



АЛМАЗОНОСНЫЙ МАГМАТИЗМ В СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ЦИКЛАХ

Рассмотрены особенности проявления алмазоносного магматизма в свете суперконтинентальной цикличности. На основании обобщения современных мировых данных выявлены различия в степени таких проявлений на различных стадиях и фазах суперконтинентального цикла. Выделены временные интервалы в геологической эволюции, характеризующиеся различным потенциалом алмазоносного магматизма, что может быть использовано при прогнозировании.

Ключевые слова: алмазоносный магматизм, кимберлиты, лампроиты, суперконтиненты, суперконтинентальный цикл, фазы интеграции, деструкции, фрагментации (распада), конвергенции (сборки), интервалы алмазоносного магматизма.

Структурно-тектоническим факторам локализации месторождений алмазов посвящено сравнительно большое число работ. Значительно меньше исследований связано с оценкой роли различных временных интервалов в истории Земли в плане их алмазоносности.

В настоящее время установлена временная связь между формированием многих типов полезных ископаемых и сборкой или распадом суперконтинентов [9 и др.]. Эта тема затрагивалась и в отношении алмазоносных кимберлитов и лампроитов [11, 12, 15 и др.].

Данная проблема изучалась автором в свете разработанной им суперконтинентальной цикличности с периодом 400 млн лет [3]. Представленная статья развивает эти исследования, но не затрагивает проблему пространственного размещения алмазоносных магматитов. По мнению автора, их формирование, в основном на стабильных кратонах, следует «правилу Клиффорда» с существенными отклонениями от него [2].

Под термином «суперконтинентальный цикл» (СЦ) подразумевается кругооборот процессов в литосфере, приводящих в начале к объединению всех или большинства существующих на Земле разобщённых континентальных масс в единый суперконтинент, а на заключительных этапах – к его распаду и последующей сборке нового суперконтинента.

В первой стадии различается фаза *интеграции* (агломерации) с тенденцией продолжающегося слияния, «спекания» частей только что новообразованного суперконтинента и присоединения к нему единичных неприсоединённых фрагментов континентальной коры. За ней следует фаза *деструкции* (раскалывания), намечающегося распада в виде проявлений континентального рифтогенеза.

Первая фаза второй стадии – фрагментация, соответствующая распаду суперконтинента, характеризуется быстрыми спредингами в новообразованных океанах, вторая фаза – конвер-

Божко Николай Андреевич

доктор геолого-минералогических наук
профессор
bozhko@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет им. М.В.Ломоносова»,
г. Москва

1. СТРУКТУРА СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОГО ЦИКЛА

Суперконтинентальный цикл 400 млн лет				
Стадия	Фаза	Главные палеогеодинамические индикаторы	Млн лет	
Межконтинентальная (континенты и молодые океаны)	<i>Конвергенция (сборка суперконтинента)</i> Образование коллизионных складчатопокровных (орогенических) поясов	Субдукционные и коллизионные осадочные, магматические и метаморфические комплексы	165	250
	<i>Фрагментация (распад суперконтинента)</i> Новообразование океанов, формирование пассивных окраин континентов	Офиолиты и комплексы пассивных окраин континентов. Формирование крупных внутриплатформенных впадин, интенсивное развитие плюмового магматизма	85	
Суперконтинентальная (слипный суперконтинент)	<i>Деструкция (раскалывание суперконтинента)</i> Континентальный рифтогенез	Породные комплексы континентальных рифтов, траппы, дайки, расслоенные интрузии	60	150
	<i>Интеграция (агломерация)</i> Слияние, «спекание» собранных континентальных масс и присоединение единичных сиалических фрагментов к уже сформированному суперконтиненту	Коры выветривания, континентальные и субаэральные осадочные комплексы, анорогенный магматизм	90	

генция, соответствующая сборке, – замедленными спредингами или их отсутствием и активными субдукциями, приводящими к коллизиям и закрытию океанов. Каждой из выделенных фаз свойствен свой набор литодинамических комплексов: внутриплитных, рифтовых, пассивных и активных окраин, океанических, субдукционных, коллизионных (табл. 1). Следовательно, построенная цикличность может быть проверена палеотектоническим анализом.

В схеме структуры СЦ с периодом 400 млн лет продолжительность стадии слитного суперконтинента оценивается соответственно в 150 млн лет с фазой агломерации (90 млн лет) и фазой деструкции (60 млн лет). Продолжительность стадии расчленённого суперконтинента составляет 250 млн лет и складывается из фаз распада (85 млн лет) и сборки (165 млн лет), что позволяет выделить в течение последних 3 млрд лет истории Земли восемь СЦ и суперконтинентов, при этом пять «общепринятых» из них вписались в данную цикличность [3] (табл. 2). Представленная цикличность проверена временем и принципиально не противоречит мировым фактическим данным.

