

Параметрическая модель образования и эволюции мантийно-корового мигранта

© *В. И. Васильев, Е. В. Васильева, Н. С. Жатнуев, Г. Д. Санжиев*
 Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия. E-mail: geovladi@yandex.ru

Разработана платформа для параметрического моделирования образования и эволюции мантийно-корового мигранта — программный продукт Vladi Overpressure 4.0. Учтены три варианта формы глубинной камеры, три варианта формы мигранта и пять уравнений расчёта скорости подъёма.

Ключевые слова: мантийно-коровый мигрант; избыточное давление; параметрическое моделирование.

The parametric model of the origin and evolution of the mantle-crust migrant

Vasiliev V. I., Vasilieva E. V., Zhatnuev N. S., Sanzhiev G. D.
 Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia. E-mail: geovladi@yandex.ru

The platform for parametric modeling of the formation and evolution of the mantle-crust migrant has been created as software Vladi Overpressure 4.0. Three variants of the depth camera shape, three variants of the migrant shape and five equations for the rate of ascent calculation have been considered.

Keywords: mantle-crust migrant; overpressure; parametric modeling.

Развитие до уровня теории гипотезы подъёма из мантии мигрантов — полостей, заполненных флюидом и/или расплавом с пониженной плотностью [6, 7], требует расчётов зависимостей между параметрами изучаемого процесса. Эта задача решается численным параметрическим моделированием — созданием компьютерной модели [3] с возможностью изменения входных параметров и получения результатов, сходных с наблюдаемыми в природе.

Концептуальная модель. На глубине H под горизонтальным барьером с прочностью S за счёт привноса глубинного вещества формируется камера с пониженной плотностью D относительно плотности вмещающей среды R . В процессе формирования мощность камеры L_c растёт. Разность плотностей ($R - D$) приводит к тому, что по достижению камерой критической мощности L_{cr} избыточное давление в камере сравнивается с прочностью вышележащего барьера; в последнем происходит гидроразрыв, и вещество камеры заполняет образовавшуюся вертикальную полость. Образование мигранта контролируется следующим условием:

$$\int_0^{H+L_c} gR(H+L_c)d(H+L_c) - \int_0^H gRHdH - \int_H^{H+L_c} gDL_c dL_c \geq S, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения. В выражении (1) первые два члена в левой части — это литостатические давления внешней среды в подошве камеры и на прочностном барьере соответственно; третий член — гидростатическое давление в подошве камеры. Вся левая часть представляет собой избыточное давление вещества в камере. После образования мигранта высоты L существует три варианта развития событий в зависимости от объёма камеры:

1) объёма камеры достаточно для формирования мигранта с глубины H до поверхности ($L \approx H$) — происходит излияние вещества мигранта на дневную поверхность (примером могут служить базальтовые траппы);

2) объём камеры формирует мигрант, высота которого значительно превышает глубину залегания прочностного барьера ($L > H$), — происходит выброс (эксплозия) вещества мигранта (пример — кимберлитовые «трубки взрыва»);

3) высота сформированного мигранта значительно меньше глубины залегания прочностного барьера ($L < H$) — начинается движение мигранта вверх по Н.С. Жатнуеву [7].

Остановимся на третьем случае. Очевидно, что движение мигранта вверх возможно только при выполнении условия (1), иначе мигрант останавливается и накапливается под очередным прочностным барьером аналогично исходной камере. Приведём ряд теоретических и полуэмпирических формул для расчёта скорости движения мигранта (v — скорость, F — сила сопротивления среды, C_f — коэффициент формы мигранта, ρ_{cp} — плотность среды, $\rho_{миг}$ — плотность мигранта, $\Delta\rho$ — разность плотностей среды и мигранта, V — объём мигранта, S — площадь поверхности мигранта, d — эффективный диаметр мигранта, m — масса мигранта, μ — динамическая вязкость среды, η — пластическая вязкость среды, σ — текучесть среды). Первую аналитическую закономерность вывел И. Ньютон как

