

Southeastern Alaska. Reston: United States Geological Survey (USGS), Professional Paper. 1995. 47 p.

16. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D. et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International mineralogical association, commission on new minerals and mineral names // Canadian Mineralogist. 1997. V. 35. P. 219-246.

17. Le Bas M.J. IUGS Reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks // Journal of Petrology. 2000. V. 41. № 10. P. 1467-1470.

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ДИАПИРОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА-КОРА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Гунин В.И.**

*Центр моделирования геосистем «МоГеос», Улан-Удэ, Россия  
e-mail: vigunin@list.ru.*

## ESTIMATE OF DIAPER FORMATION CONDITIONS IN LITHOSPHERE AND IN THE EARTH'S CRUST BASED ON NUMERICAL EXPERIMENT

**Gunin V.I.**

*Centre of Geosystem Modeling (MoGeos), Ulan-Ude, Russia  
e-mail: vigunin@list.ru.*

The buoyancy of less dense (light) rocks through more dense (heavy) ones in the field of gravity is called diapirism. The paper considers the effect of the melt lens with various viscosity, density and fluid concentration on formation of diapers in the Earth's crust and lithosphere based on the results of the numerical experiment.

### ВВЕДЕНИЕ

Всплывание менее плотных (легких) пород через более плотные (тяжелые), в поле силы тяжести, называется диапиризмом. К диапирам относятся различные восходящие куполообразные структуры, в том числе гранитогнейсовые купола и гранитоидные батолиты. Для формирования диапира необходим легкий питающий слой, перекрытый более тяжелыми слоями пород, и наличие неоднородности (неравномерность толщины питающего или перекрывающего слоя) или нарушения сплошности [2]. Питающим слоем может являться линза расплава, сформированная нижнемантийным плюмом в подошве высоковязкой литосферы, а неоднородностью вогнутость этой подошвы. В работе, на основе результатов численного эксперимента, рассмотрено влияние линзы расплава с различной вязкостью, плотностью и концентрацией флюида на формирование диапиров в земной коре и литосфере.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СХЕМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

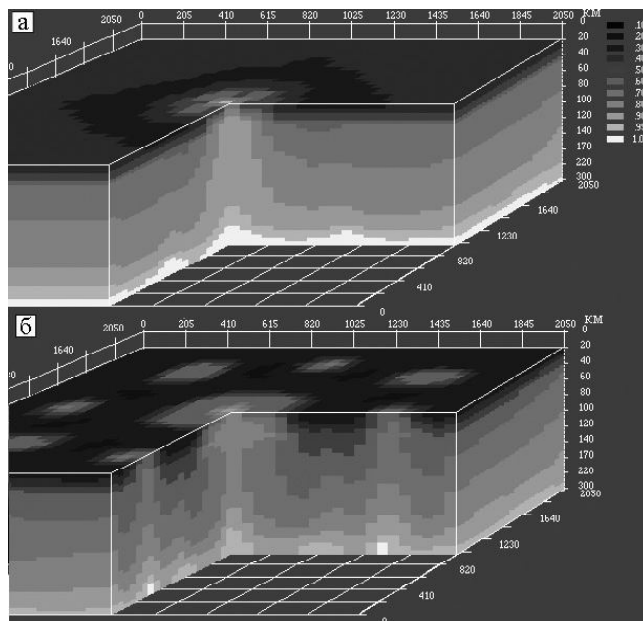
Для решения этой задачи проведен численный эксперимент на основе сопряженной трехмерной математической модели теплопереноса в вязких средах, разработанной автором, которая в векторном виде в терминах функции тока, температуры и концентрации выглядит так:

$$\Delta\psi = k\nabla\rho, \mathbf{V} = \text{rot}\psi, dT/dt = \delta\Delta T + M, dC_i/dt = \lambda\Delta C_i + N_i, \rho = \rho(T, C), \mu = \mu(T, C) \quad (1)$$

где,  $\psi$  – векторная функция тока,  $\rho$  – плотность среды,  $\mathbf{V}$  – вектор скорости конвекции среды,  $T$  – температура среды,  $C_{0,1}$  – концентрация мантийного вещества и «легкой» химической добавки;  $M$  – источник-сток тепла;  $N_{0,1}$  – источник-сток мантийного вещества и легкой химической добавки;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $k, \delta, \lambda$  – коэффициенты текучести, температуропроводности, диффузии;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\nabla$  – оператор Гамильтона («набла»);  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y +$

