

Пространственно-временные корреляции между траппами, карбонатитами и кимберлитами

© О. В. Арясова, Я. М. Хазан, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев Украина
Поступила 25 апреля 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. В. Гордуенко

Спираючись на найбільш повні сучасні бази даних платобазальтів, карбонатитів і кимберлітів, продемонстровано існування просторово-часових кореляцій між цими трьома типами внутрішньоплитового магматизму. Ці кореляції повсюдно проявляються в Євразії та Африці, але відсутні у Північній Америці. Ймовірною причиною таких кореляцій є взаємодія з літосферою «голови» гігантського мантийного плюму, яка майже одночасно викликає магматизм на території розміром порядку перших тисяч кілометрів, об'єм і склад якого залежать від тектонічної будови і теплового стану літосфери. Відмінність Євразії і Африки, з одного боку, і Північної Америки, з іншого, пов'язана, певно, з тим, що за останні 350 млн років Північна Америка, на відміну від Євразії та Африки, не розташовувалась над африканською або тихоокеанською областями генерації плюмів.

Based upon the most complete modern plateau basalt, carbonatite and kimberlite databases, we show the existence of spatiotemporal correlations between these three types of intraplate magmatism. These correlations are evident everywhere in Eurasia and Africa but they are absent in North America. A probable cause of such correlations is an interaction of a giant plume «head» with the lithosphere, which generates almost simultaneous magmatic activity over a territory of a few thousand kilometers across with magma volume and composition depending on the tectonic structure and thermal state of lithosphere. A distinction of Eurasia and Africa on one side and North America on the other is probably related to the fact that during the last 350 M years North America in contrast to Eurasia and Africa were not situated above the African and Pacific zones of plume generation.

В настоящее время в литературе активно обсуждается вопрос о возможном существовании связей между тремя типами внутриплитового магматизма — траппами, кимберлитами и карбонатитами (например, [Белов, 2008; Ernst, Bell, 2010; Torsvik et al., 2010]), а также возможность того, что генерация магматитов вызывается плюмовой активностью. В данной статье проверим существование корреляции между этими тремя типами внутриплитового магматизма с использованием наиболее полных современных баз данных платобазальтов (<http://www.largeigneousprovinces.org/record>), карбонатитов [Woolley, Kjarsgaard, 2008] и кимберлитов [Fauge, 2010]. Покажем, что в фанерозое корреляции между платобазальтами и, по крайней мере, одним типом ультраосновного магматизма повсеместно наблюдаются в Евразии и Африке, но отсутствуют в Северной Америке, и обсудим причины этого различия.

Гигантские провинции изверженных пород (Large Igneous Provinces — LIPs), т. е. кон-

тинентальные платобазальты (или траппы) и океанические плато, представляют собой огромные по площади и объему (во многих случаях более 1 млн км² и 1 млн км³) и кратковременные (1—5 млн лет) или состоящие из кратковременных импульсов внутриплитовые базальтовые излияния. LIPs не имеют отношения к процессам спрединга или субдукции, но с ними могут быть связаны региональные поднятия, рифтообразование, разрушение континентов.

Карбонатиты обнаружены на всех континентах, включая Антарктику, и некоторых океанических островах (Кергелен, Кэйп Верде, Канарские острова). Суммарный объем карбонатитовых излияний составляет менее 1% объема LIPs, но примерно в 100 раз превышает суммарный объем кимберлитовых проявлений. Карбонатиты экстремально обогащены редкими и рассеянными элементами и часто ассоциируются с промышленными редкометалльными месторождениями. Вязкость карбонатитов является очень низкой [Norton,

Pinkerton, 1997], поэтому скорость их доставки на поверхность так же велика, как скорость доставки кимберлитов (десятки метров в секунду). Как и для кимберлитов, для карбонатитов характерными являются кластерные внедрения. При этом наблюдается тенденция предпочтительного внедрения карбонатитовых проявлений в докембрийской кратонной обстановке [Woolley, Kjarsgaard, 2008].

