаймні, останніх 1,5 млрд років [Clifford 1966].

Спостереження Кліффорда знайшли розвиток у наукових роботах Дженса, який до висновків Кліффорда, базованих на дослідженнях Африки, додав приклади з інших алмазоносних регіонів світу. У своїх роботах Дженс стверджував, що кімберлітові трубки, видобування алмазів з яких є економічно доцільним, локалізовані винятково в межах кратонів архейського віку [Janse 1994; Janse & Sheahan 1995].

Протягом наступних десятиліть було накопичено значний обсяг геологічних даних, що дозволяє поглибити попередні висновки. У цій статті проводиться узагальнення сучасних даних про розподіл кімберлітових трубок по тектонічним структурам світу. Розглядаються місця їх локалізації, тектонічні структури, в межах яких вони поширені, вік утворення кімберлітових трубок і гірських порід, які їх вміщують.

¹ Подібні питання розглядали й інші автори, зокрема на 9 Міжнародній кімберлітовій конференції: Jelsma, H. *et al.* 2008. Tectonic setting of kimberlites. Abstracts of the 9th International Kimberlite Conference (Frankfurt, 15 October 2008).

Актуальність теми пов'язана з тим, що з'ясування закономірностей розміщення кімберлітових трубок по тектонічних структурах веде до кращого розуміння геологічних процесів в надрах Землі. Це знання може бути використано для розробки більш ефективних методів пошуку родовищ алмазів та інших корисних копалин, а також для реконструкції тектонічної історії регіонів, де розташовані кімберлітові трубки.

Метою статті є аналіз і узагальнення наявних даних про розподіл кімберлітових трубок по тектонічних структурах світу.

Матеріали і методи

Для аналізу просторового розподілу кімберлітових трубок були використані геологічні, тектонічні, геохронологічні та картографічні дані з наукових публікацій і технічних звітів.

Основними матеріалами дослідження слугували: а) відомості про локалізацію кімберлітових трубок у глобальному масштабі; б) карти тектонічного районування континентів; в) інформація про вік кімберлітових трубок і вміщуючих порід; г) результати петрологічних та ізотопних досліджень кімберлітів; д) статистична інформація про алмазовидобування.

Для побудови узагальненої картини розподілу кімберлітових трубок було проведено: а) географічне зіставлення відомих трубок з межами архейських і протерозойських кратонів, щитів, антеклиз і рифтових структур; б) порівняння кімберлітових трубок з різних регіонів за віком земної кори, у яку вони інтродувані, та за співвідношеннями між віком кімберлітів та віком порід, що їх вміщують.

Критерії відбору джерел включали: а) наявність географічних координат або карт локалізації окремих трубок та регіонів їхнього розташування; б) наявність геохронологічних даних; в) наукове визнання джерела (рецензовані журнали, монографії, офіційні технічні звіти); г) сучасність, оновленість та актуальність даних (перевага надавалася роботам, опублікованим після 2000 р.).

У випадках, де дані були суперечливими або неповними, перевагу надавали комплексним джерелам з великою кількістю аналітичних результатів.

Геологічне значення кімберлітових трубок

Кімберлітові трубки — це геологічні утворення, які представляють собою вертикальні або похилі циліндричні або конусоподібні тіла, заповнені кімберлітом — ультраосновною магматичною породою. Діаметр кімберлітових трубок може варіювати від декількох метрів до 1,5 км, а їхня глибина сягає декількох кілометрів [Kjarsgaard 2007].

Кімберліти мають характерне темно-зелене або сіре забарвлення, що обумовлено високим вмістом залістистих мінералів. Вони складаються з мінералів, які утворюють ультраосновні магматичні породи, таких як олівін, піроксен, ільменіт, флогопіт, хроміт, а також з вторинних метасоматичних мінералів, таких як серпентин, хлорит та кальцит [Sarkar *et al.* 2023].

Петрографічні дослідження показали, що кімберліти складаються переважно з мінералів, які характерні для ультраосновних порід мантії Землі. Це свідчить про те, що кімберлітові магми утворюються в мантії і виносять на поверхню мантії матеріал [Girnis & Ryabchikov 2005; Kamnetyky *et al.* 2014; Mitchell *et al.* 2019]. Кімберлітова магма, яка піднімається з мантії Землі, прориває земну кору під впливом високого тиску, що призводить до утворення вертикального каналу, який заповнюється кімберлітом [Grabreck *et al.* 2022].

Геологічне значення кімберлітових трубок полягає в наступному:

1. Кімберлітові трубки є головним джерелом алмазів. Вони містять близько 90% світових запасів алмазів [Ruzina *et al.* 2018].
2. Крім алмазів, кімберлітові трубки можуть містити інші корисні копалини, такі як золото, платина, ільменіт, рутил та хроміт [Mukherjee *et al.* 2021; Kjarsgaard *et al.* 2022; Sarkar *et al.* 2023].
3. Кімберліти дають цінну інформацію про склад та структуру мантії Землі, а також про глибинні магматичні процеси [Torsvik *et al.* 2010].

Розташування кімберлітових трубок у світі

Кімберлітові трубки виявлено на всіх континентах світу. Їх розподіл нерівномірний, з нечітко вираженими областями розповсюдження, де сконцентрована більшість трубок.

Основні регіони, де сконцентровані кімберлітові трубки [Kjarsgaard et al. 2022]:

1. Південна Африка. Цей регіон має найбільшу концентрацію кімберлітових трубок у світі, включно з першою описаною трубкою біля міста Кімберлі.
2. Якутія. Регіон охоплює велику частину східної Росії, де знаходяться численні кімберлітові трубки, включно з одними з найбільших у світі трубками Мир та Удачна.
3. Канада. Містить значну кількість кімберлітових трубок, розташованих здебільшого на Північно-Західних територіях та на узбережжі Гудзонової затоки.
4. Австралія. Містить кімберлітові трубки на заході, півночі та півдні континенту.

Кімберлітові трубки також знаходяться в інших регіонах світу, таких як Південна Америка, Західна Африка, Північна Європа, Індія, Китай.