закон сопротивления среды движению тела [10]:

$$v = \sqrt{\frac{2F}{C_f \rho_{cp}}}, \quad (2)$$

Мы можем использовать это уравнение, так как произведение силы сопротивления среды и площади поперечного сечения мигранта в нашем случае даёт прочность среды, которая по условию (1) не больше избыточного давления мигранта. П. фон Риттингер [15] развил механистические идеи Ньютона:

$$v = \sqrt{\frac{2V(\rho_{cp} - \rho_{миг})g}{C_f S \rho_{cp}}}, \quad (3)$$

Уравнение Дж. Г. Стокса [17] явилось одним из первых аналитических описаний процесса с учётом вязкости среды:

$$v = \frac{8}{9} g \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{\rho_{cp} - \rho_{миг}}{\mu}, \quad (4)$$

П.В. Лященко и Д.Н. Аллен более детально описывают движение мигранта [9, 13]:

$$v = 0.294 \frac{d^{1.14} (\rho_{cp} - \rho_{миг})^{0.715}}{\mu^{0.43} \rho_{cp}^{0.286}}, \quad d = \sqrt{\frac{6m}{\pi \rho_{миг}}}, \quad (5)$$

Наконец, Ф. Дж. Спера приводит следующее уравнение скорости [16]:

$$v = \frac{2 \Delta \rho g}{9 \eta} \left(\frac{d}{2} - \frac{15\sigma}{4\Delta \rho g} \right)^2, \quad (6)$$

Реализация модели выполнена на языке C++ в виде платформы моделирования — программного продукта *Vladi Overpressure 4.0* (32-битное приложение для Microsoft Windows), позволяющее задавать входные параметры, функции и ограничения и получать на выходе численные и визуальные (2D) результаты. Модель *Vladi Overpressure 4.0* формируется в несколько этапов. Сначала устанавливается глубина исходного прочностного барьера H , под которым накапливается вещество глубинной камеры. Затем последовательно задаются вертикальные профили плотности R , прочности S , температуры T , динамической вязкости W и предела текучести среды F и, наконец, плотности мигранта D . Профили задаются от поверхности до глубины H с шагом 1 км либо вручную, либо загрузкой текстовых файлов. Следом выбирается форма камеры из трёх вариантов: полулинза, полуэллипсоид вращения или прямоугольный параллелепипед. Для контроля формы камеры задаётся коэффициент экструзии K_e , представляющий собой отношение мощности камеры либо к радиусу полулинзы (L_c/R_c), либо к горизонтальной полуоси эллипсоида (L_c/a), либо к полуширине параллелепипеда ($2L_c/b$) (рис. 1).

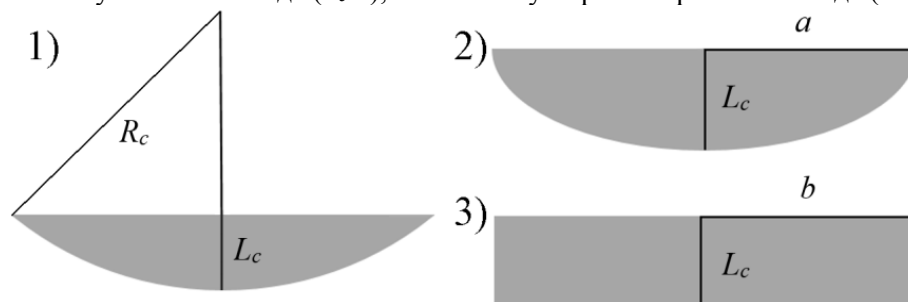


Рис. 1. Три варианта формы глубинной камеры, предусмотренные во *Vladi Overpressure 4.0*. Показаны проекции форм на вертикальную плоскость. В плане: 1), 2) — окружности, 3) — квадрат.

Далее задаётся скорость поступления глубинного вещества в единицах массы в момент времени и производится расчёт роста объёма камеры до критической мощности L_{cr} . Процесс визуализирован; изображения могут быть сохранены в формате векторной графики. По достижении критической мощности формируется мигрант одной из трёх возможных форм: вертикальный цилиндр заданного радиуса основания, эллиптическая полулинза заданной толщины с малой осью эллипса, равной размеру камеры в плане, или вертикальная прямоугольная призма заданной толщины. Затем начинается моделирование подъёма мигранта согласно одному из уравнений (2–6). Процесс также визуализиро-

ван с возможностью сохранения изображений. В табл. 1 приведены расчётные скорости подъёма мигранта полуэллиптической-линзовидной формы с исходной высотой 50 км от глубины 600 км при следующих параметрах: профиль плотности внешней среды — по В. Ю. Бурмину [2], температуры — по Р. Дж. Уилли [11], прочности среды — по С. Н. Иванову [8], вязкости — по В. В. Гордиенко [5], предела текучести — по Т. Г. Фараджеву [12], плотности мигранта — по Э. Отани и Д. Жао [14].