В качестве причин, вызывающих магматизм такого гигантского масштаба, как плато-базальты, рассматриваются мантийные плюмы, импактные события, рифтообразование и декомпрессионное плавление, а также вытеснение континентальной литосферы горячей астеносферой. Плюмовое объяснение (например, [White, McKenzie, 1995; Turner et al., 1996]) предполагает, что излияния платобазальтов возникают при первом контакте с литосферой глубинного мантийного плюма, который при приближении к подошве литосферы образует гигантскую (радиусом порядка 1000 км) «шапку» или «голову». Основываясь на данных сейсмотомографии [Becker, Boschi, 2002; Boschi et al., 2007] и палеореконструкции движений плит, авторы работ [Torsvik et al., 2006; Burke et al., 2008] показали, что извержения большинства фанерозойских платобазальтов, по-видимому, возникают под влиянием мантийных плюмов, формирующихся на границе мантия–ядро в так называемой зоне генерации плюмов. Эта зона расположена вдоль границы крупнейших неоднородностей в глубинной мантии (гигантских провинций пониженной скорости поперечных волн) и совпадает с контуром понижения V_s на 1%. Ниже будет предполагаться справедливость плюмового объяснения происхождения LIPs.

Происхождение карбонатитов также связывается с мантийными плюмами. Помимо геохимических данных, свидетельствующих о присутствии в составе карбонатитов вклада глубинной мантии (например, [Сафонов, Перчук, 2009; Kogarko et al., 2010]), повсеместно наблюдаются пространственные и временные корреляции карбонатитов и траппов. Эрнст и Белл [Ernst, Bell, 2010] на многих примерах продемонстрировали существование тесной связи между карбонатитовым и базальтовым типами платформенного магматизма. Эта связь включает пространственные корреляции (карбонатиты локализируются в зонах рифтогенеза, на сводовых поднятиях, а области проявления траппового магматизма приурочены к примыкающим к ним структу-

рам прогибания — синеклизам и линейным прогибам [Белов и др., 2008]), а также близость во времени [Ernst, Bell, 2010] с некоторой, хотя не вполне определенной, тенденцией опережения карбонатитами траппов.

Идея о генерации кимберлитов мантийными плюмами, которая первоначально мотивировалась сходством изотопных характеристик кимберлитов и базальтов океанических островов (БОО) [Crough et al., 1980; Crough, 1981; Smith et al., 1985], в настоящее время подтверждается геологическими, геохимическими и геофизическими данными [Агашев и др., 2000; Bell, Tilton, 2001, 2002; Dickin, 2005; Becker, le Roex, 2006; Костровицкий и др., 2007; Белов и др., 2008; Ernst, Bell, 2010; Bell, Simonetti, 2010; Kogarko et al., 2010; Torsvik et al., 2010; Safonov et al., 2011], установившими сублитосферное происхождение всех трех типов магм и их связь с крупномасштабным строением мантии. В дополнение к этому Торсвик и другие [Torsvik et al., 2010] показали, что 80 % кимберлитов (1112 из 1395), которые моложе 320 млн лет (формирование Пангеи), в момент извержения проектировались как и области излияния платобазальтов на границу мантия — ядро не далее $7\pm 5^\circ$ от контура понижения V_s на 1 %.

Связь кимберлитовых и карбонатитовых извержений с трапповыми излияниями во многих случаях является очевидной вследствие временной и пространственной близости [Gibson et al., 1995; Ernst, Bell, 2010; Bell, Simonetti, 2010; Torsvik et al., 2010; Chalapathi Rao, Lehmann, 2011]. При этом, однако, обращает на себя внимание «антагонистичность» имеющих сходный мантийный источник и сходный состав карбонатитов и кимберлитов. В частности, более 70% кимберлитов проявляется на архейском фундаменте, в то время как более 90% карбонатитов обнаруживается на протерозойской коре [Белов и др., 2008; Woolley, Kjarsgaard, 2008]. Для массивов карбонатитов и кимберлитовых трубок типично кустовое (кластерное) размещение, но при этом классические редкометалльные карбонатитовые массивы не сопровождаются алмазоносными кимберлитами, а на территории кимберлитовых полей, как правило, не встречаются классические карбонатиты [Белов и др., 2008]. Подавляющая часть карбонатитов располагается во внутренних и бортовых частях рифтовых зон, а с удалением от оси рифтогенных структур интенсивность проявления резко снижается. В то же время до 40 %