Північна Америка

Більшість кімберлітових трубок на території Північної Америки розташовані в межах Канадського щита (Рис. 1) [Kjarsgaard et al. 2022].

Канадський щит є виходом на поверхню кристалічного фундаменту центральної та східної частини Північно-Американської платформи. Вік його порід становить 2,5–4,2 млрд років [Iizuka et al. 2007]. Щит складається з кількох архейських серединних масивів (кратонів) різного розміру, між якими розташовані складчасті області, сформовані у ранньому протерозої [Whitmeyer & Karlstrom 2007].

У будові Канадського щита виділяють п'ять кратонів — Нейн, Рей, С'юпіріор, Хірін і Слейв. Найбільші з них — С'юпіріор (розташований на південь та схід від Гудзонової затоки), Слейв (північний захід Канади) і Нейн (північний схід Лабрадору та південна Гренландія) [Whitmeyer & Karlstrom 2007]. В межах щита знаходяться родовища золота, срібла, нікелю і міді. Виявлено низку кімберлітових трубок, ведеться видобуток алмазів².

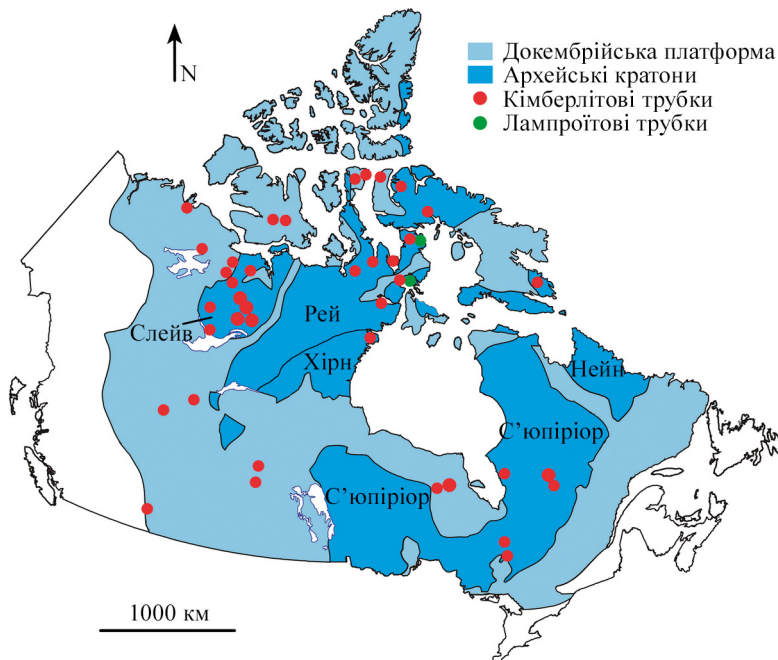


Рис. 1. Розташування кімберлітових і лампроїтових трубок на території Канади (за даними [Kjarsgaard et al. 2022] зі змінами). Слейв, Рей, Хірін, С'юпіріор, Нейн — кратони Канадського щита.

Fig. 1. Distribution of kimberlite and lamproite pipes in Canada (after [Kjarsgaard et al. 2022] with changes). Slave, Rae, Hearne, Superior, and Nain are cratons of the Canadian Shield.

² Такі питання заторкнuto у звіті за програмою алмазного буріння 2007 р. в рамках проекту McClarty Lake: Norris, J. 2007. Report on the 2007 Diamond Drilling Program McClarty Lake Project, Manitoba. Aurora Geosciences Ltd.

Найбільша кількість кімберлітових трубок включно з головними алмазними родовищами регіону знаходиться в межах кратону Слейв. Цей кратон еліптичної форми має розміри близько 700×500 км. На сході, заході та півдні його обмежують ранньопротерозойські складчасті пояси, на півночі — узбережжя Північного Льодовитого океану [Davis *et al.* 2003].

У центральній частині кратону знаходиться кімберлітове поле Лак-де-Грас, до якого належать великі алмазні родовища Дайавік (чотири кімберлітові трубки, видобуто 35 млн каратів) і Екати (п'ять кімберлітових трубок, видобуто 40 млн каратів) еоценового віку (55–53 млн років тому). На 100–130 км південніше розташовані родовища Снеп Лейк (видобуто 16 млн каратів) і Гаччо К'ю (п'ять кімберлітових трубок, попередньо оцінені запаси — 50 млн каратів) ранньокембрійського віку (542–533 млн років тому) [Shigley *et al.* 2016; Leveille *et al.* 2017]³.

Другою за важливістю алмазоносною структурою Канадського щита можна вважати найбільший з його кратонів — С'юпіріор, який займає центральну та східну частину щита та має площу 1,5 млн км² [Percival *et al.* 2012]. Кімберлітові трубки виявлено у східній частині кратону (в тому числі велике алмазне родовище Ренард пізньопротерозойського віку — 655–630 млн років тому), а також у його південній частині поблизу рифта Ківіно [Kjarsgaard *et al.* 2022].

Кімберлітові та лампроїтові трубки виявлені також в північній частині кратону Рей, який розташований на півночі Канади між кратоном Слейв та Гудзоною затокою. Декілька кімберлітових трубок виявлено в межах кратону Нейн на південному заході Гренландії на краю рифтової зони, яка відокремлює Гренландію від Північноамериканського континенту [Kjarsgaard *et al.* 2022].

На південний захід від Канадського щита знаходиться архейський кратон Вайомінг, оточений ранньопротерозойськими складчастими поясами. Він розташований у північно-західній частині США та південно-західній частині Канади. Тут знаходиться одне з небагатьох родовищ алмазів США — Келсі Лейк (9 кімберлітових трубок середньодевонського віку — 390 млн років тому) [Kjarsgaard *et al.* 2022]. З 1996 року до моменту закриття родовища у 2001 р. видобуто 21 тис. каратів, у т. ч. декілька великих алмазів⁴.