Ниже рассмотрено содержание отдельных фаз СЦ в плане алмазоносного магматизма исходя из

имеющегося фактического материала, начиная с наиболее древнего обоснованного позднеархейского суперконтинента Кенорленд (ия) (Пангея 0) на уровне 2,7 млрд лет.

Алмазоносный магматизм континентальных стадий (слипного суперконтинента) различных циклов.

Фазы интеграции. С ними связано минимальное количество датированных кимберлитов. В *Родинии* этой фазе (1120–1030 млн лет) соответствуют кимберлиты Кайл кратона Сьюпириор (1076 млн лет), лампроиты Маджгаван кратона Бандельканд (1075 млн лет) [21], кимберлиты Восточного Дарвара (1100 млн лет) [17]; в *Паннотии* (720–630 млн лет) – кимберлиты Рено Канады (640 млн лет), Гуанамо Южной Америки (712 млн лет) и в *Пангее* (320–230 млн лет) – кимберлиты Джваненг (235 млн лет) [21] почти на границе с фазой деструкции.

Фазы деструкции. В *Пангее* эта фаза находится в интервале 230–170 млн лет. К ней относятся кимберлиты Докалвао кратона Каапвааль Южной Африки (203 млн лет), Каролина Амазонского кратона Южной Америки (230 млн лет), Тимбер Крик и Оррору блоков Кимберли и Голер Австралии (180 и 170 млн лет), Канады (172 млн лет) [21], Сибирской платформы (235–220 млн лет) [6, 8]. В *Паннотии* к

2. СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ И СУПЕРКОНТИНЕНТЫ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Начало фазы, млн лет	Фазы СЦ	СЦ и суперконтиненты
85	Конвергенция	
170	Фрагментация	
230	Деструкция	Пангея
320	Интеграция	
485	Конвергенция	
570	Фрагментация	
630	Деструкция	Паннотия
720	Интеграция	
885	Конвергенция	
970	Фрагментация	
1030	Деструкция	Родиния
1120	Интеграция	
1285	Конвергенция	
1370	Фрагментация	
1430	Деструкция	Готия
1520	Интеграция	
1685	Конвергенция	
1770	Фрагментация	
1830	Деструкция	Колумбия
1920	Интеграция	
2085	Конвергенция	
2170	Фрагментация	
2230	Деструкция	Ятулия
2320	Интеграция	
2485	Конвергенция	
2570	Фрагментация	
2610	Деструкция	Кенорленд (ия)
2720	Интеграция	

данной фазе (630–570 млн лет) относятся кимберлиты Брауна Южной Америки (630 млн лет), Джордж Крик (600 млн лет) и Чикен Парк (614 млн лет) Северной Америки [14, 21], Урикско-Ийского грабена Сибирской платформы (650–540 млн лет) [8], Каави-Куопио Финляндии (626–589 млн лет) [16]; в *Готии* к фазе деструкции (1430–1370 млн лет) – лампроиты Боби и Тубатуко в Айвори Кост (1429 млн

лет) [21]. К фазе деструкции *Ятулии* (2230–2170 млн лет) приурочено внедрение кимберлитов в кратоне Йилгарн Австралии (2188 млн лет) [13].

Как видно, большинство алмазонасных кимберлитов приурочены ко второй половине стадии слитного суперконтинента – фазе деструкции (континентального рифтогенеза), на границе с фазой распада.

Алмазонасный магматизм межконтинентальных стадий (молодых океанов и континентов). Фазы фрагментации (распада) суперконтинента. При распаде *Пангеи* эта фаза составляет интервал 170–85 млн лет. Кимберлиты данного возраста на кратоне Каапвааль Южной Африки группируются в возрастные интервалы 114–144 и 84–95 млн лет [21]. Их количество – 60 тел, в числе которых кимберлиты Клипспрингер, Далструм, Вурспод, Финч Ньюленд, Орапа, Летлакейн, Летсенг и др. В Западной Африке к этому ряду относятся кимберлиты кратона Мэн (139–153 млн лет), а в Центральной – кратона Касаи в Анголе (120–125 млн лет). Аналогичную позицию в данном суперконтинентальном цикле занимают кимберлиты Канастра кратона Сан Франсиску Южной Америки (120 млн лет), Форт а ля Корн фундамента Саскачевана Канады (100 млн лет) [21], Центральной Канады (103–94 млн лет) [22], Южной Индии (90 млн лет) [18], Сибирской платформы (160–150 млн лет) [6]. При распаде *Паннотии* в интервале 570–485 млн лет формировались промышленные кимберлиты Венетиа, Мурова, Оакс, Колоссус Южной Африки и Зимбабве (500–540 млн лет), Снеп Лейк Канады (523 млн лет) [21]. К распаду *Готии* (1370–1285 млн лет) приурочено внедрение трубок Лерала в восточной Ботсване с возрастом 1333 млн лет [21]. Кимберлиты Кимозеро Карелии с возрастом 1764 млн лет [7] формировались в фазу распада суперконтинента *Колумбия* (1770–1685 млн лет).

