



УДК 551.2:552.323

О. В. Арясова, Я. М. Хазан

Максимальная глубина ксенолитов, выносимых кимберлитами, и тепловое состояние литосферы

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Термобарометрическое изучение ксенолитов/ксенокристов из 39 кимберлитов Евразии, Африки и Северной Америки показало, что в большинстве случаев наиболее глубокий ксенолит (а значит, и все остальные) захватывается в пределах деплетированной литосферы. Из этого следует, что в согласии с петролого-геохимическими данными источники кимберлитов располагаются вблизи деплетированной литосферы. По результатам термобарометрии установлено, что с увеличением референтного теплового потока на поверхности, характеризующего литосферную геотерму, глубина наиболее глубокого ксенолита уменьшается.

За последние примерно 350 млн лет в Евразии и Африке наблюдалось не менее восьми масштабных излияний платобазальтов (трапш), сопровождавшихся близкими по времени и пространственно извержениями карбонатитов и/или кимберлитов. Из синхронности близких пространственно магматических проявлений неизбежно вытекает предположение о том, что все типы магматизма имеют общее происхождение [1, 2]. Наиболее вероятно, что воздействие, вызывающее основной и ультраосновной щелочной магматизм сразу на огромной (в тысячи километров) территории, связано с приходом к подошве литосферы гигантского мантийного плюма.

С приближением к литосфере восходящее движение плюма сменяется латеральным растеканием, в результате формируется “голова” радиусом порядка 1000 км [3]. Последняя, растекаясь латерально, по-видимому, следует рельефу подошвы литосферы, на что указывает корреляция составов магм, генерируемых одним и тем же плюмом, с тектоническим фоном, на котором они изливаются [1, 2, 4].

Магматизм под влиянием растекающейся “головы” мантийного плюма можно трактовать как природный эксперимент по плавлению в условиях подошвы литосферы. В частности, жидкости кимберлитового состава возникают только при взаимодействии плюма

© О. В. Арясова, Я. М. Хазан, 2013

с мощной литосферой кратонов (вероятно, с участием флюидов и тепла, поступающих из плюма) в согласии с лабораторными экспериментами по плавлению в системе CMAS — CO₂ [5], которые показали, что кимберлиты выплавляются при давлениях $\geq 5\text{--}6$ ГПа. Из того что мощная литосфера является необходимым условием генерации расплавов кимберлитового состава, неизбежно следует ассоциация кимберлитового магматизма с древними (архейскими или раннепротерозойскими) структурами, потому что из-за уменьшения потенциальной температуры конвектирующей мантии, начиная с архея [6], деплетированная литосфера “кратонной” мощности не могла возникнуть в постархейское время, что фактически и является физической причиной справедливости так называемого правила Клиффорда.

В настоящей работе изучается, как располагаются источники кимберлитов относительно деплетированной литосферы и как связана их глубина с тепловым состоянием литосферы. С этой целью выполнена одноклинопироксеновая термобарометрия [7] ксенолитов/ксенокристов из 39 кимберлитов Евразии, Африки и Северной Америки (табл. 1). Для каждого из кимберлитов определено давление P_{\max} , при котором последний раз термализовался наиболее глубокий ксенолит, и тепловой поток q на поверхности, характеризующий геотерму Хастерока, Чепмена [8] (НС11), наилучшим образом аппроксимирующую результаты термобарометрии. Сопоставление наблюдаемых значений (P_{\max} , q) с независимо определенным положением глубины, до которой распространены деплетированные перидотиты с высоким отношением Cr/Al [9], показало, что в 37 случаях из 39 наиболее глубокий ксенолит (а значит, и все остальные) был захвачен в пределах деплетированной литосферы. Это подтверждает предположение, что мантийные плюмы достигают границы деплетированной литосферы. Результаты термобарометрии также показывают, что с увеличением теплового потока на поверхности (т. е. фактически температуры литосферы) глубина источников кимберлитов уменьшается.