Південна Америка

Переважає більшість відомих кімберлітових трубок Південної Америки (Рис. 2) розташована в межах кратонів Південно-Американської платформи, таких як Амазонський, Сан-Франциско, Ріо-де-ла-Плата та Луїс Алвіс [Cordani *et al.* 2009; Kjarsgaard *et al.* 2022].

Амазонський кратон є одним з найбільших кратонів Землі. Його площа становить понад 4,4 млн км². Кратон складається з північної та південної частин — Гвіанського та Центрально-Бразильського щитів, які відокремлені один від одного Амазонським рифтом [Cordani *et al.* 2009; Kroonenberg & de Roever 2010].

Кімберлітові трубки виявлено як на північному (Гвіанський щит), так і на південному (Центрально-Бразильський щит) краях Амазонської рифтової зони. Трубки Гвіанського щита знаходяться у його південно-східній та північно-західній частинах (район гірського масиву Рорайма), в тому числі — алмазне родовище Гуаніамо (видобуто 15 млн каратів алмазів) пізньопротерозойського віку (718–706 млн років тому), яке вважається одним з найперспективніших у Південній Америці [Kaminsky *et al.* 2000].

Трубки Центрально-Бразильського щита виявлено переважно у його західній частині. Тут знаходиться алмазоносний район Джуїна, в межах якого виявлено алмазні родовища Кароліна, Кольєр та Пандреа пізньокрейдового віку (94–91 млн років тому). У 1970–80 рр. у районі Джуїна видобували 5–6 млн каратів алмазів на рік з розсіпних родовищ, з яких 85% мали промислову якість, а 15% — ювелірну. Пізніше в межах району було відкрито 26 кімберлітових трубок, частина з яких є алмазоносними [Kaminsky *et al.* 2010].

³ Подібні матеріали можна знайти і в електронних ресурсах, зокрема: EKATI Diamond Mine: 2009 Year in Review. 2010. BHP Billiton Canada Inc. URL; Diavik Diamond Mine. 2017. Northwest Territories, Canada. NI 43-101 Technical Report.

⁴ Olson, D. W. 2008. Gemstones. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook — 2006.

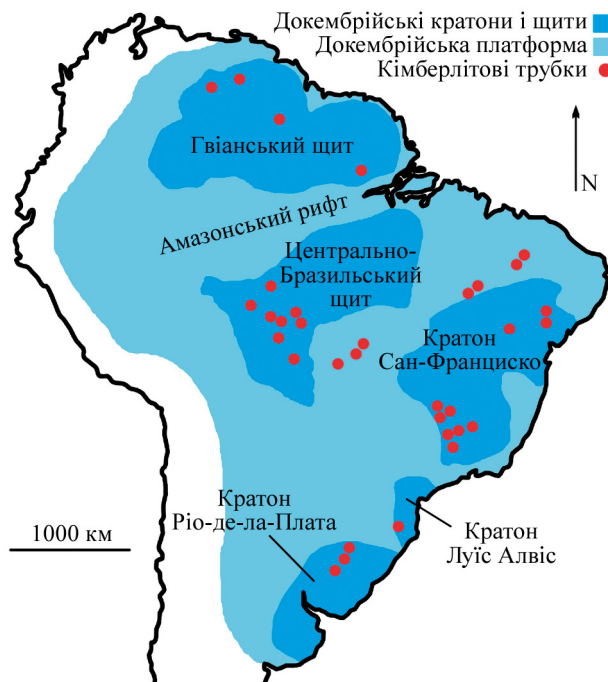


Рис. 2. Розташування кімберлітових трубок на території Південної Америки (за даними [Cordani *et al.* 2009; Kjarsgaard *et al.* 2022], зі змінами).

Fig. 2. Distribution of kimberlite pipes in South America (after [Cordani *et al.* 2009; Kjarsgaard *et al.* 2022], with changes).

Кратон Сан-Франциско, розташований у східній частині Бразилії і відомий родовищами заліза і золота, також є важливим алмазонаосним районом. Кратон складений кількома блоками архейського віку, розділених ранньопротерозойськими складчастими поясами. Більшість кімберлітових трубок кратону виявлено на його півдні. Декілька трубок розташовано на півночі кратону, включно з великим алмазним родовищем Брауна (23 кімберлітові трубки пізньопротерозойського віку — 640 млн років тому, видобуто більше 1 млн каратів алмазів на суму 209,8 млн доларів США)⁵.

Кілька кімберлітових трубок виявлено в межах невеликих кратонів Ріо-де-ла-Плата та Луїс Алвіс, які розташовані на південному сході Південної Америки [Kjarsgaard *et al.* 2022].

Австралія

Усі відомі кімберлітові трубки Австралії знаходяться в межах Австралійської платформи, яка займає більше половини площі Австралійського континенту та відокремлена системою западин від складчастої системи Східної Австралії.

У межах платформи можна виділити наступні тектонічні структури докембрійського віку: кратон Їлгарн архейського віку, кратони Пілбара та Голер віком від архею до раннього протерозою, низка ранньопротерозойських структур (Рис. 3): блок Кімберлі, западини Аделаїда та Макартур [Myers *et al.* 1996; Kjarsgaard *et al.* 2022].

Кратони Їлгарн та Пілбара займають більшу частину Західної Австралії та обмежені протерозойськими складчастими поясами і осадовими западинами. Регіон відомий значними запасами залізної руди, золота, нікеля, міді, цинку тощо. В межах цих кратонів виявлено декілька кімберлітових трубок [Osei *et al.* 2021; Kjarsgaard *et al.* 2022].

Головним алмазонаосним регіоном Австралії є ранньопротерозойський блок Кімберлі, розташований на північному заході континенту. В межах блоку розташовано декілька кімберлітових і лампроїтових трубок, в тому числі великі алмазонаосні лампроїтові трубки Аргайл середньопротерозойського віку (1,2–1,1 млрд років тому) та Еллендейл міоценового віку (22–19 млн років тому) [Myers *et al.* 1996; Kjarsgaard *et al.* 2022].

