

УДК 551.2.01+539.375.5

**Д.В. Мамаев**

**ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА КОШЕЛЕВКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО КОЛЬЦЕВОМУ ТЕКТЕНИЧЕСКОМУ РАЗЛОМУ**

*Размер магматического очага Кошелёвской геотермальной системы оценивается на основе данных о кольцевом тектоническом разломе. Использована механическая упруго-пластичная модель для определения размеров магматического очага, способного создать достаточное механическое напряжение для образования кольцевого тектонического разлома.*

*Ключевые слова: периферический магматический очаг, кольцевой разлом, механическая модель, упруго-пластичная модель, Кошелёвская магматогенная геотермальная система.*

---

**Д**анные о размерах периферического магматического очага, питающего тепловой энергией магматогенную геотермальную систему, необходимы для количественной оценки геометрических параметров геотермального резервуара с целью последующего термогидродинамического численного моделирования. В литературе практически отсутствуют сведения о размерах магматического очага Кошелёвской магматогенной геотермальной системы.

По данным магнитометрической съёмки [1] в юго-западном сегменте Кошелёвского вулканического массива выявлен кольцевой разлом, не проявленный на дневной поверхности. Он скрыт под магматическими породами, возраст которых оценивается как средний – верхний плейстоцен [1]. Возраст и углы падения разлома не установлены. Радиус в проекции на дневную поверхность составляет около 4,5 км [1, 2]. На геолого-гидрогеологических разрезах [1] отмечается понижение внутренней части вулканического массива по отношению к разлому, что позволяет предположить образование этого нарушения в результате уменьшения объема магматического очага [8].

В работе [8] получено аналитическое решение задачи об образовании кольцевого тектонического разлома или кальдеры

на дневной поверхности над магматическим очагом сферической формы, находящимся в упругой пластичной среде. Модель предполагает, что магматический очаг уменьшается в объеме только из-за вытекания магмы из него. Приводящие к этому физические условия не рассматриваются. Уменьшение объема магматического очага вызывает возрастание механических напряжений во вмещающих горных породах. При достижении предела прочности горных пород происходит разрыв и может начать развиваться кольцевой тектонический разлом.

Отношение между радиусом кольцевого разлома и глубиной магматического очага (центра очага) выражается уравнением [8]:

$$r_f = \alpha d, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{\left(\frac{-m - \sqrt{m^2 - 4nl}}{2l}\right)},$$

$$l = 3(\varepsilon^3 p - 1)(1 - 2v + w(2 - v)), \quad m = 3\kappa - 5\vartheta,$$

$$n = (1 + 3v - w(3 + v))(\varepsilon^3(3p - 5q) - 3),$$

$$\kappa = (\varepsilon^3 p - 1)(2 + v - w(1 + 2v)),$$

$$\vartheta = \varepsilon^3 q(1 - 4v + w(4 - v)),$$

$$p = \frac{1 + v}{2(7 - 5v)}, \quad q = \frac{15(2 - v)}{4(7 - 5v)}, \quad w = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right),$$

где  $r_f$  — радиус кольцевого разлома;  $r$  — радиус магматического очага;  $d$  — глубина магматического очага (центра очага);  $v$  — коэффициент Пуассона вмещающих горных пород;  $\varphi$  — угол внутреннего трения вмещающих горных пород;  $\varepsilon = r/d$ .

Как показано в работе [7], угол падения кольцевого разлома  $\beta$  может быть выражен:

$$\beta = 90^\circ - \operatorname{arctg}(\alpha - \varepsilon). \quad (2)$$

На примере кальдеры Эйра (Япония), в которой находится активный вулканический массив Сакурадзима, в работе [8] показано хорошее согласие результатов расчета с другими имеющимися данными о магматическом очаге под кальдерой. Следует подчеркнуть, что модель описывает инициацию кольцевого разлома, а не дальнейшее развитие кальдеры. Поэтому модель

может быть применена для оценки магматического очага под Кошелевским вулканическим массивом.

Для Кошелевского вулканического массива принимается, что радиус кольцевого разлома  $r_f = 4500$  м [1, 2]; угол падения кольцевого разлома  $\beta = 60^\circ$ ; угол внутреннего трения вмещающих пород  $\varphi = 36^\circ$  [5]; коэффициент Пуассона вмещающих пород  $\nu = 0,25$  [6]. С помощью решения уравнения (1) совместно с уравнением (2) оценены радиус сферического магматического очага  $r = 2232$  м и глубина его центра  $d = 3927$  м. Угол падения  $\beta$  неизвестен и принят по аналогии с данными о кальдере Эйра [8]. Механические свойства горных пород приняты равными значениям для базальта.

Как указано выше, образование разлома инициируется уменьшением объема магматического очага, причиной которому согласно модели является вытекание магмы из него. Рассмотрим вопрос, действительно ли на Кошелевском вулканическом массиве могло иметь место уменьшение размеров магматического очага за счет извержения, достаточное для образования кольцевого разлома. Минимальное изменение объема магматического очага  $\Delta V$ , достаточное для образования данного кольцевого разлома, согласно модели [8] может быть установлено с помощью выражения (3):

$$\Delta V = \frac{\pi c_0 (\lambda + \mu) (\alpha^2 + 1)^{\frac{5}{2}}}{\mu [(3\lambda + 2\mu)(1 - w) + \alpha^2 (3\lambda w + 2\mu(1 + 2w))]} d^3 - \frac{\pi \eta S_0}{\zeta^2 + \zeta \eta \varepsilon^3} r^3, \quad (3)$$

$$\text{где } \eta = (S_1 + 5S_2) \frac{1}{(r_f/d)^2 + 1} q - (S_1 + 3S_2) p,$$

$$\zeta = S_1 + 3S_2, \quad S_0 = \frac{(\lambda + 2\mu) c_0 (\alpha^2 + 1)^{\frac{5}{2}}}{2\mu(1 - \nu)},$$

$$S_1 = (3\lambda + 2\mu)(1 - w)(\alpha^2 + 1), \quad S_2 = \alpha^2 (2w(\lambda + \mu) - \lambda),$$

$c_0$  — критерий разрушения Кулона для вмещающих пород;  $\lambda$  и  $\mu$  — параметры Ламе для вмещающих пород. Параметры Ламе

$\lambda$  и  $\mu$  связаны с модулем Юнга  $E$  и с коэффициентом Пуассона  $\nu$  соотношениями:  $\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$  и  $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ . Для базальта в расчете принимаются механические свойства  $E = 71,3$  ГПа и  $c_0 = 351,5$  МПа [6].

Расчет по выражению (3) показывает, что для образования кольцевого разлома достаточно уменьшения объема магматического очага на  $\Delta V = 1,3$  км<sup>3</sup> при объеме очага 26,2 км<sup>3</sup>. При этом радиус очага составляет  $r = 2232$  м. Такой малый объем мог быть извергнут даже при минимальном расходе  $W = 0,65 \cdot 10^{-3}$  км<sup>3</sup>/год [3] за 2000 лет. Таким образом, модель не противоречит ранее полученным данным о динамике вулканического процесса на Кошелевском вулканическом массиве [3], и в результате извержения магматический очаг мог уменьшиться достаточно для образования кольцевого разлома.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блукке П.П., Писарева М.В., Киндяков С.В. Проект детальных поисков глубоких зон Нижне-Кошелевского месторождения парогидротерм для обеспечения теплоносителем 1 очереди Кошелевской ГеоТЭС мощностью 94 – 100 МВт с предварительной разведкой его центральной части в 1989 – 1995 гг. Книга 1. Пос. Термальный Камчатской области. – 1989. – 193 с.
2. Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сережников А.И., Спиченкова М.В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. – 1976. – С.58–84.
3. Пашкевич Р.И., Мамаев Д.В. О расходе магмы Кошелевской геотермальной системы // ГИАБ №11, Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 228-233.
4. Пашкевич Р.И., Мамаев Д.В. Оценка эволюции размера магматического очага Кошелевской геотермальной системы по методу ак. С.А. Федотова // ГИАБ №11, Специальный выпуск №63 «Камчатка-2». – 2015. – С. 223–227.
5. Порцевский А.К., Катков Г.А. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива. М.: Московский государственный открытый университет. – 2004. – 120 с.
6. Справочник физических констант горных пород. Под редакцией Кларка С.П. мл. М: Мир. – 1969. – 542 с.
7. Kusumoto S., Takemura K. Controls on initial caldera geometry; quantitative estimation by numerical simulation // J. Sch. Mar. Sci. Tech. Tokai Univ. – 2008. – №6. – P.15–26.
8. Kusumoto S., Gudmundsson A. Magma-chamber volume changes associated with ring-fault initiation using a finite-sphere model: Application to the Aira caldera, Japan // Tectonophysics. – 2009. – Vol.471. – №1-2. – P.58–66. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

---

Мамаев Дмитрий Викторович – научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



---

UDC 551.2.01+539.375.5

## ESTIMATION THE SIZE OF MAGMA CHAMBER OF THE KOSHELEV GEOTHERMAL SYSTEM BY TECTONIC RING FAULT

Mamaev D.V., Research Scientist, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

---

*The size of magma chamber of the Koshelev geothermal system was estimated on the basis of tectonic ring fault data. Mechanical elastic-plastic model is used to quantify size of magma chamber which is able to establish mechanical stress sufficient for tectonic ring fault initiation.*

*Key words: peripheral magma chamber, ring fault, mechanical model, elastic-plastic model, Koshelev magmatogenic geothermal system.*

### REFERENCES

1. Blukke P.P., Pisareva M.V., Kindjakov S.V. *Proekt detal'nykh poiskov glubokikh zon Nizhne-Koshelevskogo mestorozhdenija parogidroterm dlja obespechenija teplositelem 1 ocheredi Koshelevskoj GeoTEhS moshhnost'ju 94 – 100 MVt s predvaritel'noj razvedkoj ego central'noj chasti v 1989 – 1995 gg* (Kondakov Project detailed searches deep zones of the lower-Koshelevsky deposits parameters to ensure coolant 1 queue Koshelevsky Geothermal power station with a capacity of 94 – 100 MW with a preliminary exploration of its Central part in 1989 – 1995). Kniga 1. Pos. Termal'nyj Kamchatskoj oblasti. 1989. 193 p.
2. Vakin E.A., Dekusar Z.B., Serezhnikov A.I., Spichenkova M.V. *Gidrotermal'nye sistemy i termal'nye polja Kamchatki* (Spichenkova thermal springs Koshelevsky volcanic massif). Vladivostok. 1976. pp.58–84.
3. Pashkevich R.I., Mamaev D.V. *About flow rate of magma at the Koshelev geothermal system* (The flow of magma Koshelevsky geothermal system) // GIAB No 11, «Kamchatka-2» (special issue). 2015, pp. 228-233.
4. Pashkevich R.I., Mamaev D.V. *Estimation the size evolution of magma chamber of the Koshelev geothermal system by method of academician S.A. Fedotov* (Assessment of the evolution of the size of the magma chamber Koshelevsky geothermal system by the method of A.K. S. A. Fedotov) // GIAB No 11, «Kamchatka-2» (special issue). 2015. pp. 223–227.
5. Porcevskij A.K., Katkov G.A. *Osnovy fiziki gornykh porod, geomekhaniki i upravlenija sostojaniem massiva* (Fundamentals of rock physics, geomechanics, and state management of the array). Moscow: Moskovskij gosudarstvennyj otkrytyj universitet. 2004. 120 p.
6. *Spravochnik fizicheskikh konstant gornykh porod* (Handbook of physical constants of rocks). Edited Clark S.P. Jr. Moscow: Mir. 1969. 542 p.