Термобарометрическое изучение ксенолитов кимберлитов. Для сопоставимости результатов все определения равновесных температур и давлений выполнялись с помощью одного и того же одноклинопироксенового термобарометра Нимиса и Тейлора (NT00) [7]. Термобарометр применим к широкому спектру составов гранатовых перидотитов и позволяет выполнять термобарометрические определения по одиночным зернам ксенокристов клинопироксена из разрушенных ксенолитов. Для успешного применения термобарометра NT00 необходимо, чтобы клинопироксен находился в равновесии как с ортопироксеном, так и гранатом. В данном исследовании используются процедуры скрининга, предложенные Нимисом и Тейлором [7, 9]. Программное обеспечение, использовавшееся для термобарометрических расчетов, проверено на тестовом примере [7, 9].

Параметризация кондуктивных геотерм в литосфере. Результаты термобарометрии удобно представлять относительно некоторой системы геотерм. Нами используется однопараметрическое семейство геотерм, предложенное Хастероком и Чепменом (НС11) [8], которые модернизировали известную модель РС77. Геотермы НС11 представляют собой стационарные решения уравнения теплопроводности с заданными температурой и тепловым потоком на поверхности, который является параметром семейства.

Геотермы НС11 рассчитываются для определенной структуры коры и литосферы (мощность верхней коры 16 км, полная мощность коры 39 км) и распределения источников тепла (мощность теплогенерации в верхней коре обеспечивает 26% потока тепла, в нижней коре и мантии мощность теплогенерации 0,4 и 0,02 мкВт/м³ соответственно). Поскольку в реальных условиях мощность теплогенерации может отличаться от задаваемой, то тепловой поток на поверхности является референтным (модельным) тепловым потоком (РТП).

Таблица 1

Порядковый номер кимберлитов	Поле/ регион	Кимберлит	Возраст, млн лет	q , мВт · м ⁻²	P_{\max} , ГПа	Литературный источник (см. прим.)
1	Алакит	Айхал	367–344	35,4 ± 1,3	6,8	[1]
2		Комсомольская	367–344	34,6 ± 1,3	6,7	[1]
3		Юбилейная	367–344	38,3 ± 1,2	5,8	[1]
4	Алдан	Алданская		33,1 ± 0,4	3,6	[1]
5		Огонек		33,1 ± 0,6	3,7	[1]
6	Анабар	Хардах		34,3 ± 0,9	4,9	[1]
7	Attawipiskat	Kyle Lake	1100 ± 40	39,7 ± 0,5	5,6	[2]
8		Victor 1	Ранняя юра	38,2 ± 0,5	5,4	[2]
9		X-Ray	Ранняя юра	38,7 ± 0,8	5,1	[2]
10	Australia	Argyle	~1180	39,0 ± 0,8	6,0	[3]
11	Далдын	Удачная	347	36,8 ± 1,2	7,5	[1, 4]
12		Загадочная		35,3 ± 1,1	4,0	[5]
13	SW Greenland		604–555	37,7 ± 1,2	6,0	[6]
14	Каарваал	Bultfontein	84–78	37,8 ± 1,2	5,1	[7, 8]
15		Jagersfontein	85,6 ± 1	35,6 ± 0,6	5,8	[7, 9]
16		N, Lesotho, Monastery	Мел 88 ± 4	38,1 ± 1,0	4,4	[7, 10]
17		Premier	1180	41,5 ± 0,4	5,5	[11]
18		Finsch	118,4 ± 2,2	38,9 ± 0,6	5,5	[12, 13]
19	Карельский кратон	Каави-Куорю	626–589	37,3 ± 0,9	6,0	[14]
20	Малоботу-обинское поле	Дачная		34,5 ± 1,4	4,4	[1]
21		Деймос		37,3 ± 0,8	4,5	[1]
22		Мир	360	35,5 ± 1,0	4,7	[1]
23		Новинка		35,6 ± 1,3	7,4	[1]
24	Montana	Homestead	~50	44,5 ± 1,6	4,3	[15]
25		Williams	Средний эоцен	37,5 ± 1,5	5,3	[16]
26	Накын	Нюрбинская	364	35,2 ± 1,4	6,3	[1]
27	SA off-craton	East Griqualand	~150	38,7 ± 0,8	4,6	[17]
28		Eastern Namaqualand	143–74	39,9 ± 1,8	5,1	[17]
29		Louwrensia	70	39,1 ± 0,9	4,3	[18]
30	Slave	Diavik A154S	55,7 ± 1,2	36,7 ± 1,1	5,9	[19–21]
31		Ekati	53–47,5	35,6 ± 0,6	6,2	[22]
32		Gahcho Kue	542	35,5 ± 1,0	6,4	[23]
33		Jericho	172 ± 2	35,7 ± 1,5	5,8	[24]
34		Kirkland Lake	156	37,1 ± 0,9	5,2	[23]
35	Somerset Isl,	Nikos	103–94	38,6 ± 1,2	4,5	[25]
36		Ham		43,1 ± 0,6	4,5	[26]
37	Верхняя Муна	Комсомольская-Магнитная		36,7 ± 0,7	6,5	[1]
38	Zimbabwe	Murova, Sese	Sese: 538 ± 11	41,4 ± 0,9	4,7	[27]
39	Золотица	Архангельская	380–360	35,1 ± 0,9	5,5	[28]

Примечание. Нумерация соответствует литературной ссылке: 1 – Ashchepkov et al., 2010; 2 – Sage, 2000; 3 – Luguët et al., 2009; 4 – Boyd et al., 1997; 5 – Nimis et al., 2009; 6 – Sand et al., 2009; 7 – Grègoire et al., 2003; 8 – Simon et al., 2007; 9 – Burgess, Harte, 2004; 10 – Simon et al., 2003; 11 – Viljoen et al., 2009; 12 – Gibson et al., 2008; 13 – Lazarov et al., 2009; 14 – Lehtonen et al., 2004; 15 – Hearn, Jr., 2004; 16 – Hearn et al., 1984; 17 – Janney et al., 2010; 18 – Boyd et al., 2004; 19 – Pearson et al., 1999; 20 – Aulbach et al., 2007; 21 – van Achterbergh et al., 2004; 22 – Menzies et al., 2004; 23 – Grütter, 2009; 24 – Kopylova et al., 1999; 25 – Schmidberger, Francis, 1999; 26 – Jago, Mitchell, 1987; 27 – Smith et al., 2009; 28 – Lehtonen et al., 2008.

Оценка РТП и P_{\max} . Для каждого кимберлитового проявления можно выбрать геотерму, обеспечивающую наименьшее среднеквадратичное отклонение от результатов термобарометрии. Если в результате термобарометрических расчетов известно N значений температур и давлений соответственно T_i, P_i ($i = 1, \dots, N$), то среднеквадратичное отклонение $S(q)$ давлений и температур от геотермы: $T = T(P, q)$ (или $P = P(T, q)$), где q — РТП, определяется следующим образом [8]:

$$S^2(q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - T(P_i, q)}{\sigma_T} \right)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - P(T_i, q)}{\sigma_P} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь σ_T и σ_P — погрешности определения температуры и давления соответственно, основывающиеся на калибровке термобарометра. Нами использована калибровка, предложенная в статье [7] ($\sigma_T = 30$ К и $\sigma_P = 0,23$ ГПа). Для каждого кимберлитового проявления находилось значение РТП q , при котором достигалось минимальное значение $S(q)$: $S_{\min} = \min(S(q))$. Статистическая погрешность определения РТП оценивалась как полуширина σ кривой $S(q)$ на уровне $2^{1/2} S_{\min}$. Оценка референтного теплового потока и его статистической погрешности для рассмотренных кимберлитов приведена в табл. 1.