$w\partial/\partial z$  – оператор полной производной,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , – проекции вектора скорости конвекции на координатные оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . На основе конечноразностных схем, разработан пакет программ на языке Fortran для персональных компьютеров, позволяющий решать широкий круг задач тепломассопереноса в вязких средах. Для расчета взята трехмерная область с декартовой системой координат в виде параллелепипеда размером  $2000 \times 2000$ , высотой 250 км и разбита сеткой с шагом от 5 до 20 км на  $41 \times 41 \times 40$  объемных ячеек. Расчеты проводились на 40-80 млн. лет с шагом по времени 10000 лет. Предполагалось, что вещество литосферы и коры, при характерных для этого процесса временах и нагрузках, ведет себя подобно ньютоновской несжимаемой, вязкой жидкости. В начальных условиях задавалось распределение температуры и плотности, вязкость в литосфере принималась  $10^{23}$  П·с, для верхней и нижней коры  $10^{24}$ - $10^{22}$  П·с, коэффициенты температуропроводности и диффузии для всей области были одинаковые  $\delta = 1 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек,  $\lambda = 1 \times 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/сек, а коэффициент температурного расширения  $\alpha = 5 \times 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup>.

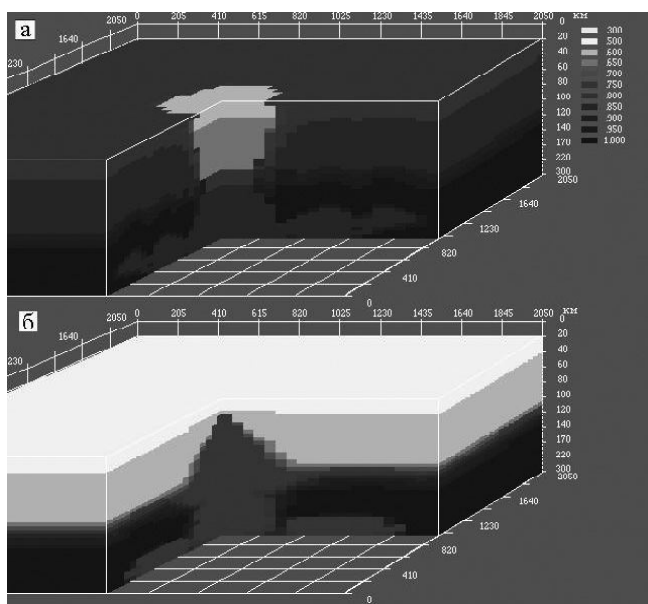
На всех границах области задавалось условие не протекания, верхней и нижней границах постоянные значения температуры и плотности, а на боковых их распределение. Плотность определялась через концентрацию литосферного и корового вещества. Изменение плотности с глубиной задавалось по данным из работы [1], с учетом скачков плотности на границах фазовых переходов пород, а ее значения составляли в верхней части расчетной области 2.6 г/см<sup>3</sup>, в нижней 3.4 г/см<sup>3</sup>. Распределение давления подчинялось закону гидростатики  $p_0(z)$ ,  $z$ -вертикальная координата и определялось условием  $\nabla p_0 = -\rho_0 g$ . В нижней части литосферы задавалась линза расплавленного мантийного вещества диаметром 1600, мощностью 100 км, с температурой  $T_0 = 2000$ °C и концентрацией флюида  $C_1 = 2$ -6% массовых [2]. При этом максимальное отношение между плотностью среды и плотностью расплава (плавучесть) составляло  $\Delta\rho = 0.2, 0.4$  г/см<sup>3</sup>. Считалось, что в точке с концентрацией флюида  $C_1 > 1\%$  вещество среды приобретает свойства расплава – пониженную плотность и вязкость. Отклонение плотности (плавучесть) определялось в приближении Буссинеска  $\rho = \rho_0(1 - \alpha T - \beta C_1)$ , где  $\beta$ -концентрационный коэффициент объемного расширения,  $C_1$ -концентрация флюида,  $\rho_0$ - плотность среды на определенной глубине. Вязкость зависела от температуры и концентрации флюида. Эта зависимость выглядит так:  $\mu = \mu_0 \times 10^{-A}$ , где  $\mu$  – новое значение вязкости,  $\mu_0$  – исходное значение вязкости,  $A = \max(|A_T|, A_C)$ ,  $A_T = \text{TANH}(\Delta T/1000) \times B$ ,  $A_C = \text{TANH}(C_1/10) \times B$ ,  $\Delta T$  – перепад температуры в точке относительно исходной (заданной),  $C_1$  – концентрация флюида в точке, коэффициент  $B \geq 1$  характеризует степень изменения параметра «А».



**Рис. 1. Распределение температуры после подъема диапира при различной вязкости окружающих пород. а – вязкость окружающих пород равна заданному в исходных данных,  $T_{max} = 1630$ °C; б – вязкость окружающих пород в пять раз меньше,  $T_{max} = 1690$ °C.**

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов показали. На контакте линзы расплава с областью вогнутости литосферы за счет прогрева литосферы и проникновения флюида формируется восходящий конвективный поток вихревой структуры. Со временем менее интенсивные потоки формируются по всему контакту линзы с литосферой. Поток образует куполообразную структуру вещества с пониженной плотностью, которая начинает всплывать в верхнюю часть рассматриваемой области со скоростью 2-3 см/год, максимальная скорость может достигать 6-8 см/год. За счет понижен-



**Рис. 2. Распределение плотности вещества среды после подъема диапира при относительно высокой вязкости диапира (1-3 порядка ниже вязкости окружающих пород).**

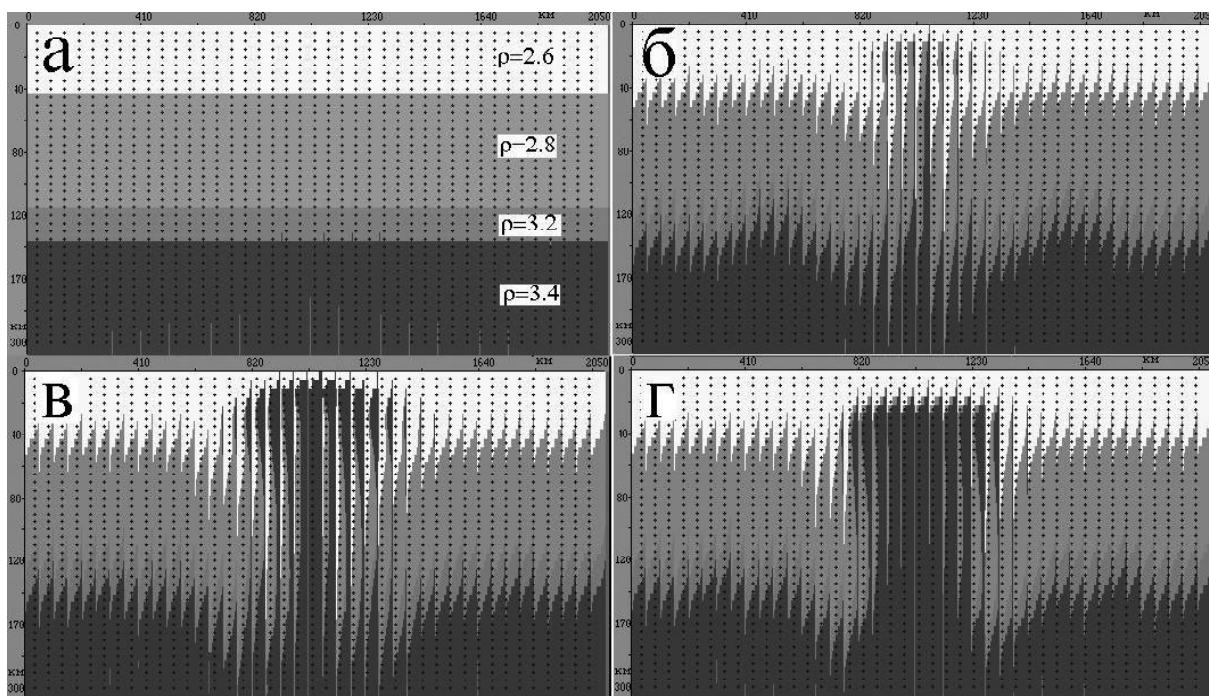
**а** – вещество диапира претерпело фазовые переходы; **б** – вещество диапира не претерпело фазовые переходы.

Если породы диапира не претерпевают фазового перехода на границах скачков плотности, то диапир поднимается только до уровня, на котором плотность его вещества становится выше плотности вмещающих пород и затем начинает оседать (растекаться).

Существенное влияние на формирование и подъем диапира оказывает вязкость. Если вещество диапира претерпевает фазовый переход, то относительно высокая его вязкость (на 1-2 порядка ниже вязкости окружающих пород) замедляет его подъем, но при этом диапир имеет компактную (аккуратную) форму с равномерным распределением температуры и вещества. Если вещество диапира не претерпевает фазовый переход, то его оседание происходит с небольшой скоростью, при медленном перемешивании с окружающими породами, причем, чем выше вязкость вещества диапира тем меньше скорость оседания и перемешивания (рис 2). Низкая вязкость пород диапира (4 и более порядков ниже окружающих пород) ускоряет его подъем, а диапир принимает форму струи с повышением значений температуры и концентрации флюида в центральной части. Максимальная температура вещества диапира и концентрация флюида при уменьшении вязкости снижается за счет более высокой скорости конвекции. При этой (низкой) вязкости вещества диапира, которое при подъеме не претерпевает фазового перехода, скорость растекания и перемешивания увеличивается. Это способствует относительно быстрому изменению формы диапира из куполообразной в линзовидную.

При подъеме диапира происходит смешение его вещества с окружающими породами (ассимиляция). Если плотность пород с глубиной с учетом скачков на границах фазовых переходов, выделить разными цветами, то смешение будет выглядеть так (рис. 3). Интенсивность смешения без фазового перехода мало зависит от вязкости. Максимальная его величина концентрируется на периферии диапира. При оседании диапира на контакте с его головной частью идет затягивание верхнего более легкого слоя пород вниз. Чем ниже вязкость, тем сильнее расплывается диапир и глубже затягивает легкие породы. Если при подъеме диапира происходит фазовый переход, то процесс смешения идет тем интенсивней, чем меньше вязкость его вещества. При высокой вязкости диапир движется медленнее, раздвигая окружающие его породы, при незначительной их ассимиляции. Более интенсивное затягивание всех слоев окружающих пород идет на периферии диапира.

ной плотности и вязкости, формируется конвективный поток торообразного вида с закручиванием потока в горизонтальной плоскости во фронтальной части диапира против часовой и в тыловой по часовой стрелке. Конвективный поток захватывает окружающий массив, что способствует его частичному плавлению, за счет прогрева и внедрения флюида, и перемешиванию с веществом линзы. При определенных условиях (сравнительно низкой вязкости пород литосферы) может сформироваться диапир с несколькими симметрично расположенными восходящими куполообразными структурами (рис. 1). Если при подъеме диапира составляющие его породы (расплав) претерпевают фазовый переход на границах скачков плотности вмещающих пород, то его плавучесть (исходный перепад плотности) сохраняется, и он может всплыть до уровня верхней коры. Дальнейшему его подъему будет препятствовать повышенная вязкость пород верхней коры, но при наличие в ней ослабленных зон (разломов) он может выйти на поверхность



**Рис. 3.** Смещение вещества диапира, при условии фазового перехода и различной его вязкости, с окружающими породами.

**а** – начальное распределение пород по плотности, вязкость пород диапира ниже вязкости окружающих пород; **б** – на 5 порядков в  $10^5$  раз; **в** – на 3 порядка в  $10^3$  раз; **г** – на 1 порядок в 10 раз.

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов показал следующее. При наличии в вогнутой подошве литосферы линзы расплава с повышенной температурой и содержащей флюид может возникнуть вихревой поток, формирующий восходящую куполообразную структуру – диапир. Если породы (расплавы) диапира на границах скачков плотности вмещающих пород претерпевают фазовый переход, то при наличии в верхней коре разломов он может выйти на поверхность земли. Если фазовый переход не происходит, диапир поднимается только до уровня на котором плотность его вещества становится выше плотности вмещающих пород и затем начинает оседать (растекаться). Высокая вязкость вещества диапира (на 1-3 порядка ниже вязкости окружающих пород) замедляет его подъем при фазовом переходе вещества и его оседание (растекание) без фазового перехода. Относительно низкая вязкость его вещества (на 4 и более порядков ниже окружающих пород) ускоряет подъем в первом случае и оседание диапира во втором. При подъеме диапира происходит смещение (ассимиляция) его вещества с окружающими породами. Этот процесс идет более интенсивно при условии фазового перехода вещества диапира и его низкой вязкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурмин В.Ю. Распределение плотности и упругих параметров в земле // Физика земли. 2006. № 7. С. 76-88.
2. Гунин В.И. Оценка условий формирования ультрабазит-базитовых расплавов в районе подъема нижнемантийного плюма на основе численного эксперимента // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей. Мат-лы международной конференции. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007.
3. Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. Пер. с англ. М.: Недра, 1985. 399 с.