Фазы конвергенции (сборки) суперконтинента. Сборка *Пангеи* (485–320 млн лет) сопровождалась формированием основной массы кимберлитовых тел Сибирской платформы в интервалах 419–407 и 370–344 млн лет [6]. Данному интервалу соответствует возраст трубки Гриба в Архангельской провинции (372 млн лет) [5], кимберлитов Терского Берега Кольского полуострова (465 млн лет) [4], трубок Кисли Лейк и Слоган США (380–390 млн лет), Фуксян и Шенгли Китая (475 млн лет) [21], кимберлитов с возрастом 450 и 408 млн лет Канады и США [14]. Сборке *Паннотии* (885–720 млн лет) отвечают кимберлиты Арис и Сеппелт Австралии (800 млн лет)

[21]. Со сборкой *Родинии* (1285–1120 млн лет) совпадает внедрение кимберлитов трубки Премьер в Южной Африке (1180 млн лет), а также лампроитов Аргайл в Австралии (1177 млн лет), трубки Сальвадор Южной Америки (1150 млн лет) [21], кимберлитов и лампроитов Кухмо-Лентира-Костомукша Карелии (1230 млн лет) [20] и Присаянья (~1268 млн лет) [8].

К фазе сборки (2085–1920 млн лет) суперконтинента *Колумбия 1* (Пангея 1) могут относиться лампроиты и кимберлиты южной окраины Сибирского кратона (2,1–1,8 млрд лет) [8], кимберлиты Наберру и Брокман Австралии (1900 млн лет) [21].

Переходное положение к началу формирования будущего суперконтинента, по-видимому, занимают кимберлиты Икати Канады и Мвадуи Танзании с возрастом 52 млн лет, а также лампроиты Иллендейл Австралии (22 млн лет) [21], кимберлиты Кунделунгу [10].

Анализ имеющихся данных о времени формирования кимберлитов и лампроитов на фоне указанной цикличности обнаруживает различную предрасположенность отдельных фаз суперконтинентального цикла к проявлению алмазоносного магматизма. Образование кимберлитов и лампроитов протекало неравномерно, резко активизируясь в фазы сборки и распада, значительно затухая в собственно суперконтинентальную стадию, концентрируясь только в фазу деструкции – господства в суперконтиненте континентального рифтогенеза. Это же относится и к промышленной алмазоносности, которая может формироваться как в течение фазы распада суперконтинента, так и во время его сборки. Так, все экономически важные коренные месторождения алмазов Сибирской платформы приурочены к среднепалеозойскому интервалу 350–370 млн лет, что соответствует фазе сборки *Пангеи*. В Южной Африке такой магматизм происходил в возрастных рамках 114–144 и 84–95 млн лет, т. е. в эпоху распада этого суперконтинента.

На основании проведенного анализа, опирающегося на современные данные по проявлениям алмазоносного магматизма, в различных фазах СЦ можно выделить:

- интервалы активного алмазоносного магматизма (млн лет), соответствующие фазам **распада** – 1770–1685, 1370–1285, 570–485, 170–85 и **сборки** – 2085–1920, 1285–1120, 885–720, 485–320, <85 суперконтинента. В качестве возможных аналогичных интервалов (млн лет) можно

предположить фазы распада (2610–2570, 2230–2170, 1030–970) и сборки (2485–2320, 1685–1520), в рамках которых на сегодняшний день не зафиксированы проявления проявления алмазоносного магматизма;

- интервалы умеренного или незначительного алмазоносного магматизма (**фазы деструкции суперконтинента**) – 2230–2170, 1430–1370, 630–570, 230–170 млн лет. Возможные подобные интервалы – 2610–2570, 1830–1770, 1030–970 млн лет;
- интервалы отсутствия или незначительного алмазоносного магматизма (фазы интеграции новообразованного суперконтинента): 2720–2610, 2320–2230, 1920–1830, 1520–1430, 1120–1030, 720–630, 320–230 млн лет. В дальнейшем не исключено обнаружение единичных проявлений в фазах трёх последних суперконтинентов.