На півдні Австралії виявлено низку кімберлітових трубок, які локалізовані в межах двох розташованих поруч тектонічних структур — кратону Голер і рифтового комплексу Аделаїда. У рифтовій зоні Макартур, що знаходиться на півночі континенту, також присутні кімберлітові трубки, в тому числі велике алмазне родовище Мерлін (видобуто 500 тис. каратів, 65% алмазів — мають ювелірну якість) пізньодевонського віку (380–360 млн років тому) [Myers *et al.* 1996; Kjarsgaard *et al.* 2022].

⁵ Більше є на ресурсі: Lipari Diamond Mines — Our Operations: Brauna Diamond Mine. 2024. Lipari Mining.

(як кімберлітові, так і лампроїтові) знаходиться на півдні кратону, в межах щита Ман, включно з пізньоюрськими–ранньокрейдовими (154–140 млн років тому) алмазними родовищами Коїду (дві кімберлітові трубки, видобувається 10 тис. каратів алмазів на місяць), Тонго (11 трубок, прогнозні ресурси — 8,3 млн каратів алмазів), Дрожба (одна трубка, прогнозні ресурси — 3 млн каратів алмазів), Сегуела (дві кімберлітові дайки, річний видобуток — близько 200 тис. каратів алмазів) [Kjarsgaard *et al.* 2022].

Кімберлітові трубки в межах Східно-Африканського рифту виявлено між його західною (рифт Альбертін) та східною (рифт Грегорі) гілками, де розташований Танзанійський кратон архейського віку. Трубки мають палеогеновий вік (60–45 млн років тому) і знаходяться у центральній та північній частинах кратону [Kjarsgaard *et al.* 2022].

На півночі Танзанійського кратону розташована одна з найбільших у світі кімберлітова трубка Вільямсон (Мвадуї) еоценового віку (54–50 млн років тому). Алмази видобуваються у відкритому кар'єрі діаметром понад 1 км. Річний видобуток становить близько 300 тис. каратів. Усього на родовищі видобуто понад 19 млн каратів алмазів [Stiefenhofer & Farrow 2004].

Кратон Конго, розташований у центральній частині континенту, складається з кількох невеликих серединних масивів (кратонів) архейського віку (Нтем, Габон, Бому, Касаї), між якими знаходяться складчасті області раннього протерозою [Kjarsgaard *et al.* 2022].

Кімберлітові трубки виявлено в межах розташованих поруч кратонів Нтем і Габон (в тому числі алмазні родовища Маконгоніо та Міцік архейського віку — 2,8 млрд років тому), а також на півночі кратону Касаї (алмазні родовища Тшибве та Мбужі-Маї пізньокрейдового віку — 85–70 млн років тому, сумарні запаси складають понад 300 млн каратів алмазів) [Nkere *et al.* 2019]⁷.

Південніше кратону Конго розташована рифтова зона Лукапа. В її межах виявлено велику кількість кімберлітових трубок включно з алмазним родовищем Катока [Bournas *et al.* 2018]. Родовище являє собою кімберлітову трубку крейдового віку (118 млн років тому) з діаметром кар'єра понад 1 км, річний видобуток — 6,5 млн каратів алмазів⁸.

Найбільшу кількість кімберлітових та лампроїтових трубок Африки виявлено на півдні континенту в межах кратону Калахарі. Він складається з двох блоків (кратонів) — Каапвааль і Зімбабве. В межах кратону Зімбабве розташована невелика кількість кімберлітових трубок включно з алмазним родовищем Мурова (три кімберлітові трубки кембрійського віку — 527 млн років тому, річний видобуток — близько 1 млн каратів алмазів) [Kjarsgaard *et al.* 2022].

Каапвааль є відносно великим кратоном (площа близько 1,2 млн км²). В його межах виявлено близько 150 кімберлітових трубок віком від протерозою до крейди (від 1180 до 85 млн років тому) включно з великими алмазними родовищами: (1) трубка Кімберлі або Велика діра (площа — 17 га, видобуто 32,7 млн каратів); (2) трубка Дутуатспан (площа — 10,6 га, видобуто 21,3 млн каратів); (3) трубка Булфонтейн (площа — 9,7 га, видобуто 36,2 млн каратів); (4) трубка Весселтон (площа — 8,7 га, глибина — 995 м — найглибший алмазний кар'єр у світі, видобуто 33,6 млн каратів); (5) трубка Де Бірс (площа — 5,1 га, видобуто 36,4 млн каратів); (6) трубка Лігобонг (площа — 8,5 га, оцінені запаси — 19 млн каратів, видобуток — 1 млн каратів на рік); (7) родовище Као (дві кімберлітові трубки площею 19,8 та 3,2 га, оцінені запаси — близько 9 млн каратів); (8) трубка Моте (площа — 8,8 га, прогнозні ресурси — близько 1 млн каратів); (9) родовище Летсенг (дві кімберлітові трубки площею 17,2 та 5,2 га, найвищий відсоток великих алмазів, найвища ціна алмазу за карат — 1894 долари, в 23 рази більша за середню світову ціну); (10) родовище Кофффонтейн (дві кімберлітові трубки, видобуто 7,3 млн каратів); (11) трубка Ягерсфонтейн (площа — 19,65 га, видобуто 9,6 млн каратів); (12) родовище

⁷ Подібні питання розглядали на 8 Міжнародній кімберлітовій конференції: Jelsma H. *et al.* 2003. Early proterozoic metamorphosed kimberlites from Gabon. Abstracts of the 8th International Kimberlite Conference (Victoria, 01 January 2003).

⁸ McClelland, C. 2013. Angola's Catoca diamond complex to add mill as miners dig deeper. Bloomberg.com.

Джваненг (три кімберлітові трубки, річний видобуток — близько 10 млн каратів, найбагатше алмазне родовище у світі); (13) трубка Куллінан або Прем'єр (прогнозні ресурси — 154 млн каратів, річний видобуток — близько 2 млн каратів); (14) трубка Оакс (площа — 1 га, прогнозні ресурси — 2,6 млн каратів) [Kimberley... 2004⁹; Helmstaedt *et al.* 2011].