кимберлитов располагаются на удалении более 200 км от рифтовых структур. Кроме того, максимум алмазопродуктивности приходится на поля в пределах архейских кратонов, не затронутых рифтогенной активизацией [Белов и др., 2008]. Иначе говоря, эти магматиты занимают резко различающиеся тектонические позиции.

Два характерных примера связи между траппами, карбонатитами и кимберлитами показаны на рис. 1, 2.

На первом из них показана область Танзанийского кратона на Кенийском поднятии вблизи траппов Афага, которые изливались 45—34 и 31—29 млн лет тому назад [Rogers, 2006]. Им предшествовали кимберлиты третичного возраста (53—40 млн лет), внедрившиеся на Танзанийском щите [Ebinger et al., 1987], и карбонатиты вблизи периферии щита, извержение которых началось 45 млн лет тому назад и продолжается по настоящее время (в этой области находится единственный на Земле действующий карбонатитовый вулкан Олдоньо Ленгаи). Существование Кенийского поднятия и окружающей его кольцевой рифтовой структуры, аномально низкие сейсмические скорости в мантии Танзанийского кратона и их радиальная анизотропия, по-видимому, свидетельствуют о том, что под Танзанийским кратоном существует восходящий плюм, который испытывает частичное плавление и растекается под прилегающие западную и восточную ветви Восточно-Африканского рифта [Weerante et al., 2003].

На рис. 2 показана область Сибирских траппов (251—249 млн лет). Восточнее этой области на периферии Анабарского щита располагаются нижнетриассовые кимберлитовые поля Оленек-Анабарской зоны и Красноярского края (Котуйское, Харамайское, Куранахское, Лучаканское, Дюкенское, Ары-Мастахское, Старореченское, Орто-Ыаргынское) [Харьков и др., 1998], а между траппами и Анабарским щитом находится Маймеча-Котуйская провинция ультраосновных щелочных магматитов (250 млн лет). Расходящийся рой гигантских даек [Ernst, Bell, 2010] указывает на существование поднятия в эпоху магматизма. Центр поднятия предположительно находился в районе Норильска или несколько восточнее.

Необходимо в то же время отметить, что полный набор магматитов присутствует не во всех случаях. Среднепалеозойские кимберлиты Сибири связаны, вероятнее всего, с

Виллюйскими траппами, однако отсутствуют карбонатиты, которые можно было определенно поставить им в соответствие (возможно, карбонатитовые месторождения хребта Сетте-Дабан). С траппами Кару (южная Африка) — Феррар (Антарктика) (183—179 млн лет), по-видимому, связаны карбонатиты Дулстром-Эландсклооф, ЮАР (176 млн лет) и, может быть, Доколвей, Свазиленд (203 млн лет), однако явно соответствующие им кимберлиты в настоящее время неизвестны (Шавва, Зимбабве, 209 млн лет?). В настоящее время неизвестны также платобазальты и карбонатиты, которые можно было бы поставить в соответствие кимберлитам Ботсваны (250—225 млн лет) и Замбии (220 млн лет).