Выявленное распространение во времени алмазоносного магматизма по фазам суперконтинентального цикла в целом коррелируется с установленным ранее автором непрерывно-дискретным характером проявлений основного–ультраосновного магматизма [1].

Из сказанного следует, что алмазоносные магматиты формируются в фазы СЦ различных геодинамических обстановок, поскольку суперконтинентальная цикличность, контролировавшая алмазоносный магматизм, сочетает проявления механизмов тектоники литосферных плит и тектоники мантийных плюмов.

Можно предположить, что в стадию слитного суперконтинента, когда исчезают главные зоны выделения земного тепла в виде срединно-океанических хребтов, возникает теплоизоляционный экран, под которым накапливается мантийное тепло и нарастает процесс глубинного плюмообразования. Этот процесс начинает реализовываться в форме алмазоносных интрузий в фазе деструкции, прогрессируя в последующей фазе фрагментации, тогда как в первую фазу агломерации ещё продолжается становление теплового экрана. Во время сборки суперконтинента, по-видимому, вступают в силу другие благоприятные факторы, связанные с влиянием зон субдукции на мантийную динамику ниже континентальной литосферы, такие как привнос в мантию полезных для алмазообразования компонентов. При этом можно предположить и проявление механизма «неглубокого»

плюмообразования, связанного с перемещением субдуцирующего слэба вдоль границы 670 км далеко за пределы плит.

Непрерывно-дискретное распространение во времени алмазоносного магматизма, связанное с суперконтинентальной цикличностью, происходило на фоне чёткой направленности – увеличения числа его проявлений в геологическом времени [11–13, 19 и др.]. Так, ~95% датированных кимберлитов оказываются моложе 750 млн лет, большая часть их являются мезозойскими. На рубеже около 1,2–1,1 млрд лет имел место скачок в проявлении кимберлитового магматизма, сопровождавшийся образованием первого промышленного месторождения Премьер. Представляется важным то обстоятельство, что данное явление совпало с временем образования и распада суперконтинента Родиния, когда обособилась Гондвана, а в последующем Лавразия – мегаконтиненты несоизмеримо более значительного размера по сравнению с континентами предыдущих циклов. Примечательно, что первое появление, хотя и незначительных, алмазоносных магматитов в фазе интеграции СЦ отмечается в суперконтиненте Родиния. Таким образом, общие изменения, события, происходящие в эволюции алмазоносного магматизма, синхронизируются с изменениями в ходе суперконтинентальной цикличности.

В заключение отметим следующее.

Алмазоносный магматизм в истории Земли контролировался суперконтинентальной цикличностью, проявляясь неравномерно на стадиях и фазах суперконтинентального цикла.

Наиболее масштабно проявление кимберлитового и лампроитового магматизма происходило в межсуперконтинентальную стадию СЦ, в фазы распада и сборки суперконтинентов. Это же относится и к промышленной алмазоносности, которая может возникать в течение каждой из этих фаз. На стадии существования слитных суперконтинентов отмечается значительно меньшее количество датированных алмазоносных кимберлитов и лампроитов, приуроченных в основном к её заключительной фазе, на границе со стадией распада.

На основе выявленного распределения алмазоносных кимберлитов и лампроитов в фазах суперконтинентальных циклов впервые намечены интервалы в истории Земли, отличающиеся различным потенциалом алмазоносного магматизма, что в сочетании с факторами его структурной ло-

кализации может быть использовано при прогнозировании.

Распространение во времени алмазоносного магматизма, связанное с суперконтинентальной цикличностью, происходило на фоне прогрессивного увеличения его масштаба в геологическом времени с резким скачком и появлением промышленных месторождений алмазов в позднем мезопротерозое, что коррелируется с изменениями в ходе суперконтинентальной цикличности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божко Н.А. Внутриплитный базит-ультрабазитовый магматизм во времени и в аспекте суперконтинентальной цикличности // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2010. № 3. С. 10–25.
2. Божко Н.А. Геотектонические факторы локализации алмазоносных кимберлитов в свете современных данных // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж, 2003. С. 360–365.
3. Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 13–27.
4. Гавриленко Б.В. Минерагения благородных металлов и алмазов северо-восточной части Балтийского щита: Автореф. дисс... д-ра геол.-минер. наук. – М., 2003.
5. Изотопные исследования во ВСЕГЕИ. Перспективы использования результатов в целях прогноза и поисков месторождений алмазов / С.С.Шевченко, К.И.Лохов, С.А.Сергеев и др. // Мат-лы Науч.-практ. конф. «Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50)». СПб., 2004, 383–387.
6. Новые данные о возрасте кимберлитов Сибирского кратона: результаты U-Pb датирования кимберлитовых цирконов / В.Г.Мальковец, Е.А.Белоусова, И.Г.Третьякова и др. // Мат-лы VI Всеросс. науч.-практ. конф. «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». Якутск, 1917. С. 329–333.
7. Раннепротерозойские алмазоносные кимберлиты Карелии и особенности их формирования / В.Н.Устинов, А.К.Загайный, К.Б.Смит и др. // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 963–977.
8. Этапы кимберлитового магматизма Сибирской платформы и их продуктивность: закономерности формирования и особенности прогнозирования коренных месторождений алмазов различных генетических типов, новые перспективные регионы / Н.П.Похиленко, В.П.Афанасьев, Н.В.Соболев и др. // Проблемы минерагении России. М., 2012. С. 265–285.

9. *Barley M.E., Groves D.I.* Supercontinent cycle and the distribution of metal deposits through time // *Geology*. 1992. Vol. 20. P. 291–294.
10. *De Wit M.C.J., Jelsma H.A.* A Review of the Kimberlites of the Democratic Republic of Congo // *Geology and Resource Potential of the Congo Basin, Regional Geology Reviews*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. P. 361–369.
11. *Evolution of kimberlite magmatism on the dynamic Earth / S.Tappe, R.Smart, R.Stern et al.* // 11-th International Kimberlite Conference. Extended Abstract. No. 11IKC-4542. 2017.
12. *Geodynamics of kimberlites on a cooling Earth: Clues to plate tectonic evolution and deep volatile cycles / S.Tappe, S.Katie, T.Torsvik et al.* // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. Vol. 484. P. 1–14.
13. *Gurney J.J., Helmstaedt H.H., Richardson S.H., Shirey S.B.* Diamonds through time // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 689–712.
14. *Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Creaser R.A.* The timing of kimberlite magmatism in North America: implications for global kimberlite genesis and diamond exploration // *Lithos*. 2003. Vol. 71 (2–4). P. 153–184.
15. *Jelsma H., Barnett W., Richards S., Lister G.* Tectonic setting of kimberlites // *Lithos*. 2009. Vol. 112S. P. 155–165.
16. *Lehtonen M.L.* Kimberlites in Finland: Information about the mantle of the Karelian Craton and implications for diamond exploration. Academic dissertation. – University of Helsinki, Finland. 2005.
17. *Rao C.N.V., Creaser R.A., Lehmann B., Panwar B.K.* Re-Os isotope study of Indian kimberlites and lamproites: implications for mantle source regions and cratonic evolution // *Chemical Geology*. 2013. Vol. 353. P. 36–47.
18. *Rao N.V.C., Dongre A., Wu Fu-Yuan, Lehmann B.A.* Late Cretaceous (ca. 90 Ma) kimberlite event in southern India: Implication for sub-continental lithospheric mantle evolution and diamond exploration. *Gondwana Research*. 2016. Vol. 35. P. 378–389.
19. *Stern R.J., Leybourne M.I., Tsujimori T.* Kimberlites and the start of plate tectonics // *Geology*. 2016. Vol. 44 (10). P. 799–802.
20. *Ustinov V.N., O'Brien H., Lukyanova L.I., Peltonen P.* Diamond-bearing kimberlites of Northern Europe // 9-th International Kimberlite Conference. Extended Abstracts. No. 9IKC-A-00112. 2008.
21. *Wit Mike de.* Identification of Global Diamond metallogenic clusters to assist Exploration // *The 4th Colloquium on Diamonds – Source to Use*. SAIMM. 2010. P. 15–38.
22. *Wu Fu-Yuan, Yang Yue-Heng, Mitchell R.H., Zhang Yan-Bin.* In situ U-Pb age determination and Nd isotopic analysis of perovskites from kimberlites in southern Africa and Somerset Island Canada // *Lithos*. 2010. Vol. 115 (1). P. 205–222.

DIAMOND MAGMATISM IN SUPERCONTINENTAL CYCLES

N.A.Bozhko
(FSBEI M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Diamond magmatism features as part of supercontinental cycles are discussed. Based on current global data synthesis, differences in such manifestations intensity at various stages of a supercontinental cycle are recognized. Time intervals in geological evolution are distinguished; they are characterized by various potential of diamond magmatism which could be used in forecasting.

Keywords: diamond magmatism, kimberlites, lamproites, supercontinents, supercontinental cycle, stages of integration, destruction, fragmentation (disintegration), convergence, diamond magmatism intervals.