Менее надежным является определение давления P_{\max} наиболее глубокого ксенолита/ксенокрита. В частности, по случайным причинам могут быть захвачены, вынесены на поверхность и/или обнаружены только ксенолиты/ксенокриты, изначально находившиеся вдали от источника. С другой стороны, не полная уравновешенность минералов ксенолита или аналитическая погрешность может привести к появлению ошибочной точки на PT -диаграмме, определяющей максимальную глубину. Наконец, давление P_{\max} может систематически быть меньше глубины источника. Последнее связано с тем, что “всплывающие транслитосферные дайки”, транспортирующие кимберлитовые расплавы на поверхность [10, 11], становятся неустойчивыми только по достижении определенной критической длины a_c . Последняя зависит от разности плотностей $\Delta\rho$ вмещающих пород и расплава, размера r зоны неупругой деформации на кончике трещины и всестороннего давления $P_{\text{lith}} = \rho g H$, играющего в мантии роль прочности по отношению к растяжению [12]. Оценить a_c можно, приравняв напряжение $K_I/\sqrt{2\pi r}$ на кончике трещины литостатическому давлению ($K_I = \Delta p \sqrt{\pi a_c}$ — коэффициент интенсивности напряжений растяжения, Δp — избыточное давление в трещине; по порядку величины $\Delta p \sim \Delta \rho g a_c$):

$$a_c = 2^{1/3} \left(\frac{\rho}{\Delta\rho} \right)^{2/3} H^{2/3} r^{1/3}, \quad (2)$$

где $H \sim 200$ км, $\rho/\Delta\rho = 10$ –100, $r = 1$ –10 мм (размеры зерна), $a_c = 2$ –20 км.

Таким образом, первые ксенолиты захватываются на расстоянии > 2 –20 км от места зарождения трещины. Кроме того, в момент страгивания “плавучесть” трещины равна нулю. Она возрастает из-за роста трещины и увеличения разности плотности твердых пород и расплава в процессе всплывания трещины (сжимаемость расплава выше, чем вмещающих пород), но трещина должна пройти некоторое расстояние, прежде чем скорость течения расплава в ней достигнет значений около 1 м/с, достаточных для транспортировки ксенолитов сантиметрового размера (при $\Delta\rho/\rho \sim 0,1$ и вязкости расплава порядка 0,1 Па · с).

Несмотря на то что точность определения РТП и в особенности P_{\max} не очень велика, именно эти величины дают непосредственную информацию о тепловом состоянии литосферы в эпоху кимберлитового магматизма и о глубине, на которой располагается его источник.

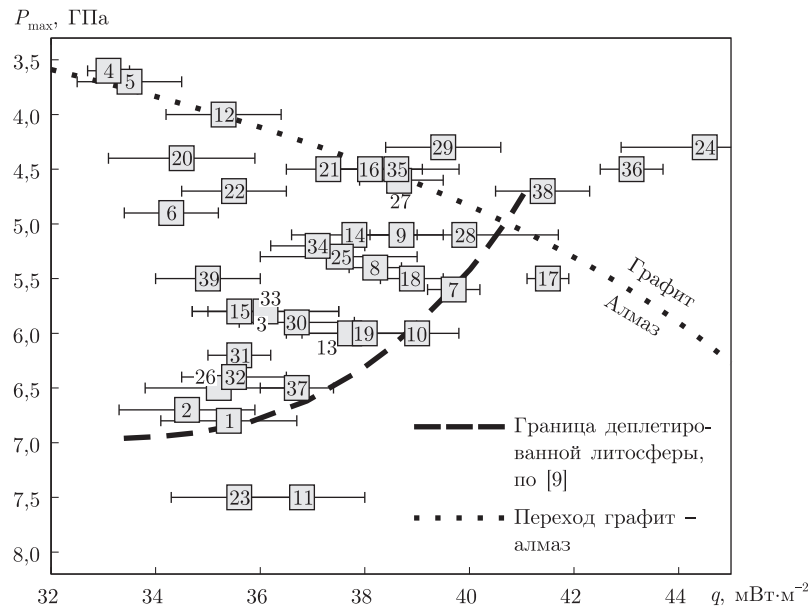


Рис. 1. Результаты термобарометрического изучения 39 кимберлитов Канады, Африки, Сибири и севера ВЕП (числа в квадратах соответствуют нумерации в табл. 1). Для каждого кимберлита определялись глубина (равновесное давление) наиболее глубокого ксенолита и наилучшая геотерма из семейства НС11 [8], т. е. РТП на поверхности (параметр семейства)

Отметим также, что при литостатическом давления около 4,5–5 ГПа скачкообразно уменьшается растворимость CO_2 в кимберлитовом расплаве [13], и плотность последнего резко падает. По-видимому, после этого скорость дайки, транспортирующей кимберлитовый расплав, достигает значений > 10 м/с, фиксируемых по наблюдениям диффузионной потери аргона зернами флогопита [14]. В рассмотренной выборке практически отсутствуют кимберлитовые проявления с максимальной глубиной ксенолитов, меньшей 4,5–5 ГПа. Это является серьезным аргументом в пользу того, что доставка кимберлитов на поверхность происходит во “всплывающих дайках”, как предположили Спенс, Туркотт [10] и Листер, Керр [11].

Результаты термобарометрического исследования: связь между тепловым состоянием литосферы и глубиной источников кимберлитового магматизма.

Результаты термобарометрии, приведенные в координатах (q, P_{max}) , иллюстрирует рис. 1.

Как обсуждалось в предыдущем разделе, значения глубины наиболее глубокого ксенолита подвержены влиянию случайных факторов. Поэтому реальный физический смысл может иметь только огибающая наблюдаемых данных. Точки на рис. 1, за некоторыми исключениями, образуют плотное облако с довольно четко выраженными верхней и нижней границами.

Глубина, на которой захватывается первый ксенолит, отмечает нижнюю границу “алмазного окна” для определенного кимберлита. Как следует из рис. 1, с увеличением РТП, т. е. прогремости литосферы, нижняя граница “алмазного окна” поднимается. При этом его верхняя граница (переход графит/алмаз) понижается, и ширина “алмазного окна” уменьшается от примерно 3 ГПа (около 100 км) при РТП $35 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$ до нуля при РТП около $41 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Грюттер и др. [15] калибровали барометр P38, который использует данные $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--CaO}$ для ксенокристов граната в кимберлитах и позволяет определить максимальную глубину распространения в мантии деплетированных перидотитов с высоким отношением Cr/Al . При помощи барометра Грюттер [9] оценил положение границы деплетированной литосферы для более 50 кимберлитовых проявлений и сопоставил эти результаты с оценками РТП (см. табл. 2 и рис. 9 в [9]). Поскольку оценки РТП, использованные Грюттером [9], относятся к системе геотерм РС77, то эти оценки требуют корректировки для использования вместе с геотермами НС11. Прямым сопоставлением геотерм РС77 и НС11 в диапазоне давлений 3,5–4,5 ГПа, к которому относятся значения РТП, приведенные в [9], можно приближенно оценить, что поправки к РТП варьируются от $-0,5$ до -2 мВт/м² в интервале РТП от 35 до 45 мВт/м². (Штриховая линия на рис. 1 — огибающая откорректированных данных, по [9].)

Огибающая данных, представленных нами, практически совпадает с огибающей, приведенной в публикации [9]. За исключением двух сибирских кимберлитов (Удачная (поле Далдын) и Новинка (Малоботуобинское поле)), все исследованные кимберлиты захватили наиболее глубокие ксенолиты (из числа попавших в выборку) в пределах деплетированной литосферы. Это означает, что источники кимберлитов в большинстве случаев располагаются вблизи границы деплетированной литосферы, т. е., согласно общепринятой точки зрения, состав кимберлитов должен нести следы формирования в метасоматизированной деплетированной мантии.