Таким образом, анализ пространственно-временных соотношений между траппами, карбонатитами и кимберлитами свидетельствует о том, что внутриплитовые магматиты Евразии и Африки, возраст которых не превышает девонский, как правило, обнаруживают пространственно-временные корреляции, указывающие на то, что эти типы магматизма имеют некоторую общую причину, по-разному проявляющуюся в различной тектонической обстановке. В целом ситуация выглядит так, как будто одна и та же причина, вызывающая магматизм («голова» мантийного плюма?), воздействуя на обширную территорию размерами порядка первых тысяч километров, приводит к значительно различающимся следствиям в зависимости от тектонической обстановки. В областях архейского и раннепротерозойского фундамента она вызывает генерацию кимберлитов, в рифтогенных зонах — карбонатитов, а областях прогиба — трапповых излияний. В этом случае, например, объяснение «антикорреляции» кимберлитов и карбонатитов становится тривиальным: карбонатиты не могут генерироваться в обстановке древних кратонов, а кимберлиты — в условиях, где литосфера недостаточно мощная и холодная. С этой схемой согласуется изотопная систематика всех трех типов магматитов, указывающая на присутствие в их составе глубинной составляющей [Агашев и др., 2000; Bell, Tilton, 2001, 2002; Dickin, 2005; Becker, le Roex, 2006; Костровицкий и др., 2007; Bell, Simonetti, 2010; Kogarko et al., 2010].

Если справедлив описанный сценарий и некоторая область траппового магматизма располагается вблизи архейского щита, то можно ожидать проявления на щите кимбер-

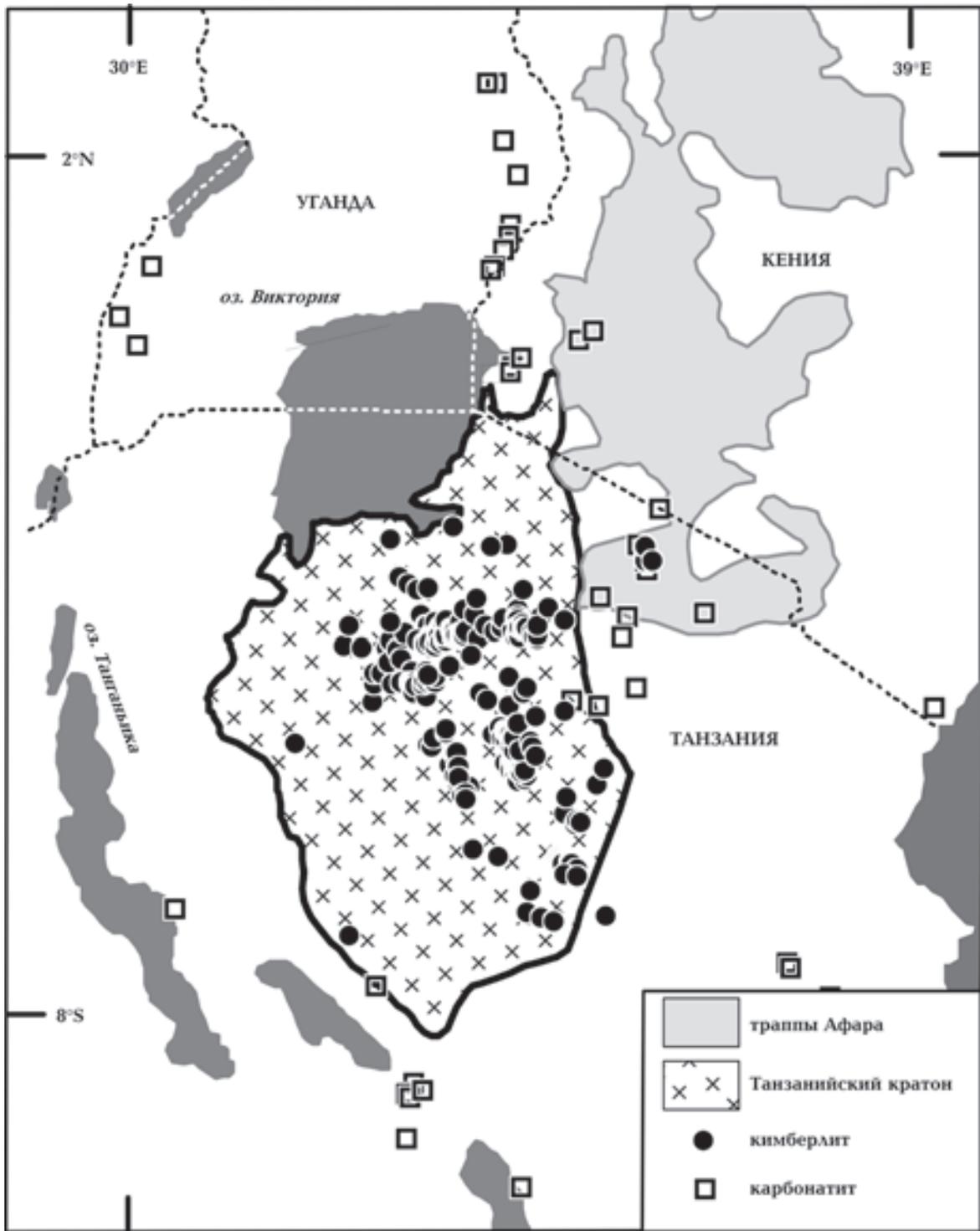


Рис. 1. Траппы Афара (45—34, 31—29 млн лет; светлосерое поле), карбонатитовые (45—0 млн лет; квадраты) и кимберлитовые (53—40 млн лет; кружки) проявления.

литового магматизма. Не удивительно поэтому, что основные зоны на Украинском щите, оцениваемые по геолого-геофизическим данным как алмазо-перспективные [Гейко и др.,

2006], располагаются вдоль границы Волыньских траппов (рис. 3).

Совершенно другая ситуация наблюдается в Северной Америке. В настоящее время

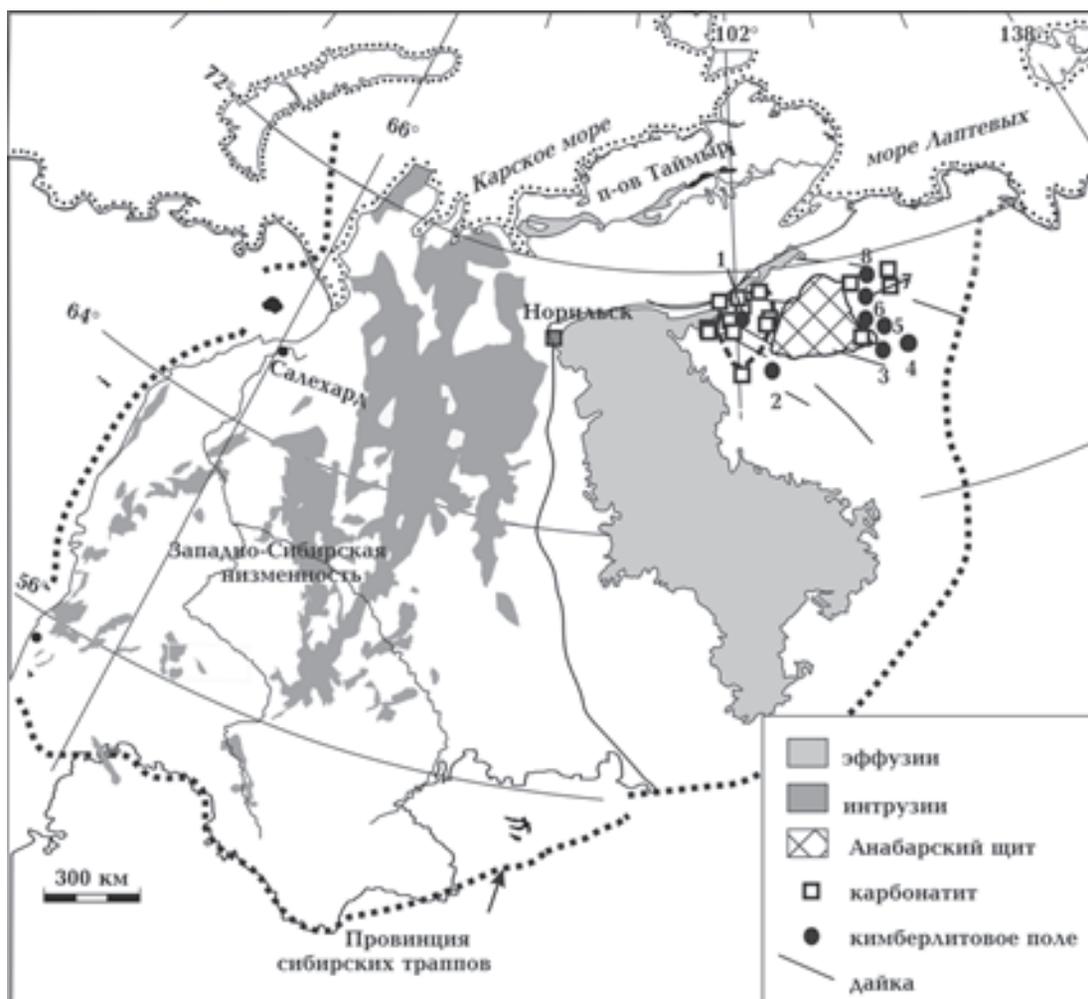


Рис. 2. Сибирские траппы (251—249 млн лет; светлосерое (эффузии) и темносерое (интрузии) поля), карбонатиты Маймечо-Котуйской и Анабарской провинций щелочного магматизма (250 млн лет; квадраты) и нижнетриассовые кимберлитовые поля Оленек-Анабарской зоны и Красноярского края (кружки: 1 — Котуйское, 2 — Харамайское, 3 — Куранахское, 4 — Лучаканское, 5 — Дюкенское, 6 — Ары-Мастахское, 7 — Старореченское, 8 — Орто-Ыргынское).

в Северной Америке (вместе с Гренландией) известно около 1400 кимберлитовых проявлений [Faure, 2010], 112 карбонатитовых [Woolley, Kjarsgaard, 2008] и более 80 событий, относимых к LIPs, в том числе 18 фанерозойского возраста. Несмотря на это, ни одного надежного соответствия между фанерозойскими трапповыми излияниями и кимберлитовыми или карбонатитовыми проявлениями установить не удается.

Характерным примером является кимберлитовое поле Lac de Gras на кратоне Слэйв, Канада, на котором к моменту опубликования базы данных [Faure, 2010] известно 198 кимберлитовых проявления с возрастом 74—47 млн лет, т. е. примерно 15% всех североамериканских кимберлитов. Несмотря на то, что эпоха активного кимберлитового вулканизма

на кратоне Слэйв совпадает по времени с повышенной магматической активностью по периферии Канады, нет прямых указаний на активизацию непосредственно под полем Lac de Gras. Тем не менее, поскольку кимберлитовый магматизм требует высоких температур в источнике, интенсивный кимберлитовый вулканизм однозначно свидетельствует о термальном воздействии на подошву литосферы Канады. Однако, по-видимому, масштабы этого воздействия были недостаточны для проявления в виде сопутствующего базальтового магматизма. Заметим, что кимберлиты Канады, как показали Торсвик и другие [Torsvik et al., 2010], являются «аномальными» в том смысле, что это единственная группа кимберлитов с возрастными не более 250 млн лет, которые сформировались вдали от обла-



Рис. 3. Взаимное расположение траппов и перспективных для поиска коренных месторождений алмазов участков на Украинском щите, выделяемых по геолого-геофизическим данным.

сти генерации плюмов, расположенной над границей африканской и тихоокеанской областей пониженных скоростей поперечных волн на границе мантии и ядра. Это дополнительно подчеркивает, что гигантские мантийные плюмы возникают только в определенных условиях, существующих на границе долгоживущих и, видимо, отличающихся по составу от остальной мантии гигантских образований на границе мантии с ядром.

Отсутствие пространственно-временных корреляций между североамериканскими базальтовыми излияниями, кимберлитами и карбонатитами, как и отсутствие континентальных платобазальтов, сравнимых по объему с масштабными событиями, происходившими в других регионах, указывает на то, что литосфера Северной Америки в фанерозое не подвергалась воздействию гигантских мантийных плюмов. Вероятно, это связано с тем, что в течение фанерозоя Северная Америка не располагалась над зонами генерации плюмов на границе мантия—ядро. Несмотря на это, в Северной Америке открыто около

полутора тысяч кимберлитов и более ста карбонатитов. Многие кимберлиты являются алмазоносными, а их состав по всем основным признакам не отличается от кимберлитов других провинций. Можно предположить, что литосфера Северной Америки подвергалась воздействию плюмов меньшего масштаба, чем суперплюмы, приведшие к излияниям, подобным крупнейшим континентальным или океаническим платобазальтам. К таким малым плюмам можно отнести, например, мантийное возмущение, вызвавшее излияния базальтов р. Колумбия, объем которых (175000 км^3) составляет менее 10 % объема крупных океанических и континентальных платобазальтов. Вероятно, малые плюмы не приводят к образованию обширной «головы», которая, воздействуя на участки литосферы разного строения, генерирует почти синхронные магматиты различных типов.

Заключение. Таким образом, пространственно-временные корреляции между траппами, карбонатитами и кимберлитами повсеместно проявляются в Евразии и Африке, но

отсутствуют в Северной Америке. Наиболее вероятно, внутриплитовый магматизм всех трех типов вызывается плюмовой активно-

стью, но масштабы этой активности в мантии Евразии и Африки, с одной стороны, и Северной Америки, с другой, различаются.

Список литературы

- Агашев А. М., Орихаши Ю., Ватанабе Т., Похиленко Н. П., Серенко В. П. Изотопно-геохимическая характеристика кимберлитов сибирской платформы в связи с проблемой их происхождения // Геология и геофизика. — 2000. — **41**. — С. 90—99.
- Белов С. В., Лапин А. В., Толстов А. В., Фролов А. А. Минерогения платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты). — Новосибирск: Изд. СО РАН, 2008. — 537 с.
- Гейко Ю. В., Гурский Д. С., Лыков Л. И., Металили В. С., Павлюк В. Н., Приходько В. А., Цымбал С. Н., Шимкив Л. М. Перспективы коренной алмазоносности Украины. — Киев-Львов: Центр Европы, 2006. — 223 с.
- Костровицкий С. И., Морикио Т., Серов И. В., Яковлев Д. А., Амирджанов А. А. Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2007. — **48**, № 3. — С. 350—371.
- Сафонов О. Г., Перчук Л. Л. Карбонатит-кимберлитовые тренды в хлорид-карбонат-силикатных системах в условиях верхней мантии / Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Матер. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Д. С. Коржинского. — Москва: ИГЕМ РАН (7—9 октября 2009 г.), 2009. — С. 351—355.
- Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Алмазные месторождения мира. — Москва: Недра, 1998. — 554 с.
- Becker M., le Roex A. P. Geochemistry of South African on- and off-craton, Group I and Group II kimberlites: petrogenesis and source region evolution // J. Petrology. — 2006. — **47**. — P. 673—703.
- Becker T. W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochem. Geophys. Geosyst. — 2002. — **3**, № 1. — 1003. — doi: 10.1029/2001GC000168.
- Boschi L., Becker T. W., Steinberger B. Mantle plumes: dynamic models and seismic images // Geochem. Geophys. Geosyst. — 2007. — **8**. — Q10006. — doi: 10.1029/2007GC001733.
- Bell K., Simonetti A. Source of parental melts to carbonatites—critical isotopic constraints // Miner. Petrol. — 2010. — **98**. — P. 77—89.
- Bell K., Tilton G. R. Nd, Pb and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: evidence for mantle mixing and plume inhomogeneity // J. Petrology. — 2001. — **42**. — P. 1927—1945.
- Bell K., Tilton G. R. Probing the mantle: the story from carbonatites // EOS Trans. Amer. Geophys. Union. — 2002. — **83**, № 25. — P. 273—277.
- Burke K., Steinberger B., Torsvik T. H., Smethurst M. A. Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core–mantle boundary // Earth Planet. Sci. Lett. — 2008. — **265**. — P. 49—60.
- Chalapathi Rao N. V., Lehmann B. Kimberlites, flood basalts and mantle plumes: New insights from the Deccan Large Igneous Province // Earth. Sci. Rev. — 2011. — **107**. — P. 315—324.
- Crough S. T. Mesozoic hotspot epeirogeny in Eastern North America // Geology. — 1981. — **9**. — P. 2—6.
- Crough S. T., Morgan W. J., Hargraves R. B. Kimberlites: their relation to mantle hotspots // Earth Planet. Sci. Lett. — 1980. — **50**. — P. 260—274.
- Dickin A. Radiogenic isotope geology. — Cambridge: University Press, 2005. — 492 p.
- Ebinger C., Djomani Y. P., Mbede E., Foster A., Dawson J. B. Rifting Archean lithosphere: the Eyasi-Manuara–Matrion rifts, East Africa // J. Geol. Soc. London. — 1997. — **154**. — P. 947—961.
- Ernst R. E., Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // Miner. Petrol. — 2010. — **98**. — P. 55—76.
- Faure S. World Kimberlites CONSOREM Database (Version 3) / Consortium de Recherche en Exploration Minerale CONSOREM, Universite du Quebec Montreal. — 2010. — www.consorem.ca.
- Gibson S. A., Thompson R. N., Leonardos O. H., Dickin A. P., Mitchell J. G. The Late Cretaceous impact of the Trindade Mantle Plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil // J. Petrol. — 1995. — **36**. — P. 189—229.
- Kogarko L. N., Lahaye Y., Brey G. P. Plume-related mantle source of super-large rare metal deposits from the Lovozero and Khibina massifs on the Kola Peninsula, Eastern part of Baltic Shield: Sr, Nd and Hf isotope systematics // Miner. Petrol. — 2010. — **98**. — P. 197—208.