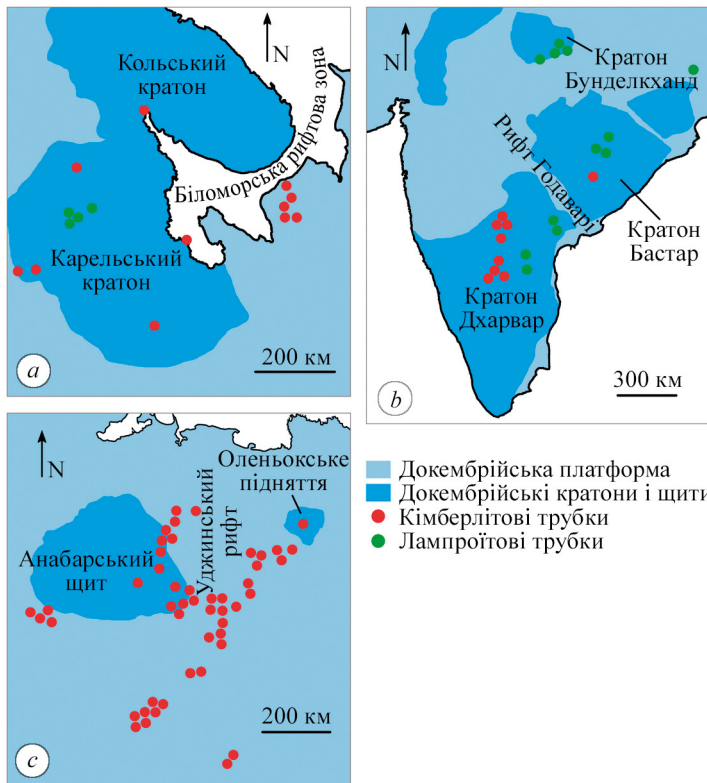
Євразія

В межах Євразії кімберлітові трубки локалізовані у наступних тектонічних структурах: Сибірська платформа, Індійська платформа, Балтійський щит, Північно-Китайський кратон та Український щит (Рис. 5) [Kjarsgaard *et al.* 2022].

В межах Балтійського щита невелику кількість кімберлітових і лампроїтових трубок виявлено на ділянках Кольського і Карельського кратонів архейського віку. Поблизу східного кордону щита поруч з палеорифтовою системою Білого моря виявлено великі алмазні родовища пізньодевонського віку (380–350 млн років тому) — імені Ломоносова та імені Гриба [Smit & Shor 2017; Kjarsgaard *et al.* 2022].

Родовище імені Гриба являє собою одну кімберлітову трубку діаметром близько 500 м. Розвідані та попередньо оцінені запаси складають 98,5 млн каратів алмазів. Річний видобуток становить близько 3,6 млн каратів¹⁰. Родовище імені Ломоносова складається з шести кімберлітових трубок (Архангельська, Карпінського-1, Карпінського-2, Піонерська, Поморська, імені Ломоносова). Загальні запаси складають 167 млн каратів алмазів. Річний видобуток становить близько 2 млн каратів [Smit & Shor 2017].

В межах Українського щита виявлено три кімберлітові трубки середньодевонського віку (Надія, Південна, Новоласпінська) в Приазовському блоці архейського віку (південно-східна частина щита). Також уламки



кімберлітів виявлено на північному заході щита (Волинський блок протерозойського віку) [Geiko *et al.* 2004].

В межах Індійської платформи кімберлітові трубки виявлено в архейських та протерозойських породах кратонів Бастар та Дхарвар. Більшість з них розташовано в алмазозному регіоні Голконда (північ кратону Дхарвар, південно-західніше рифту Годаварі).

Рис. 5. Розташування кімберлітових і лампроїтових трубок на території Євразії: (а) Балтійський щит; (б) Індія; (с) Сибірська платформа (за даними [Apen *et al.* 2022; Kjarsgaard *et al.* 2022], зі змінами).

Fig. 5. Distribution of kimberlite and lamproite pipes in Eurasia: (a) Baltic Shield; (b) India; (c) Siberian Platform (after [Apen *et al.* 2022; Kjarsgaard *et al.* 2022], with changes).

⁹ Про це є в базі даних: Kimberley *et al.* 2004. PorterGeo Database — Ore Deposit.

¹⁰ Див. препринт: Kaminski, V., V. Nabieva, A. Frolov, I. Shalovenkova, A. Davydenko. 2023. Geological mapping of Grib Kimberlite Pipe using 3D magnetization vector inversion from airborne data. Preprints, 2023060708.

У регіоні видобуто близько 10 млн каратів алмазів з розсипних родовищ Крішна Рівер і Пеннар Рівер, але також виявлено понад 100 кімберлітових трубок середньопротерозойського (близько 1100 млн років тому) та пізньокрейдового (90–85 млн років тому) віку. Також на півночі Індійської платформи в межах кратону Бунделкханд є невелика кількість лампроїтових трубок [Chalapathi Rao *et al.* 2016; Kjarsgaard *et al.* 2022].

На сході Євразії кімберлітові трубки виявлено в межах Північно-Китайського кратону. Це великий кратон площею 1,7 млн км², розташований на північному сході Китаю та півночі Корейського півострова. На території кратону знаходяться алмазні родовища віком від ранньордовикського (485–460 млн років тому) до пізньодевонського (380–370 млн років тому): Вафангдіан (видобуток — 60 тис. каратів алмазів на рік), 701 Чангма (дві кімберлітові трубки, видобуток — 90 тис. каратів алмазів на рік), Менгінь (10 кімберлітових трубок) та трубка Шенлі [Michaud 2005].

На території Сибірської платформи переважна більшість кімберлітових трубок (більше 1100 трубок, кімберлітових дайок та жил, більше 20 родовищ алмазів) знаходиться в межах Анабарської антеклізи. На півночі антеклізи розташовані два виступи докембрійського фундаменту — архейський Анабарський щит та ранньпротерозойське Оленьокське підняття, розділені Уджинським палеорифтом. В межах цих структур розташована велика кількість кімберлітових трубок палеозойського та мезозойського віку [Aren *et al.* 2022].

Докембрійський фундамент центральної та південної частини Анабарської антеклізи вкритий чохлом ранньопалеозойських відкладів. На цій території виявлено великі алмазоносні райони — Мало-Ботуобінський, Далдино-Алакитський, Накинський та Верхньо-Мунський [Kjarsgaard *et al.* 2022].

В межах Накинського алмазоносного району виявлено дві кімберлітові трубки — Нюрбинська (сумарні запаси складають 145,37 млн каратів) та Ботуобінська (сумарні запаси складають 102,24 млн каратів). З кар'єру на трубці Нюрбинська (розміри — 1945×1050 м) ведеться видобуток близько 12 млн каратів алмазів на рік¹¹. В межах Верхньо-Мунського алмазоносного району виявлено 16 кімберлітових трубок, в тому числі алмазні родовища Заполярна (сумарні запаси складають 21,7 млн каратів), Деймос (сумарні запаси складають 1,58 млн каратів), Новінка (сумарні запаси складають 10,54 млн каратів), Комсомольська-Магнітна (сумарні запаси складають 6,61 млн каратів)¹¹.

В межах Далдино-Алакитського алмазоносного району виявлено більше 120 кімберлітових трубок включно з великими алмазними родовищами: (1) родовище Удачна (дві кімберлітові трубки, розташовані поруч одна з одною, сумарні запаси складають 1,026 млрд каратів, річний видобуток становить близько 4,5 млн каратів); (2) трубка Ювілейна (розміри — 1293×741 м, площа — 56 га, сумарні запаси складають 297,2 млн каратів, річний видобуток становить 5,1 млн каратів); (3) трубка Айхал (сумарні запаси складають 136,5 млн каратів, річний видобуток становить 2,9 млн каратів); (4) трубка Комсомольська (сумарні запаси складають 7,36 млн каратів); (5) трубка Зарниця (сумарні запаси складають 43,7 млн каратів, річний видобуток становить 200 тис. каратів); (6) трубка Заря (розміри — 480×260 м, сумарні запаси складають 7,1 млн каратів); (7) трубка Краснопресненська (сумарні запаси складають 35,1 млн каратів); (8) трубка Дальня (сумарні запаси складають 9,7 млн каратів); (9) трубка Ситиканська (дві кімберлітові трубки, розташовані поруч одна з одною, розміри — 736×160 м та 205×62 м, сумарні запаси складають 14,26 млн каратів) [Kostrovitsky *et al.* 2023].

Мало-Ботуобінський алмазоносний район знаходиться на півдні Анабарської антеклізи поблизу Вілюйського палеорифту. В межах району виявлено 9 кімберлітових трубок, в тому числі великі алмазні родовища, розташовані переважно поруч з зонами глибинних розломів:

¹¹ Див. препринт: Kostrovitsky, S., D. Iakovlev, Z. Spetsius, K. Garanin. 2023. Primary diamond deposits of the Siberian craton: geology, petrology and mineralogy insights. Preprint (Version 1) available at Research Square.

(1) трубка Мир (сумарні запаси складають 453 млн каратів); (2) трубка Інтернаціональна (сумарні запаси складають 146,2 млн каратів, річний видобуток становить 2,2 млн каратів); (3) трубка Дачна (розміри трубки — 120×100 м, сумарні запаси складають 700 тис. каратів алмазів); (4) трубка «Ім. 23 з'їзду КПРС» (розміри трубки — 120×80 м, сумарні запаси складають близько 1 млн каратів алмазів) [Kostrovitsky *et al.* 2023].

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження кімберлітових трубок є важливими для поглиблення розуміння корової та верхньомантіїної геодинаміки, а також для виявлення нових родовищ алмазів та інших корисних копалин.

Одними з перспективних напрямків є ізотопні, мінералогічні та петрографічні дослідження. Вивчення ізотопного складу кімберлітів та включень у них може надати інформацію про вік і джерела походження кімберлітової магми та її ксенолітів. Дослідження фацій метаморфізму в районах локалізації кімберлітових трубок має сприяти кращому розумінню механізмів їх формування і пошуку нових трубок.

Важливим напрямком також є вдосконалення існуючих геофізичних методів пошуку кімберлітових трубок, таких як аеромагнітна зйомка, гравіметрія, сейсморозвідка, магнітотелуричне зондування, часово-інтервальна електромагнітна розвідка (TDEM) та вивчення теплового поля земної поверхні на основі спектрального аналізу супутникових знімків. Ці методи мають обмежену придатність при застосуванні в умовах складної геологічної будови чи слабких контрастів між кімберлітами та вміщуючими породами. Розробка нових сенсорів із підвищеною чутливістю, а також удосконалення алгоритмів обробки сигналів можуть значно підвищити точність ідентифікації кімберлітів. Інтеграція кількох геофізичних методів дозволить створювати тривимірні моделі підповерхневих структур, що є особливо важливим для районів, де кристалічний фундамент приховано під шаром осадових порід.

Також залишаються актуальними дослідження розсипних родовищ алмазів, оскільки вони є індикаторами наявності корінних джерел — кімберлітових трубок. Вивчення напрямків переміщення уламків кімберлітів та шляхів транспортування алмазів є важливим для визначення місць розташування материнських трубок, які ще не виявлені.

Одним з найбільш сучасних напрямків досліджень є використання штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу великих масивів геологічних, геофізичних та геохімічних даних, що відкриває нові можливості для пошуку кімберлітових трубок. Основні напрями застосування: а) автоматизоване картування перспективних областей шляхом інтеграції супутникових знімків, геофізичних даних та інформації про відомі кімберлітові трубки, б) машинне навчання для прогнозування родовищ, що дозволяє виявляти закономірності розташування кімберлітів на основі статистичного аналізу великих наборів даних, в) моделювання мантіїних процесів, що допоможе визначити потенційні місця виходу кімберлітів на поверхню. Використання таких технологій дозволить значно скоротити терміни та вартість геологорозвідувальних робіт.