Если, как следует из синхронности извержения внутриплитовых магматитов, кимберлиты генерируются под влиянием мантийного плюма, то последний должен был достичь границы деплетированной области. Нужно подчеркнуть, что из-за сильной зависимости вязкости горных пород от температуры существуют два различающихся режима остановки мантийных плюмов или, в более общей формулировке, формирования реологического подслоя, разделяющего области кондуктивного и конвективного теплопереноса в мантии. Помимо случая, рассматриваемого выше (остановка на границе деплетированной литосферы из-за плотностного контраста), быстрое возрастание вязкости, вследствие уменьшения температуры, может привести к смене восходящего движения плюма латеральным растеканием, несмотря на его положительную плавучесть. Вопрос о том, в каких условиях реализуется каждый из этих режимов, представляет значительный геодинамический интерес и будет предметом дальнейших исследований.

1. *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.
2. *Арясова О. В., Хазан Я. М.* Взаимосвязь между траппами, карбонатитами и кимберлитами и ее возможные причины // *Доп. НАН України.* – 2012. – № 5. – С. 97–104.
3. *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.
4. *Белов С. В., Лапин А. В., Толстов А. В., Фролов А. А.* Минерагения платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты). – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2008. – 537 с.
5. *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.
6. *Herzberg C., Condie K., Korenaga J.* Thermal history of the Earth and its petrological expression // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2010. – **292**. – P. 79–88.
7. *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.
8. *Hasterok D., Chapman D. S.* Heat production and geotherms for the continental lithosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2011. – **307**. – P. 59–70.

9. Grütter H. S. Pyroxene xenocryst geotherms: Techniques and application // *Lithos*. – 2009. – **112S**. – P. 1167–1178.
10. 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.
11. Lister J. R., Kerr R. C. Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes // *Ibid.* – 1991. – **96**. – P. 10049–10077.
12. Khazan Y. M., Fialko Y. A. Fracture criteria at the tip of fluid-driven cracks in the Earth // *Geophys. Res. Lett.* – 1995. – **22**, No. 18. – P. 2541–2544.
13. Рябчиков И. Д., Гирнис А. В. Происхождение низкокальциевых кимберлитовых магм // *Геология и геофизика*. – 2005. – **46**, № 12. – С. 1223–1233.
14. Kelley S. P., Wartho J.-A. Rapid kimberlite ascent and the significance of Ar–Ar ages in xenolith phlogopites // *Science*. – 2000. – **289**, No 5479. – P. 609–611.
15. Grütter H. S., Latti D., Menzies A. Cr-saturation arrays in concentrate garnet compositions from kimberlite and their use in mantle barometry // *J. Petrol.* – 2006. – **47**. – P. 801–820.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 11.09.2012

О. В. Арясова, Я. М. Хазан

Максимальна глибина ксенолітів, що виносяться кимберлітами, і тепловий стан літосфери

Термобарометричне вивчення ксенолітів/ксенокристів із 39 кимберлітів Євразії, Африки та Північної Америки показало, що в більшості випадків найбільш глибокий ксеноліт (а отже, й усі інші) захоплюється в межах деплетованої літосфери. Звідки випливає, що в узгодженні з петролого-геохімічними даними джерела кимберлітів розташовуються поблизу деплетованої літосфери. За результатами термобарометрії також випливає, що зі збільшенням референтного теплового потоку на поверхні, який характеризує літосферну геотерму, глибина найглибшого ксеноліта зменшується.

O. V. Aryasova, Ya. M. Khazan

Maximum depth of xenoliths taken out by kimberlites and a thermal state of the lithosphere

Thermobarometry of xenoliths/xenocrysts from 39 kimberlites of Eurasia, Africa, and North America demonstrates that mostly the deepest xenolites, as well as all the other, are exhumed from the depleted lithosphere, by implying in agreement with petrologic and geochemical data that the kimberlite sources are situated in a vicinity of the depleted lithosphere base. It follows from the thermobarometric data that the deepest xenolith depth decreases with increasing the reference heat flow characterizing a lithospheric geotherm.