Таблица

Расчётные скорости подъёма мигранта по уравнениям (2–6).

| Уравнение скорости | Ньютона (2) | Риттингера (3) | Стокса (4) | Лященко-Аллена (5) | Спера (6) |
|-------------------------|---------------|----------------|------------|--------------------|------------|
| v исходная, м/сут | 1413.81666577 | 97.54047242 | 0.00000092 | 0.00964363 | 0.00000370 |
| v максимальная, м/сут | 5158.63499497 | 502.33838192 | 0.13937712 | 2.17102233 | 0.55750848 |

Очевидно, что выбор уравнения для моделирования в каждом конкретном случае будет своим. Например, согласно оценке [1] для Большого трещинного Толбачинского извержения, время подъёма порции флюида с глубины ~30 км составило около 9 суток, что по порядку соответствует значениям, получаемым по уравнению Ньютона (2). Тектонофизические эксперименты с желатином и воздушно-этаноловой смесью [4], проведённые авторами ранее, показали скорости, близкие к расчётным значениям по уравнениям (3–6).

Работа выполнена в рамках бюджетной темы IX.136.1.2. Исследование факторов, определяющих закономерности развития сейсмического процесса и сейсмическую опасность Прибайкалья.

Литература

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 638 с.
2. Бурмин В. Ю. Распределение плотности и упругих параметров в Земле // Физика Земли. 2006. №7. С. 76–88.
3. Комплексное компьютерное моделирование геологических объектов на примере разреза зоны субдукции / В. И. Васильев [и др.] // Геоинформатика. 2009. № 3. С. 15–30.
4. Тектонофизическое исследование динамики флюидозаполненных полостей в твердой пластичной среде / Васильева Е. В. [и др.] // тезисы докл. III Всерос. конф. (Москва, 8–12 октября 2012). М.: ИФЗ РАН, 2012. Т. 1. С. 265–268.
5. Гордиенко В. В. О вязкости вещества тектоносферы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2017. № 1. С. 45–57.
6. Жатнуев Н. С. Динамика глубинных магм // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 787–791.
7. Жатнуев Н. С. Трещинные флюидные системы в зоне пластических деформаций // ДАН. 2005. Т. 404. № 3. С. 380–384.
8. Иванов С. Н. О реологических моделях земной коры. Екатеринбург, 1998. 40 с.
9. Лященко П. В. Гравитационные методы обогащения. М.: Гостехиздат, 1940. 359 с.
10. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М.: Наука, 1989. 688 с.
11. Уилли Р. Петрогенезис и физика Земли // Эволюция изв. пород. М.: Мир, 1983. С. 468–503.
12. Фараджев Т. Г., Фаталиев М. Д. Горные породы Азербайджана и пути их эффективного разрушения. Баку: Азернешр, 1965. 137 с.
13. Allen D. N., Southwell R. V. Relaxation methods applied to determine the motion, in two dimensions, of a viscous fluid past a fixed cylinder // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1955. V. 8. P. 129–145.
14. Ohtani E., Zhao D. The role of water in the deep upper mantle and transition zone // Russian Geology and Geophysics. 2009. V. 50. № 12. P. 1073–1078.
15. Rittinger P. R. Lehrbuch der Aufbereitungskunde. Berlin: Verlag von Ernst&Korn, 1867. 596 p.
16. Spera F. J. Carbon dioxide in petrogenesis // Contrib. Mineral. Petrol. 1984. V. 88. P. 217–232.
17. Stokes G. G. Mathematical and physical papers. Cambridge: University Press, 1880. V. 1. 328 p.

Васильев Владимир Игоревич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ.