

«Правило Клиффорда» и геодинамика кимберлитового магматизма

© *О. В. Арясова, Я. М. Хазан, 2013*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 20 мая 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. В. Горюченко

«Правило Клиффорда» узагальнює спостереження, що вказують на приуроченість алмазопродуктивного кимберлітового магматизму до ділянок кори архейського і ранньопротерозойського віку. Хоча відомі алмазоносні і навіть високопродуктивні корінні родовища алмазів за межами архейських кратонів, «правило Клиффорда» виконується в більшості випадків. Проте при цьому з точки зору геодинаміки воно не є послідовним, оскільки кимберліти мають глибинне походження і корові структури не можуть впливати на формування протокимберлітових розплавів. Розширене «правило Клиффорда», що акцентує асоціацію корінних родовищ алмазів не з архейською корою, а з потужною деплетованою літосферою, є геодинамічно обґрунтованим і виконується практично без винятків. Крім того, таке розуміння «правила Клиффорда» робить самоочевидним пояснення асоціації кимберлітового магматизму з давніми структурами, оскільки типова для архейських кратонів літосфера не могла виникнути в постархейський час через зменшення потенційної температури конвектуючої мантії. Тому охолодження останньої фактично і є головною фізичною причиною, що зумовлює справедливність «правила Клиффорда».

The Clifford rule emphasizes the association of kimberlite magmatism with the crust areas of Archean and Early Proterozoic age. Though there are diamantiferous and highly productive primary diamond deposits outside Archean cratons, the Clifford rule is valid for most cases. However, from the geodynamics viewpoint the rule is not consistent because the kimberlites have a deep origin, and crustal structures can not affect the formation of protokimberlite melts. The extended Clifford rule associates the primary diamonds deposits not with the Archean crust but with the thick depleted lithosphere. It is geodynamically justified and has almost no exceptions. Besides, with such an interpretation of the Clifford rule the association of the kimberlite magmatism with the ancient structures becomes self-evident because a lithosphere characteristic of Archean cratons could not be formed later due to a decrease of the potential temperature of the convecting mantle since Archean. Therefore the cooling of the convecting mantle is in fact the primary physical reason underlying the validity of the Clifford rule.

Введение. В 1966 г. Т. Клиффорд проанализировал локализацию металлогенических провинций в Африке и пришел к заключению, что часть из них (Cu, Pb, Zn, Co, Sn, W, Be, Nb-Ta) тяготеют к «молодым орогенам», время от времени испытывавшим орогенез в течение последних примерно 1200 млн лет, а другие (Au, Fe, Cr, алмазы) приурочены к «более древним кратонам», которые оставались стабильными в течение, по крайней мере, последних 1500 млн лет [Clifford, 1966]. При этом неалмазоносные и убогалмазоносные кимберлиты наблюдаются и в областях более молодой орогении. Позднее Дженс резюмировал сложившееся к началу 1990-х годов мнение о справедливости наблюдений Клиффорда применительно к распределению коренных месторождений алмазов в статье,

которая называлась «Справедливо ли еще правило Клиффорда? Подтверждающие примеры из мировых провинций» [Janse, 1994] (см. также [Janse, 1995]). Тем самым этому наблюдению был присвоен статус «правила». Дженс также несколько модифицировал утверждение «правила Клиффорда», введя понятия «архонов» (архейских кратонов, породы которых испытали последние деформации и метаморфизм не позднее 2,4 млрд лет назад), «протонов» (кратонов старше 1,6—1,8 млрд лет) и «тектонов» (более молодых кратонов) [Janse, 1994, 1995] и заключив, что экономические кимберлиты встречаются исключительно на архонах, а экономические лампроиты внедряются на некоторых протонах, т. е. протерозойских мобильных поясах, прилегающих к архонам [Janse, 1995].

«Правило Клиффорда» выполняется в большинстве случаев (например, [Ваганов, 2000]) и, несомненно, отражает фундаментальные закономерности генерации кимберлитовых магм. В то же время известны внедрения алмазонасных и даже высокопродуктивных кимберлитов за пределами архонов (например, [Ваганов, 2000; Божко, 2006]), которые подчеркивают необходимость уточнения «правила Клиффорда». Еще более существенно то, что с точки зрения геодинамики ассоциация кимберлитового магматизма с коровыми структурами, устанавливаемая «правилом Клиффорда», не является последовательной. Действительно, данные термобарометрии свидетельствуют о том, что кимберлиты захватывают ксенолиты на больших глубинах (например, [Pearson et al., 2005]), по крайней мере, до подошвы деплетированной литосферы [Grütter, 2009; Арясова, Хазан, 2013а]. Поэтому они имеют глубинное происхождение, а возраст и состояние земной коры могут играть лишь подчиненную роль в кимберлитовом магматизме, возможно, контролируя процесс внедрения кимберлитов, но не влияя на формирование протокимберлитовых расплавов. Последнее утверждение можно иллюстрировать результатами [Розен и др., 2002], которые показали, что коровые включения в кимберлиты Якутской алмазонасной провинции характеризуют резкую латеральную неоднородность коры, но при этом пространственное распределение кимберлитов не обнаруживает прямой связи с этими вариациями.

В настоящей статье обсуждается расширенная формулировка «правила Клиффорда», устанавливающая ассоциацию коренных месторождений алмазов с мощной деплетированной литосферой и геодинамические причины, обуславливающие ее справедливость.

Следует отметить, что ниже под литосферой и астеносферой понимаются области кондуктивного и конвективного теплопереноса соответственно. Эти области разделены так называемым реологическим подслоем мощностью в десятки километров (например, [Kogenaga, 2009]), в котором градиент температуры и скорость деформации изменяются от значений, типичных для литосферы, до значений, характерных для конвектирующей мантии. Верхнюю границу этого слоя будем называть литосферно-астеносферной границей (ЛАГ). Ее положение зависит главным образом от потенциальной температуры конвектирующей мантии и мощности деплетированного

слоя [Арясова, Хазан, 2013а,б]. Если ЛАГ совпадает с подошвой деплетированного слоя, то можно говорить о том, что мантийная конвекция проникает до подошвы деплетированного слоя, который в этом случае будем называть деплетированной литосферой.

Расширенная трактовка «правила Клиффорда». Естественным обобщением «правила Клиффорда» является предположение о том, что кимберлиты ассоциируют не с архейскими кратонами как таковыми, а с мощной деплетированной литосферой архейского (в большинстве случаев) возраста. При этом остается в целом справедливым «правило Клиффорда» в формулировке [Janse, 1994], поскольку возраст литосферы, определенный по Re-Os изотопному датированию ксенолитов, вынесенных кимберлитами на архейских кратонах, как правило, также оказывается архейским [Carlson et al., 2005; Janney et al., 2010], т. е. архейской коре соответствует архейская литосфера. Изотопное датирование свидетельствует также о том, что два известных «нарушения» «правила Клиффорда» — самое продуктивное месторождение алмазов в мире лампроитовая трубка Аргайл (северо-западная Австралия), расположенная на протерозойском орогене Холлз-Крик, и высокопродуктивное Накынское поле (Якутская кимберлитовая провинция), расположенное на протерозойском террейне Марха, — фактически нарушениями не являются. В частности, модельный Re-Os возраст ксенолитов, вынесенных из трубки Аргайл, — неархейский [Luguet et al., 2009], а время формирования фундамента Мархинского террейна по данным Sm-Nd датирования составляет около 2,4 млрд лет [Розен и др., 2000]. Близкие значения возраста около 2,5 млрд лет получены также по U-Pb датированию цирконов из трубок Ботубинская и Нюрбинская Накынского поля [Владыкин, Лепехина, 2009].