- Norton G., Pinkerton H.* Rheological properties of natrocarbonatite lavas from Oldoinyo Lengai, Tanzania // *Eur. J. Mineral.* — 1997. — **9**. — P. 351—364.
- Rogers N. W.* Basaltic magmatism and the geodynamics of the East African Rift System / Eds. Yirgu G., Ebinger C. J., Maguire P. K. H. // *The Afar volcanic province within the East African rift system.* — London: Geol. Soc. Spec. Publ., 2006. — **259**. — P. 77—93.
- Safonov O. G., Kamenetsky V. S., Perchuk L. L.* Links between carbonatite and kimberlite melts in chloride-carbonate-silicate systems: experiments and application to natural assemblages // *J. Petrology.* — 2011. — **52**. — P. 1307—1331.
- Smith C. B., Gurney J. J., Skinner E. M. W., Clement C. R., Ebrahim N.* Geochemical character of the southern African kimberlites: a new approach based on isotopic constraints // *Transactions Geol. Soc. South Africa.* — 1985. — **88**. — P. 267—280.
- Torsvik T. H., Burke K., Steinberger B., Webb S. J., Ashwal L. D.* Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary // *Nature.* — 2010. — **466**. — P. 352—357.
- Torsvik T. H., Smethurst M. A., Burke K., Steinberger B.* Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle // *Geophys. J. Int.* — 2006. — **167**. — P. 1447—1460.
- Turner S., Hawkesworth C., Gallagher K., Stewart K., Peate D., Mantovani M.* Mantle plumes, flood basalts, and thermal models for melt generation beneath continents: Assessment of a conductive heating model and application to the Parana // *J. Geophys. Res.* — 1996. — **101**. — P. 11503—11518.
- Weeraratne D. S., Forsyth D. W., Fischer K. M., Nyblade A. A.* Evidence for an upper mantle plume beneath the Tanzanian craton from Rayleigh wave tomography // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **108**, № B9. — 2427. — doi:10.1029/2002JB002273.
- White R., McKenzie D.* Mantle plumes and flood basalts // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 17543—17585.
- Woolley A. R., Kjarsgaard B. A.* Carbonatite occurrences of the world: map and database. Geological Survey of Canada. Open File 5796. — 2008. — http://geopub.nrcan.gc.ca/moreinfo_e.php?id=225115.