Подальші дослідження в цих напрямках мають великий потенціал для поглиблення знань про корову та мантіїні геологічні процеси, а також удосконалення технологій розвідки і видобутку алмазів та інших корисних копалин. Інтеграція геохімічних, геофізичних та цифрових методів дозволить не лише прогнозувати виявлення нових алмазоносних регіонів, але й покращити розуміння динаміки літосфери.

Висновки

Аналіз сучасних даних просторового розподілу кімберлітових трубок дозволяє стверджувати:

1. Кімберлітові трубки розташовані виключно на материковій земній корі (на океанічних плитах трубок немає).

2. Кімберлітові поля розташовані в межах древніх платформ (кратонів) з фундаментом архейського та ранньопротерозойського віку.
3. В межах фанерозойських складчастих областей (каледонських, герцинських, альпійських тощо) кімберлітові трубки відсутні.
4. У островодужних та окраїнно-континентальних вулкано-плутонічних пасмах кімберлітові трубки відсутні.
5. У більшості випадків кімберлітові трубки знайдено на підняттях фундаменту, таких як щити та антеклізи.
6. Досить часто простежується тенденція до розташування кімберлітових полів на бортах внутрішньоконтинентальних та міжконтинентальних рифтових зон.
7. Вік кімберлітових трубок та вік порід, які їх вміщують, між собою не корелюють. Вміщуючі породи або породи кристалічного фундаменту під фанерозойським осадовим чохлам, які перетинаються кімберлітами, мають архейський або ранньопротерозойський вік (від 3500 до 1600 млн років тому), в той час як вік кімберлітових трубок може коливатись у значних межах — від пізньоархейського до еоценового (від 2800 до 45 млн років тому).
8. Географічна близькість кімберлітових трубок не завжди вказує на одночасність їхнього формування. В межах більшості алмазоносних регіонів спостерігається наявність кімберлітових трубок, які розташовані порівняно близько одна від одної, але дуже відрізняються за віком утворення (наприклад, кратон Слейв, трубки родовищ Дайавік і Снеп Лейк — 55 і 535 млн років тому відповідно, відстань між ними складає 100 км).
9. Просторова близькість різновікових алмазоносних кімберлітових та/або лампроїтових трубок може вказувати на розміщення джерел алмазів у певних ділянках нижніх горизонтів континентальної літосфери. Мантійні магматичні процеси, можливо, лише виносять алмази з цих джерел на поверхню в різні геологічні епохи, але в єдиному регіоні.

Розуміння закономірностей просторового розподілу кімберлітових трубок має допомогти визначити перспективні райони для пошуку нових трубок, що може призвести до відкриття нових родовищ алмазів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на детальне вивчення тектонічної структури глибинних горизонтів районів поширення кімберлітових трубок та дії на них мантійних процесів.

Декларації

Фінансування. Дослідження виконано в рамках підготовки дисертаційної роботи за темою «Співставлення структури та складу докембрійських фундаментів різних алмазоносних провінцій світу».

Конфлікт інтересів. Автор не має жодних конфліктів інтересів, які могли б вплинути на зміст цієї статті.

References

- Apen, F., R. Rudnick, D. Ionov, J. Cottle, J. Moyen, A. Golovin, A. Korsakov. 2022. Heat transfer and production in cratonic continental crust: U-Pb thermochronology of xenoliths from the Siberian Craton. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **23** (10): e2022GC010497. <https://doi.org/10.1029/2022GC010497>
- Chalapathi Rao, N. V., A. Dongre, F.-Y. Wu, B. Lehmann. 2016. A Late Cretaceous (ca. 90 Ma) kimberlite event in southern India: Implication for sub-continental lithospheric mantle evolution and diamond exploration. *Gondwana Research*, **35**: 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.006>
- Clifford, T. N. 1966. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, **1**: 421–434.
- Cordani, U. G., W. Teixeira, M. S. D'Agrella-Filho, R. I. Trindade. 2009. The position of the Amazonian Craton in supercontinents. *Gondwana Research*, **15**: 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.12.005>
- Davis, W. J., A. G. Jones, W. Bleeker, H. Grütter. 2003. Lithosphere development in the Slave craton: a linked crustal and mantle perspective. *Lithos*, **71**: 575–589. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(03\)00131-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(03)00131-2)
- Geiko, Y. V., V. S. Metalidi, L. I. Lykov, V. L. Prykhodko. 2004. The state and prospects of geological exploration for diamonds in the Right-Bank Ukraine. In: Gurskyi, D. S. (ed.). *Problems of diamond content of the territory of Ukraine*. Kyiv, 7–18. [In Ukrainian]
- Girnis, A., I. Ryabchikov. 2005. Generation of kimberlite magmas: Conditions and mechanisms. *Geology of Ore Deposits*, **47**: 524–536.
- Grabreck, A., N. Flament, Ö. F. Bodur. 2022. Mapping global kimberlite potential from reconstructions of mantle flow over the past billion years. *PLoS One*, **17**: e0268066. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268066>

- Helmstaedt, H., J. Gurney, S. Richardson. 2011. Ages of cratonic diamond and lithosphere evolution: Constraints on precambrian tectonics and diamond exploration. *The Canadian Mineralogist*, **48**: 1385–1408. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1385>
- Iizuka, T., T. Komiya, Y. Ueno, I. Katayama, Y. Uehara, S. Maruyama, T. Hirata, S.P. Johnson, D.J. Dunkley. 2007. Geology and zircon geochronology of the Acasta Gneiss Complex, northwestern Canada: New constraints on its tectonothermal history. *Precambrian Research*, **153**: 179–208. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.11.017>
- Janse, A. J. A. 1994. Is Clifford's Rule still valid? Affirmative examples from around the World. *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference, Araxa, Brazil 1991*, **2**: 215–235.
- Janse, A. J. A., P. A. Sheahan 1995. Catalogue of world-wide diamond and kimberlite occurrences: a selective and annotative approach. *Journal of Geochemical Exploration*, **53**: 73–111.
- Kamenetsky, V. S., A. V. Golovin, R. Maas, A. Giuliani, M. B. Kamenetsky, Y. Weiss. 2014. Towards a new model for kimberlite petrogenesis: Evidence from unaltered kimberlites and mantle minerals. *Earth-Science Reviews*, **139**: 145–167. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.004>
- Kaminsky, F. V., O. D. Zakharchenko, W. L. Griffin, D. M. Channer, G. K. Khachatryan-Blinova. 2000. Diamond from the Guaniamo area, Venezuela. *The Canadian Mineralogist*, **38**: 1347–1370. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.6.1347>
- Kaminsky, F. V., S. M. Sablukov, E. A. Belousova, P. Andreazza, M. Tremblay, W. L. Griffin. 2010. Kimberlitic sources of super-deep diamonds in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos*, **114**: 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.012>
- Kjarsgaard, B. A. 2007. Kimberlite pipe models: significance for exploration. *Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration (Toronto, 9–12 September 2007)*. Toronto, 667–677.
- Kjarsgaard, B., M. Wit, L. Heaman, G. Pearson, J. Stiefenhofer, N. Januszczak, S. Shirey. 2022. A review of the geology of global diamond mines and deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **88**: 1–117. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.01>
- Kroonenberg, S., E. de Roever. 2010. Geological evolution of the Amazonian Craton. In: Hoorn, C., F. P. Wesselingh (Eds.). *Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*. Hoboken, 7–28. <https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch2>
- Leveille, P., M. Sepehri, D. B. Apel. 2017. Rockbursting potential of kimberlite: a case study of Diavik Diamond Mine. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **50**: 3223–3231. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1294-z>
- Mahmoud, H. O., M. Raji, M. Adjour, I. B. Vall. 2023. Mineralization and exploration perspectives in the Oudiane Elkhroub Zone, Birimian Domain, Reguibat Shield, Mauritania. *Open Journal of Geology*, **13**: 1312–1330. <https://doi.org/10.4236/ojg.2023.1312057>
- Michaud, M. 2005. An overview of diamond exploration in the North China Craton. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, 1547–1549. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_394
- Mitchell, R., A. Giuliani, H. O'Brien. 2019. What is a kimberlite? Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites. *Elements*, **15**: 381–386. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>
- Mukherjee, A., P. Tiwari, C. B. Verma, E. V. S. S. K. Babu, J. P. Sarathi. 2021. Native gold and Au-Pt alloy in eclogite xenoliths of Kalyandurg KL-2 Kimberlite, Anantapur District, South India. *Journal of Geological Society of India*, **97**: 567–570. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1731-1>
- Myers, J., R. Shaw, I. Tyler. 1996. Tectonic evolution of Proterozoic Australia. *Tectonics*, **15**: 1431–1446. <https://doi.org/10.1029/96TC02356>
- Nkere, B. J., W. L. Griffin, P. E. Janney. 2019. Emplacement age of the Tshibwe kimberlite, Democratic Republic of Congo, by in-situ LAM-ICPMS U/Pb dating of groundmass perovskite. *Journal of African Earth Sciences*, **157**, 103502. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.05.010>
- Osei, K. P., C. L. Kirkland, D. R. Mole. 2021. Nd and Hf isoscapes of the Yilgarn Craton, Western Australia and implications for its mineral systems. *Gondwana Research*, **92**: 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.12.027>
- Percival, J., T. Skulski, M. Sanborn-Barrie, G. Stott, A. D. Leclair, M. T. Corkery, M. Boily. 2012. Geology and tectonic evolution of the Superior Province, Canada. *Geological Association of Canada Special Paper*, **49**: 321–378.
- Ruzina, M. V., O. A. Tereshkova, N. V. Bilan, I. V. Zhyltsova. 2018. Non-kimberlitic sources of diamonds and prospects of their discovery in the Ukrainian Shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, **6**: 5–12. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-6/2>
- Sarkar, S., A. Giuliani, H. Dalton, D. Phillips, S. Ghosh, S. Misev, R. Maas. 2023. Derivation of lamproites and kimberlites from a common evolving source in the convective mantle: the case for Southern African 'Transitional Kimberlites'. *Journal of Petrology*, **64**: 1–16. <https://doi.org/10.1093/petrology/egad043>
- Shellnutt, J., T. Lee, C. Yang, S. Hu, J. Wu, K. Wang, C. Lo. 2015. Late Permian mafic rocks identified within the Doba basin of southern Chad and their relationship to the boundary of the Saharan Metacraton. *Geological Magazine*, **152**: 1–12. <https://doi.org/10.1017/S0016756815000217>
- Shigley, J. E., R. Shor, P. Padua, C. M. Breeding, S. B. Shirey, D. Ashbury. 2016. Mining diamonds in the Canadian Arctic: the Diavik Mine. *Gems & Gemology*, **52**: 104–131. <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.52.2.104>
- Smit, K. V., R. Shor. 2017. Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia. *Gems and Gemology*, **53**: 144–167. <https://doi.org/10.5741/GEMS.53.2.144>

- Stiefenhofer, J., D. J. Farrow. 2004. Geology of the Mwadui kimberlite, Shinyanga district, Tanzania. *Lithos*, **76**: 139–160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.017>
- Torsvik, T., K. Burke, B. Steinberger, S. J. Webb, L. D. Ashwal. 2010. Diamonds sampled by plumes from the core–mantle boundary. *Nature*, **466**: 352–355. <https://doi.org/10.1038/nature09216>
- Whitmeyer S.J., K. E. Karlstrom. 2007. Tectonic model for the Proterozoic growth of North America. *Geosphere*, **3**: 220–259. <https://doi.org/10.1130/GES00055.1>
- Woodhead, J., J. Hergt, A. Giuliani, R. Maas, D. Phillips, D. G. Pearson, G. Nowell. 2019. Kimberlites reveal 2.5-billion-year evolution of a deep, isolated mantle reservoir. *Nature*, **573**: 578–581. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1574-8>