Геодинамические обстановки, в которых наблюдаются «нарушения» «правила Клиффорда», рассмотрел Н. А. Божко [Божко, 2006], показав, что большинство таких «нарушений» относится к областям, непосредственно примыкающим к границе архейских кратонов, где по тем или иным причинам под постархейской корой сохранился литосферный киль большой мощности и, как правило, архейского возраста. Таким образом, извержение кимберлитов происходит либо на архейских кратонах, которым соответствует мощная деплетированная архейская литосфера, либо за пределами архейских кратонов, но сквозь мощную деплетированную

литосферу архейского возраста. Иначе говоря, расширенная формулировка «правила Клиффорда», подчеркивающая ассоциацию кимберлитового магматизма не с архейской корой, а с мощной деплетированной и сформировавшейся в архее литосферой, выполняется практически без исключений и при этом по крайней мере качественно согласуется с наблюдаемой глубиной источников кимберлитов.

Подчеркнем, что если существование мощной литосферы является обязательным условием кимберлитового магматизма, то объяснение приуроченности кимберлитовых проявлений к древним структурам становится тривиальным. Действительно, потенциальная температура конвектирующей мантии, которая достигла своего максимума 1500—1600 °С в архее, впоследствии монотонно убывала до современного значения около 1350 °С [Herzberg et al., 2010]. Вместе с потенциальной температурой убывали определяемые ею степень плавления и объемы выплавляющейся коры и деплетированного остатка плавления [Herzberg et al., 2010]. Поэтому литосфера мощностью, характерной для архейских кратонов, не могла возникнуть в постархейское время.

Наконец, ассоциация кимберлитов с деплетированной литосферой кратонов является естественной, если источником энергии и флюидов для кимберлитового магматизма служат восходящие мантийные течения или мантийные плюмы (например, [Crough et al., 1980; England, Howsemann, 1984; Smith et al., 1985; Агашев и др., 2000; Heaman, Kjarsgaard, 2000; Heaman et al., 2003, 2004; Becker, le Roex, 2006; Костровицкий и др., 2007; Сафонов, Перчук, 2009; Torsvik et al., 2010]). Такая модель согласуется с гибридным характером кимберлитов (например, [Mitchell, 1995]), изотопный и редкоэлементный состав которых указывает на астеносферное происхождение, а содержание петрогенных оксидов соответствует деплетированной литосфере, но требует, чтобы мантийная конвекция проникала до подошвы последней. В следующем разделе обсуждаются наблюдения пространственно-временных связей между платобазальтами, карбонатитами и кимберлитами, а также результаты термобарометрии, подтверждающие генерацию кимберлитов восходящими мантийными течениями, которые проникают вплоть до подошвы деплетированной литосферы.

Наблюдения, подтверждающие генерацию кимберлитов восходящими мантийными течениями, проникающими до подошвы

деплетированной литосферы. Карбонатиты и кимберлиты, синхронные платобазальтам.

С. В. Белов с соавторами [Белов и др., 2008] обратили внимание на то, что во многих случаях излияния континентальных платобазальтов (траппов) сопровождаются синхронными им извержениями карбонатитов и кимберлитов. Магматиты занимают пространственно сближенные, но непересекающиеся позиции, причем их состав коррелирует с тектоническим окружением [Белов и др., 2008]: базальты изливаются в областях сравнительно маломощной литосферы, сопровождая развитие рифтов и/или разрушение континентов, карбонатиты — в рифтогенной обстановке, часто вблизи траппов, а кимберлиты — на близких к трапповой провинции древних кратонах.

В работе [Chalapathi Rao, Lehmann, 2011] описан наиболее очевидный случай такой корреляции — траппы Декана, которые изливались на западе центральной Индии (главный импульс $65,5 \pm 0,5$ млн лет [Chenet et al., 2007]), синхронные им карбонатиты ($65 \pm 0,3$ млн лет; [Woolley, Kjarsgaard, 2008]), извергавшиеся вдоль западной границы траппов, и кимберлиты поля Майнпур ($66—62$ млн лет) на кратоне Бастар к востоку от траппов [Lehmann et al., 2010].

Такая синхронность основного и щелочного магматизма наблюдается и в других случаях (см. таблицу и комментарии к ней в Приложении). Помимо траппов Декана существуют еще, по крайней мере, четыре случая, когда наблюдаются все три типа платформенных магматитов (провинции траппов Афара, Парана-Этендека, Сибирских пермо-триассовых траппов и магматическая провинция на севере Восточно-Европейской платформы). Еще в трех случаях (Вилуйские траппы и девонские кимберлиты Восточной Сибири, базальты северной Бразилии и кимберлиты западной Африки, траппы Мадагаскара и кимберлиты группы 1 на кратоне Калахари) не известны карбонатиты, синхронные траппам и кимберлитам, но ассоциация между базальтами и кимберлитами довольно уверенная (хотя в последнем случае пространственная связь кимберлитов и траппов Мадагаскара не вполне очевидна).

Эти корреляции трех типов платформенного магматизма не являются универсальными. В частности, не известны синхронные и пространственно близкие фанерозойские базальтовые излияния, карбонатиты и кимберлиты в Северной Америке, и нет явного соответствия между эпизодами базальтового

Т а б л и ц а . Пространственно-временные корреляции траппов, кимберлитов и карбонатитов

Номер	Базальты		Карбонатиты		Кимберлиты	
	Название	Возраст, млн лет ¹	Возраст, млн лет ²	Расположение	Возраст, млн лет ³	Расположение
1	Траппы Афара, Южная Эфиопия	31—29 45—34	45—0	Уганда, Кения, Танзания	53—40 ⁴	Танзанийский щит
2	Траппы Декана, Индия	65,5±0,5	65±0,3	Западная окраина кратона Дхарвар	66—62	Поле Майнпур восточнее траппов на кратоне Бастар
3	Траппы Парана-Этендека	134—129	133—128 128 133—119 160—130	Бразилия, Парагвай, Ангола, Намибия	144—65 135—115	Бразилия Ангола
4	Сибирские траппы	251—249	Нижний триасс 250,2±0,3 (Гули)	Маймеча-Котуйская, Анабарская провинции	245—240 ⁵	Оленек-Анабарская зона, Красноярский край
5	Восточно-Европейская платформа	365	380—360	Кольская щелочная провинция	380—360	Архангельская кимберлитовая провинция (Терский Берег, Зимний Берег)
6	Вилуйские траппы	350	?	?	367—344 ⁵ 420—380 ⁵	Вилуйско-Мархинская и Далдын-Алаkitская зоны
7	Магматизм в северной Бразилии (раскрытие экваториальной части Атлантики)	160—159	?	?	155—154 146—140 135	Западная Африка Гвинея, Мавритания, Мали. Кот-д'Ивуар, Сьерра Леоне, Либерия
8	Траппы Мадагаскара	90—84	89	Катете, Зимбабве	94—89 95—90 80—75	Кратон Калахари: Кимберли Северное Лесото, Орапа, Летлакейн

Примечания: 1 — <http://www.largeigneousprovinces.org/record>, 2 — [Woolley, Kjarsgaard, 2008], 3 — датировки приведены по каталогу Faure [2010], если не указано другое, 4 — [Ebinger et al., 1997], 5 — [Griffin et al., 1999]. Датировка кимберлитов поля Харамай, по [Кинни и др., 1997].

магматизма и извержениями кимберлитов группы 2 в Южной Африке. Несмотря на это, пространственно-временные связи между тремя типами платформенных магматитов представляются очень важными, поскольку проливают свет на геодинамику магматизма.

Синхронность магматизма и сближенность ареалов его проявления означают, что все магмы возникают под влиянием некоторой общей причины. Учитывая размеры территории (~1000—2000 км), обычно предполагается, что такой общей причиной являются мантийные плюмы [Morgan, 1971], которые, приближаясь к литосфере, образуют гигантскую «голову». Такая модель неоднократно рассматривалась в применении к платобазальтам (например, [Richards et al., 1989; White, McKenzie, 1989,

1995; Campbell et al., 1989; Campbell, Griffiths, 1990; Соболев и др., 1991; Griffiths, Campbell, 1991; Basu et al., 1995; Gibson et al., 1995; Ernst et al., 1996; Turner et al., 1996; Рябчиков, 2003; Saunders et al., 2005; Ernst, 2007; Torsvik et al., 2006; Dobretsov et al., 2008; Соболев и др., 2009]), карбонатитам (например, [Bell, Tilton, 2001, 2002; Сафонов, Перчук, 2009; Kogarko et al., 2010; Ernst, Bell, 2010]) и кимберлитам (например, [Crough et al., 1980; England, Howsemann, 1984; Smith et al., 1985; Агашев и др., 2000; Heaman, Kjarsgaard, 2000; Heaman et al., 2003, 2004; Becker, le Roex, 2006; Костровицкий и др., 2007; Сафонов, Перчук, 2009; Torsvik et al., 2010]). Детали наблюдаемых сейсмотомографических изображений отличаются от буквально понимаемой плюмовой модели, но подтверж-

дают связь масштабных базальтовых излияний с восходящими мантийными течениями, возникающими в нижней мантии. В частности, вместо уплощенной «головы» плюма, соединяющейся с областью источника тонким «хвостом», в верхней мантии восточной Африки и западной части Аравийского полуострова наблюдалась протяженная низкоскоростная область мощностью 500—600 км, связанная с базальтовыми излияниями главного Эфиопского (траппы Афара) и Кенийского рифтов, простирающаяся до подошвы верхней мантии и далее соединяющаяся с обширной низкоскоростной аномалией в нижней мантии южной Африки [Hansen et al., 2012].

Поскольку и ультраосновные, и основные магмы возникают под воздействием одного и того же восходящего мантийного течения, то различие составов и в особенности корреляция состава с тектонической обстановкой указывают на то, что плавление происходит в различных условиях. Температура солидуса и состав возникающих расплавов существенно зависят от давления. Поэтому из переменности состава магм, порождаемых одним и тем же мантийным течением, по-видимому, следует, что плавление происходит при различном давлении. Наиболее естественным объяснением этого является предположение, что кровля мантийного поднятия следует рельефу подошвы литосферы, благодаря чему и возникает связь между составом магм и тектоническим фоном, на котором они извергаются. Иначе говоря, магматизм, вызываемый воздействием восходящего мантийного течения, представляет собой природный «эксперимент» по плавлению в условиях подошвы литосферы. Из этого «эксперимента» следует, что расплавы кимберлитового состава возникают только при взаимодействии восходящего мантийного течения с мощной литосферой кратонов, согласно результатам лабораторного исследования плавления системы CMAS-CO_2 [Gudfinnsson, Presnall, 2005], которое показало, что жидкости кимберлитового состава возникают только при плавлении в условиях высокого давления (более 5—6 ГПа). Это фактически и объясняет ассоциацию кимберлитового магматизма с мощной и деплетированной (что следует из ее долговременной стабильности) литосферой, т. е. «расширенное правило Клиффорда».

Приближенная оценка глубины проникновения мантийной конвекции по результатам термобарометрии. Обсуждение выше предполагает, что мантийные течения, вызываю-

щие кимберлитовый магматизм, проникают до подошвы деплетированной области. В этом случае следует ожидать существования корреляции между мощностью деплетированной области и глубиной наиболее глубокого ксенолита, выносимого кимберлитовой магмой. На рисунке, построенном по результатам одноклинопироксеновой [Nimis, Taylor, 2000] термобарометрии ксенолитов/ксеностриков 39 кимберлитов мировых провинций [Арясова, Хазан, 2013а,б], символами показаны глубина наиболее глубокого ксенолита и референтный тепловой поток (РТП) на поверхности q (РТП является параметром однопараметрического семейства геотерм HC11 [Hasterok, Chapman, 2011]). Значение q характеризует геотерму, которая наилучшим образом аппроксимирует результаты термобарометрии. Учитывая случайный характер захвата ксенолитов, реальный физический смысл имеет огибающая результатов термобарометрии [Арясова, Хазан, 2013а], показанная на рисунке штрихпунктиром. Эта огибающая совпадает с независимо определенной границей распространения в мантии деплетированных перидотитов [Grütter, 2009] (штриховая линия), что подтверждает модель генерации кимберлитов восходящими мантийными течениями, достигающими подошвы деплетированной области.

Вероятность захвата алмазосодержащего ксенолита при прочих равных условиях пропорциональна ширине «алмазного окна», т. е. расстоянию, проходимому кимберлитовой магмой от захвата первого ксенолита до перехода графит—алмаз. Серое поле показывает, что ширина «алмазного окна» и, следовательно, алмазопродуктивность кимберлитов быстро уменьшается с увеличением поверхностного теплового потока.

Следует отметить, что глубина, на которой захватывается первый, т. е. наиболее глубокий ксенолит, дает несколько заниженную оценку глубины, до которой проникает мантийная конвекция. Это связано с двумя причинами.

Во-первых, дайка, доставляющая кимберлитовую магму на поверхность [Spence, Turcotte, 1990; Lister, Kerr, 1991], становится неустойчивой и может распространяться без подпитки из источника только после того, как ее длина по вертикали превысит критическое значение. Последнее зависит от разности плотностей расплава и твердых пород, а также от литостатического давления, играющего на большой глубине роль прочности на растяжение [Khazan, Fialko, 1995]. На глубине

около 200 км критическая длина составляет 2—20 км при разности плотностей от 10 до 1 % соответственно [Арясова, Хазан, 2013б]. При распространении дайки в докритическом режиме скорость течения расплава в ней близка к нулю и захват ксенолитов невозможен. Однако даже после начала неустойчивого режима дайка должна пройти некоторое расстояние, прежде чем скорость течения расплава в ней превысит ~1 м/с и станет больше скорости опускания ксенолита сантиметрового размера.

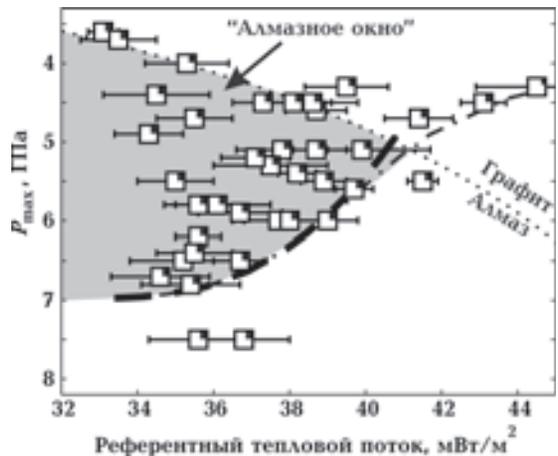
Во-вторых, литосфера и астеносфера разделяются так называемым реологическим подслоем (например, [Korenaga, 2009]) мощностью несколько десятков километров, в котором градиент температуры убывает, а скорость деформации возрастает от значений, характерных для литосферы, до астеносферных значений. Именно в этой области, скорее всего, и возникают протокимберлитовые жидкости, которые затем просачиваются в литосферу, метасоматизируя ее и/или соединяясь в макроскопические вертикальные трещины по механизму, рассмотренному в работе [Spiegelman, Kelemen, 2003]. С учетом необходимости достичь критической длины и скорости распространения, достаточной для захвата ксенолитов, наиболее глубокие ксенолиты должны выноситься из окрестности подошвы деплетированного слоя. Точное совпадение огибающей данных термобарометрии с оценкой глубины, до которой распространены деплетированные перидотиты [Grütter, 2009] (см. рисунок), скорее всего, является случайным, особенно учитывая погрешности определения давления одноклинопироксеновым барометром (согласно калибровке [Nimis, Taylor, 2000], стандартное отклонение — 0,23 ГПа). Поэтому в некоторых случаях возможен вынос ксенолитов, захваченных глубже подошвы деплетированной области, как, например, наиболее глубокие ксенолиты в трубках Удачная (поле Далдын) и Новинка (Малоботуобинское поле).

Обсуждение. В некоторых случаях, перечисленных в таблице, наблюдаются синхронные и пространственно сближенные континентальные платобазальты, карбонатиты и кимберлиты. Естественно предположить, что в этих случаях все три типа магматитов возникли вследствие воздействия некоторой общей причины. Учитывая масштабы территории, на которой проявляется магматизм, вероятнее всего, такой общей причиной является, как это неоднократно предлагалось ранее, восходящее мантийное течение. Существенно, что

состав магм явно коррелирует с тектоническим фоном, на котором они проявляются. Платобазальты изливаются в областях маломощной литосферы и сопровождают развитие рифтов или разрушение континентов, карбонатиты извергаются в рифтогенной обстановке и часто наблюдаются вблизи границы траппов, а кимберлиты внедряются сквозь мощную литосферу.

Такие вариации состава магм, порождаемых общей причиной, указывают на то, что магмы возникают в разных условиях, скорее всего, при разном давлении. Наиболее естественным объяснением этих наблюдений служит предположение, что восходящее мантийное течение достигает подошвы деплетированной литосферы и следует ее рельефу. Для случая кимберлитового магматизма последнее предположение непосредственно подтверждается тем, что наиболее глубокие ксенолиты захватываются вблизи подошвы области распространения деплетированных перидотитов в мантии (см. рисунок).

Можно заключить, что результаты настоящей статьи поддерживают сценарий генерации кимберлитовых магм, который предполагает, что кимберлитовый магматизм инициируется воздействием восходящих мантийных течений



Результаты одноклинопироксеновой [Nimis, Taylor, 2000] термобарометрии ксенолитов/ксенокристов 39 кимберлитов. По оси ординат — равновесное давление для наиболее глубокого ксенолита, по оси абсцисс — референтный тепловой поток и статистическая погрешность для геотермы из семейства HC11 [Hasterok, Chapman, 2011], наилучшим образом аппроксимирующей результаты термобарометрии для каждого из кимберлитов. Пунктир — переход графит–алмаз [Kennedy, Kennedy, 1976]. Наиболее глубокие ксенолиты захвачены на глубине около 7,5 ГПа в трубках Удачная (поле Далдын) и Новинка (Малоботуобинское поле).

(мантйных плюмов?), достигающих подошвы деплетированной литосферы. При этом жидкости кимберлитового состава возникают только при давлениях, характерных для литосферы архейских кратонов (более 5—6 ГПа), а при меньшей мощности деплетированной литосферы генерируются магмы другого состава, что согласуется с лабораторными исследованиями плавления в система CMAS-CO_2 [Gudfinnsson, Presnall, 2005]. Иначе говоря, существование мощной деплетированной литосферы является необходимым условием кимберлитового магматизма. Деплетированная литосфера такой мощности не могла возникнуть в постархейское время из-за уменьшения потенциальной температуры конвектирующей мантии, начиная с архея [Herzberg et al., 2010]. Охлаждение конвектирующей мантии сопровождается уменьшением объема выплавляющейся коры и деплетированного остатка плавления [Herzberg et al., 2010], т. е. мощности слоя деплетированных пород. Как показано в работе [Арясова, Хазан, 2013а], при одной и той же потенциальной температуре конвектирующей мантии литосфера меньшей мощности имеет более высокую температуру и характеризуется геотермой HC11 [Hasterok, Chapman, 2011], соответствующей большему РТП. Как видно из рисунка, это сопровождается быстрым сокращением «алмазного окна» и уменьшением алмазопродуктивности. Таким образом, геодинамической причиной справедливости «расширенного правила Клиффорда», подчеркивающего ассоциацию кимберлитового магматизма в целом и алмазопродуктивного кимберлитового магматизма, в особенности с мощной деплетированной литосферой архейского возраста, является охлаждение конвектирующей мантии в постархейское время. При этом классическое «правило Клиффорда» в формулировке [Janse, 1994], ассоциирующее алмазопродуктивный кимберлитовый магматизм с архейской корой, выполняется в большинстве случаев просто потому, что архейской коре, как правило, соответствует архейская литосфера [Carlson et al., 2005; Janney et al., 2010].

Приложение. Комментарии к таблице.

1. Базальты Эфиопского и Кенийского рифтов (траппы Афара) извергались двумя импульсами 45—34 (Кенийский рифт) и 31—29 млн лет (главный Эфиопский рифт) [Ebinger et al., 1993; Baker et al., 1996]. С магматизмом, вероятно, связаны эфиопское и кенийское поднятия, которые выше среднего африканского уровня не менее, чем на 1000 м. Предполагается, что

источником магматизма была или голова мантйного плюма с центром вблизи точки тройного сочленения Красноморского, Аденского и Эфиопского рифтов [Ebinger, Sleep, 1998], или два плюма, ответственные за различные стадии магматизма [George et al., 1998], или одно обширное мантйное восходящее течение, проявляющееся как низкоскоростная аномалия, проникающая в мантию восточной Африки до глубины 500—600 км и связанная с низкоскоростной областью в нижней мантии южной Африки [Hansen et al., 2012]. Последняя модель основывается на данных сейсмотомографии на продольных волнах. Из ее геометрии очевидно, что течение распространялось с юга на север, что объясняет запаздывание магматизма в главном Эфиопском рифте по сравнению с магматизмом Кенийского рифта.

Извержения карбонатитов начались примерно 45 млн лет тому назад и продолжаются до настоящего времени (в этом регионе находится единственный на Земле карбонатитовый вулкан Олдоньо Ленгаи).

Кимберлитовые проявления располагаются на Танзанийском щите и датируются временем 53—40 млн лет тому назад, т. е. кимберлиты и карбонатиты синхронны первому импульсу магматизма. Дополнительно [Weeraratne et al., 2003] указали на то, что существование Кенийского поднятия и окружающей его кольцевой рифтовой структуры (Западный и Восточный (Кенийский) рифты), включающей трещины растяжения, в частности озера, такие как Танганьика, а также аномально низкие сейсмические скорости в мантии Танзанийского кратона и их радиальная анизотропия, возможно, свидетельствуют о том, что под Танзанийским кратоном существует восходящее течение, материал которого испытывает частичное плавление и растекается под прилегающие западную и восточную ветви Восточно-Африканского рифта.

В этом случае, как и в примерах, рассмотренных ниже, кимберлиты извергаются на архейском кратоне, синхронные им траппы связаны с рифтогенной обстановкой, а карбонатиты проявляются вблизи траппов, причем три типа континентальных магматитов занимают сближенные, но не пересекающиеся позиции.

2. Траппы Декана. Магматизм, наблюдаемый на западе центральной Индии, представляет собой наилучший пример корреляции трапповых излияний (67,5—64,5 млн лет [Chenet et al., 2007]), карбонатитовых (~65 млн лет [Wooley, Kjarsgaard, 2008]) и кимберлитовых извержений (поле Майнпур на кратоне Бастар; около

65 млн лет [Lehmann et al., 2010, рис. 1]. После недавнего обнаружения восточнее трапповой области кимберлитов, синхронных траппам и карбонатитам, извергавшимся вдоль западной границы траппов, в Индии представлены все три типа синхронных платформенных магматитов. Кратковременность базальтовых излияний (примерно 2 млн лет) и их большой объем (более 1 млн км³) делают объяснение, связывающее происхождение траппов и синхронных им магматитов с восходящим мантийным течением (мантийным плюмом), наиболее вероятным, тем более что прослежена цепочка хребтов, связывающих трапповую область с современной горячей точкой Реюньон [White, McKenzie, 1989].

3. Траппы Парана-Этендека. Базальты Парана и Этендека [Peate, 1997] в настоящее время находятся на разных берегах Атлантического океана в Южной Америке (Бразилия, Парагвай) и Африке (Намибия, Ангола) соответственно. Они изливались 139—134 млн лет назад, когда происходило раскрытие южной Атлантики под действием восходящего мантийного течения, которое в настоящее время существует как горячая точка Тристан-да-Кунья, соединенная с траппами подводным хребтом. Карбонатиты, синхронные траппам и внедрившиеся вблизи их границы, обнаружены как в Южной Америке (Иранема (127,7 млн лет), Itanhaem (132,8), Jakupiranga (131), Chiriguelo (128)), так и в Африке в Анголе (Monte Verde (119), Thivira (133)) и Намибии (Messum (134), Okoruso (126,6)) [Woolley, Kjarsgaard, 2008]. По данным, приведенным в мировой базе данных кимберлитов [Faurge, 2010], кимберлиты Анголы синхронны траппам Парана-Этендека и карбонатитам, но датировки не очень точные (135—115 млн лет). Отдельные кимберлиты поля Nuovo Lisboa датируются 133 млн лет. Имеющиеся датировки бразильских кимберлитов (144—65 млн лет) не противоречат их синхронности траппам, хотя точность данных не позволяет сделать определенное заключение.

4. Сибирские траппы. Пермо-триассовые траппы Западной Сибири (251—249 млн лет) — наибольшие по объему (от 4 до 16 млн км³ [Ivanov, 2007]) континентальные излияния базальтов. Кратковременность излияний (менее 1 млн лет, по данным [Basu et al., 1995]) и гигантский объем делают, как и в других случаях, восходящее мантийное течение наиболее приемлемым объяснением (например, [White, McKenzie, 1989; Соболев и др., 2009]), несмотря на возражения против этой точки зрения [Ivanov, 2007]. Маймеча-Котуйская провинция

ультраосновно-щелочного магматизма, расположенная вблизи западной границы Анабарского щита, синхронна траппам (например, [Vasiliev, Zolotukhin, 1995; Basu et al., 1995]). В частности, возраст Гулинского карбонатитового массива 250,2±0,3 млн лет (U-Pb по циркону [Basu et al., 1995]) не отличается от возраста траппов. Синхронные траппам кимберлиты сосредоточены в полях нижнетриассового возраста Оленек-Анабарской зоны, расположенных на восточном склоне Анабарского щита и на поле Харамай, находящемся у его юго-западного окончания. Возрасты кимберлитов, определяемые различными методами, обнаруживают заметный разброс [Griffin et al., 1999], но в целом кимберлиты несколько запаздывают относительно траппов. По оценкам [Griffin et al., 1999] максимальная активность на поле Куранах продолжалась от 240 до 220 млн лет, на поле Лучакан — в интервале 245—210 млн лет, на поле Средняя Куонамка — 245—240 млн лет; возраст кимберлита Улачун 1 на поле Харамай — 245±3 млн лет (U-Pb по перовскиту). Относительно расположения Маймеча-Котуйской провинции непосредственно у границы трапповой области высказано предположение [Соболев и др., 2009], что ультраосновно-щелочные магмы возникали и в недрах области, покрытой в настоящее время трапповыми излияниями, но смешались с базальтами и поэтому не проявились на поверхности. Это замечание может относиться и к другим провинциям, поскольку расположение карбонатитовых проявлений непосредственно вблизи границы траппов является типичным.

5. Магматизм Восточно-Европейской платформы. Трапповый магматизм на Восточно-Европейской платформе проявлен весьма умеренно [Шиловский, 2009]. Тем не менее известны палеовулканы, поднятия фундамента, магматизм и рифтообразование в Кольской, Вятской и Днепроовско-Донецкой провинциях, которые датируются примерно 365 млн лет [Nikishin et al., 1996]. Кроме того, скважины вскрыли внедрения базальтов в осадочную толщу раннего и среднего палеозоя Московской и Мезенской синеклиз [Шиловский, 2009], а на восточной окраине Архангельской алмазонасной провинции распространены позднедевонские базальты, которые слагают 13 диатрем в Соянском и Пинежском базальтовых полях [Носова и др., 2006]. Возраст базальтовых трубок принимается синхронным возрасту большинства трубок кимберлитовых серий Зимнего Берега.

Позднедевонский базальтовый вулканизм на Восточно-Европейской платформе сопровождался синхронным щелочным и кимберлитовым магматизмом Кольской провинции щелочных изверженных пород [Дудкин и др., 1984; Дудкин, Серов, 2007] и Архангельской кимберлитовой провинции [Богатиков и др., 2001; Носова и др., 2006], которая расположена на севере Балтийского щита на закрытой юго-восточной части кратона Кола-Кулой [Beard et al., 2000], и проявился также как кимберлитовый магматизм Приазовья [Юткина и др., 2004]. Многие проявления карбонатитов датированы (примерно 380—370 млн лет (например, [Ernst, Bell, 2010] и ссылки там). На севере Русской плиты обнаружена цепочка девонских проявлений кимберлитового магматизма протяженностью около 1000 км, включая районы Кандалакши, Терского берега, Архангельска, Среднего Тимана с возрастными 380—360 млн лет [Богатиков и др., 2001]. Более точные датировки выполнены для трубок Гриба — 372±8 млн лет [Шевченко и др., 2004] и Пионерская — 380,1 млн лет [Первов и др., 2005]. Rb-Sr возрасты Приазовских трубок и даек лежат в интервале 390—370 млн лет [Юткина и др., 2004]. Кимберлиты, как и карбонатиты, по видимому, несколько опережают базальтовые излияния, однако, нет сомнений в том, что все магмы имеют общее происхождение.

Как и в других провинциях изверженных пород, синхронные траппы, карбонатиты и кимберлиты территориально сближены, но занимают непересекающиеся положения.

6. Вилу́йские траппы и девонские кимберлиты Восточной Сибири. Девонский ареал основных изверженных пород на востоке Сибирской платформы (Вилу́йские [Courtillot, Renne, 2003] или Якутские [Shpount, Oleinikov, 1987] траппы) приурочен к погребенной рифтогенной структуре — Патомско-Вилу́йскому авлакогену [Масайтис и др., 1975; Гайдук, 1988; Киселев и др., 2002] и представлен также роями долеритовых даек, которые менее всего подвержены влиянию эрозии [Ernst et al., 1996; Киселев и др., 2010]. Существенно, что долериты Молодинского, Мунского и Вилу́йско-Мархинского роев демонстрируют полное сходство геохимических и изотопных характеристик, что указывает на общий глубинный источник [Киселев и др., 2010]. Датировки долеритов обнаруживают значительный разброс от 322 до 435 млн лет, видимо, вследствие значительных постмагматических изменений [Киселев и др., 2010]. Саблуков и др. (цитируется по работе [Константинов,

Стегницкий, 2012]) определили K-Ar возраст дайки долеритов 357±14 млн лет.

На северо-западном борту Патомско-Вилу́йского авлакогена находятся два района алмазоносных кимберлитовых трубок. Установлено также [Константинов, Стегницкий, 2012], что положение палеополюсов траппов и кимберлитов совпадает так, что они могли быть сформированы «...в одну тектономагматическую эпоху». Абсолютные возрасты 380—340 млн лет девонских кимберлитовых полей якутской кимберлитовой провинции (Малая Ботуобия, Алакит, Далдын, Верхняя Муна, Чомурдах, Мерчимден, Северней) [Griffin et al., 1999] согласуются с этим утверждением. Несмотря на отсутствие известных карбонатитов, синхронных траппам и кимберлитам, нет серьезных оснований сомневаться в существовании общего источника вилу́йских траппов и девонских кимберлитов.

7. Начало раскрытия Атлантики [Matton, Jebrak, 2009], вероятно, сопровождалось базальтовыми излияниями в северной Бразилии (160—159 млн лет) и, возможно, на рифте Беню, Нигерия (147—106 млн лет [Segev, 2002]). Представляется вполне реальной возможность того, что магматизм северной Бразилии сопровождался извержениями кимберлитов на территории современной западной Африки (Гвинея, Мавритания, Мали 155—154 млн лет, а также, возможно, Кот-д-Ивуар, Сьерра Леоне 146—140 млн лет) [Faugere, 2010]. Карбонатиты, синхронные базальтам северной Бразилии и западно-африканским кимберлитам и пространственно сближенные с ними, в настоящее время не известны. Поэтому корреляцию среднеюрского магматизма северной Бразилии и западной Африки пока нельзя считать надежно установленной.

8. После раскрытия южной Атлантики, которое привело к масштабному основному магматизму Парана-Этендека и внедрению многочисленных карбонатитовых и кимберлитовых проявлений, явно имеющих общий источник с траппами (см. выше), произошло отделение Мадагаскара от Африки, а последующее разделение Индии и Мадагаскара сопровождалось траппами Мадагаскара (87,6±0,6 млн лет [Storey et al., 1995]). По данным этих авторов магматизм продолжался не более 6 млн лет, что характерно для излияний платобазальтов. Именно в это время на кратоне Калахари (включающем кратоны Каапвааль и Зимбабве) сформировалась многочисленная популяция почти синхронных и почти совпадающих по возрасту с траппами

Мадагаскара кимберлитов группы 1 (Кимберли 90—84 млн лет; Северное Лесото 95—90 млн лет; Орапа-Летлакейн 80—75; например, [Field et al., 2008]), многие из которых являются вы-

сокопродуктивными. В базе данных карбонатитов [Woolley, Kjarsgaard, 2008] удалось найти только один карбонатит, синхронный траппам и кимберлитам (Катете, Зимбабве, 89 млн лет).

Список литературы

- Агашев А. М., Оришаши 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.
- Арясова О. В., Хазан Я. М. Взаимодействие мантийной конвекции с литосферой и происхождение кимберлитов // Геофиз. журн. — 2013а. — **35**, № 5. — С. 150—171.
- Арясова О. В., Хазан Я. М. Максимальная глубина ксенолитов, выносимых кимберлитами, и тепловое состояние литосферы // Доп. НАНУ. — 2013б. — № 3. — С. 95—101.
- Белов С. В., Лапин А. В., Толстов А. В., Фролов А. А. Минерагения платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты). — Новосибирск: Изд. СО РАН, 2008. — 537 с.
- Богатииков О. А., Кононова В. А., Первов В. А., Журавлев Д. З. Источники, геодинамическая обстановка и перспективы алмазности кимберлитов северной окраины Русской плиты (Sr-Nd изотопия и ICP-MS геохимия) // Петрология. — 2001. — № 3. — С. 227—241.
- Божко Н. А. Тектонические обстановки локализации алмазоносных кимберлитов за пределами архейских кратонов // Руды и металлы. — 2006. — № 1. — С. 31—41.
- Ваганов В. И. Алмазные месторождения мира и России. — Москва: Геоинформмарк, 2000. — 371 с.
- Владыкин Н. В., Лепехина Е. А. Возраст необычных ксеногенных цирконов из кимберлитов Якутии // Докл. АН. — 2009. — **429**, № 6. — С. 774—778.
- Гайдук В. В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. — Якутск, 1988. — 128 с.
- Дугкин О. Б., Манаков Ф. В., Кравченко М. П., Кравченко Э. В., Кулаков А. Н., Полежаев Л. И., Припачкин В. А., Пушкарев Ю. Д., Рюнген Г. И. Карбонатиты Хибин. — Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1984. — 98 с.
- Дугкин О. Б., Серов П. А. Проблема возраста и источника вещества карбонатитов Хибинского массива // Геология и минерагения Кольского региона: тр. Всерос. (с международным участием) науч. конф. и IV Ферсмановской науч. сессии, посвященных 90-летию со дня рождения акад. А. В. Сидоренко и д-ра геол.-мин. наук И. В. Белькова (Апатиты, 4-6 июня 2007 г.). — Апатиты: Изд-во К & М, 2007. — С. 215—217.
- Кинни П. Д., Гриффин Б. Дж., Хеамен Л. М., Брахфогель Ф. Ф., Спеццус З. В. Определение U-Pb возрастов перовскитов ионно-аномным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика. — 1997. — **38**, №1. — С. 91—99.
- Киселев А. И., Егоров К. Н., Масловская М. Н. Геодинамика развития кимберлитового и базитового магматизма в области Вилюйского палеорифта // Отеч. геол. — 2002. — №4. — С. 40—45.
- Киселев А. И., Ярмолюк В. В., Томшин М. Д. Девонские рой долеритовых даек на северо-востоке Сибирского кратона и их связь с Вилюйским плутом // Докл. АН. — 2010. — **434**, №4. — С. 502—508.
- Константинов К. М., Стегницкий Ю. Б. Позднесилурийская – раннедевонская естественная остаточная намагниченность кимберлитов и траппов Якутской алмазоносной провинции // Докл. АН. — 2012. — **442**, №3. — С. 394—400.
- 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.
- Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского среднепалеозойского авлакогена. — Москва: Недра, 1975. — 182 с.
- Носова А. А., Первов В. А., Ларионова Ю. О., Ларченко В. А. Базальтовый вулканизм архангельской алмазоносной провинции: новые геохронологические и изотопно-геохимические данные: III Всерос. симпозиум по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и Геодинамика» 5—8 сентября 2006 г. Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ. — <http://earth.jssc.ru/uu2006/>.
- Первов В. А., Богомолов В. А., Ларченко В. А., Левский Л. К., Минченко Г. В., Саблуков С. М., Сергеев С. А., Степанов В. П. Rb-Sr возраст кимберлитов трубки Пионерская (Архангельская алмазоносная провинция) // Докл. РАН. — 2005. — **400**, № 1. — С. 67—71.
- Розен О. М., Журавлев Д. З., Суханов М. К., Бибикова Е. В., Злобин В. Л. Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов // Геология и геофизика. — 2000. — **41**, № 2. — С. 163—180.
- Розен О. М., Серенко В. П., Спеццус З. В., Манаков А. В., Зинчук Н. Н. Якутская кимберлитовая

- провинция: положение и структура Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры // Геология и геофизика. — 2002. — **43**, № 1. — С. 3—26.
- Рябчиков И. Д. Механизмы и условия магмообразования в мантийных плюмах // Петрология. — 2003. — **11**, № 6. — С. 548—555.
- Сафонов О. Г., Перчук Л. А. Карбонатит-кимберлитовые тренды в хлорид-карбонат-силикатных системах в условиях верхней мантии // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи: Материалы Конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Д. С. Коржинского. Москва, ИГЕМ РАН 7—9 октября 2009 г. — Москва: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2009. — С. 351—354.
- Соболев А. В., Каменецкий В. С., Кононкова Н. Н. Новые данные по петрологии сибирских меймечитов // Геохимия. — 1991. — № 8. — С. 1084—1095.
- Соболев А. В., Соболев С. В., Кузьмин Д. В., Малич К. Н., Петрунин А. Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. — 2009. — **50**, № 12. — С. 1293—1334.
- Шевченко С. С., Лохов К. И., Сергеев С. А. и др. Изотопные исследования в ВСЕГЕИ. Обзор исследований по поиску и разведке месторождений алмазов: Тр. науч.-практич. конф. «Эффективность прогнозирования и поисков и разведки месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50)». — Санкт Петербург, 2004. — С. 383—387.
- Шиловский А. П. Траппы на Восточно-Европейской платформе // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2009. — № 8. — С. 11—13.
- Юткина Е. В., Кононова В. А., Богатииков О. А., Князьков А. П., Козарь Н. А., Овчинникова Г. В., Левский Л. К. Кимберлиты восточного Приазовья (Украина) и геохимические характеристики их источников // Петрология. — 2004. — **12**, № 2. — С. 134—148.
- Baker J., Snee L., Menzies M. A brief Oligocene period of flood volcanism in Yemen // Earth Planet. Sci. Lett. — 1996. — **138**. — P. 39—55.
- Basu A. R., Poreda R. J., Renne P. R., Teichmann F., Vasil'ev Yu. R., Sobolev N. V., Turrin B. D. High-³He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts // Science. — 1995. — **269**. — P. 822—825.
- Beard A. D., Downes H., E. Hegner E., Sablukov S. M. Geochemistry and mineralogy of kimberlites from the Arkhangelsk Region, NW Russia: evidence for transitional kimberlite magma types // Lithos. — **51**. — 2000. — P. 47—73.
- 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. Petrol. — 2006. — **47**. — P. 673—703.
- Bell K., Tilton G. R. Nd, Pb and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: evidence for mantle mixing and plume inhomogeneity // J. Petrol. — 2001. — **42**. — P. 1927—1945.
- Bell K., Tilton G. R. Probing the mantle: the story from carbonatites // EOS Trans. Am. Geophys. Union. — 2002. — **83** (25). — P. 273—277.
- Campbell I. H., Griffiths R. W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts // Earth Planet. Sci. Lett. — 1990. — **99**. — P. 79—93.
- Campbell I. H., Griffiths R. W., Hill R. I. Melting in an Archaean mantle plume: Heads it's basalts, tails it's komatiites // Nature. — 1989. — **339**. — P. 697—699.
- Carlson R. W., Pearson D. G., James D. E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle // Rev. Geophys. — 2005. — **43**. RG1001. — DOI:10.1029/2004RG000156.
- 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.
- Chenet A.-L., Quidelleur X., Fluteau F., Courtillot V., Bajpai S. ⁴⁰K-⁴⁰Ar dating of the main Deccan large igneous province: Further evidence of KTB age and short duration // Earth Planet. Sci. Lett. — 2007. — **263**. — P. 1—15.
- Clifford T. N. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa // Earth Planet. Sci. Lett. — 1966. — **1**. — P. 421—434.
- Courtillot V. E., Renne P. R. On the ages of flood basalt events // Comptus Rendus Geoscience. — 2003. — **335**. — P. 113—140.
- Crough S. T., Morgan W. J., Hargraves R. B. Kimberlites: their relation to mantle hotspots // Earth Planet. Sci. Lett. — 1980. — **50**. — P. 260—274.
- Dobretsov N. L., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Vernikovskiy V. A., Gladkov I. N. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // Lithos. — 2008. — **100**. — P. 66—92.
- Ebinger C. J., Yemane T., WoldeGabriel G., Aronson J. L., Walter R. C. Late Eocene-recent volcanism and faulting in the southern main Ethiopian Rift // J. Geol. Soc. London. — 1993. — **150**. — P. 99—108.
- Ebinger C., Sleep N. Cenozoic magmatism throughout east Africa resulting from impact of one large plume // Nature. — 1998. — **395**. — P. 788—791.
- England P., Howsemann G. On the geodynamic setting of kimberlite genesis // Earth Planet. Sci. Lett. — 1984. — **67**. — P. 109—122.

- Ernst R. E.* Large igneous provinces in Canada through time and their metallogenic potential // Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods // Geol. Ass. Canada Spec. Publ. — 2007. — № 5. — P. 929—937.
- Ernst R. E., Bell K.* Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // Mineral. Petrol. — 2010. — **98**. — P. 55—76.
- Ernst R. E., Buchan K. L., West T. D., Palmer H. C.* Diabase (dolerite) dyke swarms of the world // Geological survey of Canada open file 3241. — 1996. — 104 p.
- Faure S.* World Kimberlites CONSOREM Database (Version 3) // Consortium de Recherche en Exploration Minerale CONSOREM, Universite du Quebec Montreal. — 2010. — www.consorem.ca.
- Field M., Stiefenhofer J., Robey J., Kurszlauskis S.* Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review // Ore Geology Rev. — 2008. — **34**. — P. 33—75.
- George R. M., Rogers N. W., Kelley S.* Earliest magmatism in Ethiopia: evidence for two mantle plumes in one flood basalt province // Geology. — 1998. — **26**. — P. 923—926.
- 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.
- Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P.* The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // Tectonophysics. — 1999. — **310**. — P. 1—35.
- Griffiths R.W., Campbell I.H.* Interaction of mantle plume heads with the earth's surface and onset of small-scale convection // J. Geoph. Res. — 1991. — **96**. — P. 18295—18310.
- Grütter H. S.* Pyroxene xenocryst geotherms: Techniques and application // Lithos. — 2009. — **112S**. — P. 1167—1178.
- Gudfinnsson G. H., Presnall D. C.* Continuous gradations among primary carbonatitic, kimberlitic, melilititic, picritic, and komatiitic melts in equilibrium with garnet lherzolite at 3—8 GPa. // J. Petrol. — 2005. — **46**. — P. 1645—1659.
- Hansen S. E., Nyblade A. A., Benoit M. H.* Mantle structure beneath Africa and Arabia from adaptively parameterized P-wave tomography: Implications for the origin of Cenozoic Afro-Arabian tectonism // Earth Planet. Sci. Lett. — 2012. — **319-320**. — P. 23—34.
- Hasterok D.* Thermal state of the oceanic and continental lithosphere. Ph.D. thesis. University of Utah. — 2010. — 156 p.
- Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere // Earth Planet. Sci. Lett. — 2011. — **307**. — P. 59—70.
- Heaman L. M., Kjarsgaard B. A.* Timing of eastern North American kimberlite magmatism: Continental extension of the Great Meteor Hotspot Track? // Earth Planet. Sci. Lett. — 2000. — **178**. — P. 253—268.
- Heaman L., Kjarsgaard B., Creaser R.* The temporal evolution of North American kimberlites // Lithos. — 2004. — **76**. — P. 377—397.
- Heaman L., Kjarsgaard B., Creaser R.* The timing of kimberlite magmatism in North America: Implications for global kimberlite genesis and diamond exploration // Lithos. — 2003. — **71**. — P. 153—184.
- Herzberg C., Condie K., Korenaga J.* Thermal history of the Earth and its petrological expression // Earth Planet. Sci. Lett. — 2010. — **292**. — P. 79—88.
- Ivanov A. V.* Evaluation of different models for the origin of the Siberian Traps // Plates, plumes, and planetary processes // Geolog. Soc. Amer. Spec. Paper 430. — 2007. — P. 669—691. — DOI:10.1130/2007.2430(31).
- Janney P. E., Shirey S. B., Carlson R. W., Pearson D. G., Bell D. R., le Roex A. P., Ishikawa A., Nixon P. H., Boyd F. R.* Age, composition and thermal characteristics of South African off-craton mantle lithosphere: Evidence for a multi-stage history // J. Petrol. — 2010. — **51**. — P. 1849—1890. — DOI:10.1093/petrology/egq041.
- Janse A. J. A.* Is Clifford's Rule still valid? Affirmative examples from around the World // Proceedeng of the Fifth Internationa Kimberlite Conference, Araxa, Brazil 1991, Volume 2. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration // CPRM Special Publication. Brasilia: Compania de Pescuisa de Recursos Minerais. — 1994. — **1B**. — P. 215—235.
- Janse A. J. A., Sheahan P. A.* Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: a selective and annotative approach // J. Geochem. Explor. — 1995. — **53**. — P. 73—111.
- Kennedy C. S., Kennedy G. C.* The equilibrium boundary between graphite and diamond // J. Geophys. Res. — 1976. — **81**. — P. 2470—2476.
- Khazan Y. M., Fialko Y. A.* Fracture criteria at the tip of fluid-driven cracks in the Earth // Geophys. Res. Lett. — 1995. — **22(18)**. — P. 2541—2544.
- 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 // Mineral. Petrol. — 2010. — **98**. — P. 197—208.
- Korenaga J.* Scaling of stagnant-lid convection with Arrhenius rheology and the effects of mantle melting // Geophys. J. Int. — 2009. — **179**. — P. 154—170.
- Lehmann B., Burgess R., Frei D., Belyatsky B., Mainkar D., Chalapathi Rao N. V., Heaman L. M.* Diamon-

- diferous kimberlites in central India synchronous with Deccan flood basalts // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 2010. — **290**. — P. 142—149.
- Lister J. R., Kerr R. C. Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes // *J. Geophys. Res.* — 1991. — **96**. — P. 10049—10077.
- Luguet A., Jaques A. L., Pearson D. G., Smith C. B., Bulanova G. P., Roffey S. L., Rayner M. J., Lorand J.-P. An integrated petrological, geochemical and Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Argyle lamproite, Western Australia and implications for cratonic diamond occurrences // *Lithos.* — 2009. — **112S**. — P. 1096—1108.
- Matton G., Jebrak M. The Cretaceous Peri-Atlantic Alkaline Pulse (PAAP): Deep mantle plume origin or shallow lithospheric break-up? // *Tectonophysics.* — 2009. — **469**. — P. 1—12.
- Mitchell R. Kimberlites, orangeites, and related rocks. — New York: Plenum Press, 1995. — 410 p.
- Morgan W. Convection plumes in the lower mantle // *Nature.* — 1971. — **230**. — P. 42—43.
- Nikishin A. M., Ziegler P. A., Stephenson R. A., Cloetingh S. A. P. L., Furne A. V., Fokin P. A., Ershov A. V., Bolotov S. N., Korotaev M. V., Alekseev A. S., Gorbachev V. I., Shipilov E. V., Lankreijer A., Bembinova E. Y., Shalimov I. V. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: Dynamics of sedimentary basin evolution // *Tectonophysics.* — 1996. — **268**. — P. 23—63.
- Nimis P., Taylor W. R. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* — 2000. — **139**. — P. 541—554.
- Pearson D. G., Canil D., Shirey S. B. Mantle samples included in volcanic rocks^ xenoliths and diamonds // *The mantle and core.* — Amsterdam: Elsevier, 2005. — P. 171—276.
- Peate D. W. The Paraná-Etendeka Provinces // Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism // *American Geophys. Union Geophys. Monograph.* — 1997. — **100**. — P. 217—245.
- Richards M. A., Duncan R. A., Courtillot V. E. Flood Basalts and Hot-Spot Tracks: Plume Heads and Tails // *Science.* — 1989. — **256**. — P. 203—207.
- Saunders A. D., England R. W., Reichow M. K., White R. V. A mantle plume origin for the Siberian traps: uplift and extension in the West Siberian Basin, Russia // *Lithos.* — 2005. — **79**. — P. 407—424.
- Segev A. Flood basalts, continental breakup and the dispersal of Gondwana: evidence for periodic migration of upwelling mantle flows (plumes) // EGU Stephan Mueller Special Publication Series. — 2002. — **2**. — P. 171—191.
- Shpount B. R., Oleinikov B. V. A comparison of mafic dyke swarms from the Siberian and Russian platforms // *Mafic dyke swarms // Geolog. Assoc. Canada Spec. Paper.* — 1987. — **34**. — P. 379—383.
- 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.
- Spence D., Turcotte D. Buoyancy-driven magma fracture — a mechanism for ascent through the lithosphere and the emplacement of diamonds // *J. Geophys. Res.* — 1990. — **95**. — P. 5133—5139.
- Spiegelman M., Kelemen P. B. Extreme chemical variability as a consequence of channelized melt transport // *Geochem. Geophys. Geosyst.* — 2003. — **4(7)**. — P. 1055. — DOI:10.1029/2002GC000336.
- Storey M., Mahoney J. J., Saunders A. D., Duncan R. A., Kelley S. P., Coffin M. F. Timing of hotspot-related volcanism and the breakup of Madagascar and India // *Science.* 1995. — **267**. — P. 852—855.
- 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.
- Vasiliev Y. R., Zolotukhin V. V. The Maimecha-Kotui alkaline-ultramafic province of the northern Siberian Platform, Russia // *Episodes.* — 1995. — **18**. — P. 155—164.
- 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**. — P. 2427. — DOI:10.1029/2002JB002273.
- White R., McKenzie D. Mantle plumes and flood basalts // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 17543—17585.
- White R., McKenzie D. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts // *J. Geophys. Res.* — 1989. — **94**. — P. 7685—7729.
- Woolley A. R., Kjarsgaard B. A. Carbonatite occurrences of the world: map and database. Geological Survey of Canada. Open File 5796. — 2008. — 28 p. — http://geopub.nrcan.gc.ca/moreinfo_e.php?id=225115.