

## О СОСТОЯНИИ ФЛЮИДА В НИЖНЕЙ КОРЕ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ СЕВ. КАМЧАТКИ

<sup>1,2</sup>Симакин А.Г.

<sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка

<sup>2</sup>Институт Физики Земли (ИФЗ) РАН, Москва, [simakin@ifz.ru](mailto:simakin@ifz.ru)

Выделяемый при дегидратации океанической плиты флюид аккумулируется в виде включений в минералах, пленках на границах зерен и в трещинном пространстве. При пересечении магматической дайкой глубинного резервуара давление флюида растёт, происходит гидроразрыв пород коллектора на значительном расстоянии от контакта. Подвижный флюид впрыскивается в магму, изменяя ее состав и увеличивая скорость течения к поверхности. Тектонические и связанные с субдукцией и оледенением механические стрессы также могут вызвать гидроразрыв. Явления структурного перехода от изолированных или (и) изометричных включений флюида к связанной сети трещин и вызванное этим смешение магмы и флюида можно проследить по геофизическим и геохимическим данным.

Рассмотрена простая модель, иллюстрирующая влияние структуры пористого пространства на  $V_p$  и  $V_p/V_s$ . При равной общей пористости породы механические свойства пород и скорости сейсмических волн зависят от ее структуры. В изотропной среде скорости волн сжатия ( $V_p$ ) и сдвига ( $V_s$ ) пропорциональны коэффициентам Ламе:

$$V_s = (\mu/\rho)^{1/2}, V_p = (2\mu + \lambda)^{1/2} = (K(1 + 4/3\gamma)/\rho)^{1/2} \quad (1)$$

где коэффициент  $\gamma = \mu/K = 3(1-2\nu)/2(1+\nu)$ . Здесь предполагается, что поры заполнены (флюидом, жидкостью, газом, расплавом). В теории пороупругости параметры флюидо-насыщенной породы ( $K_u, \nu_u$ ) выражаются через параметры сухого каркаса, слагающих его фаз и флюида. При некоторых допущениях [Cheng, 2016]:

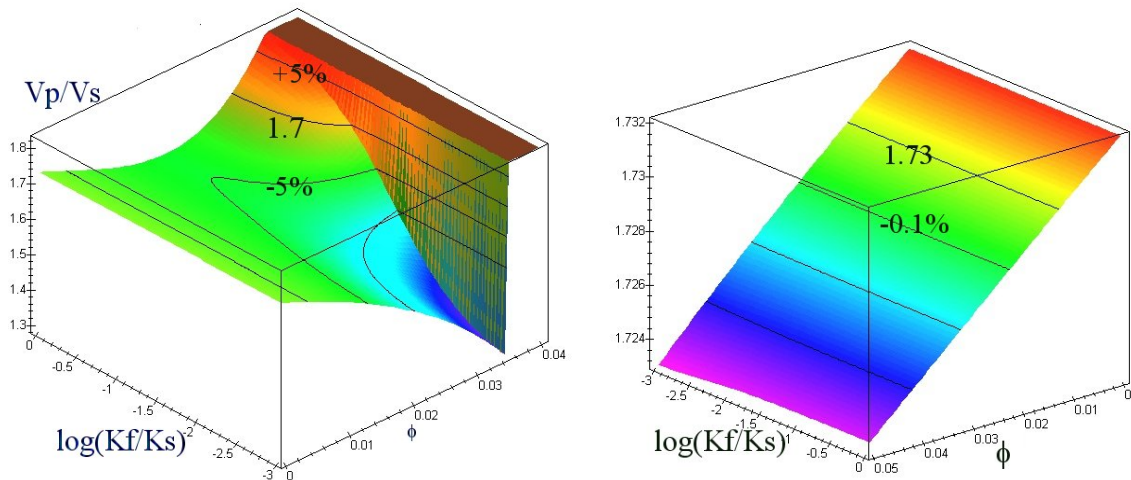
$$K_u = K(1 + \alpha^2 K_f / ((1-\alpha)/( \alpha - \phi) K_f + \phi K)), \nu_u = (3K_u - 2G)/2(3K_u + G) \quad (2)$$

где константа Биота  $\alpha = 1 - K/K_s$  изменяется от примерно 0.1 до 1. В модели изотропной среды с полостями с формой сплюснутого сфероида ( $r_a > r_b = r_c$ ) с переменным аспектным отношением ( $\gamma = r_b/r_a$ ) рассчитана зависимость упругих свойств каркаса от аспектного отношения  $\gamma$  и пористости (например, [Takei, 2002]). С хорошей точностью механические модули описываются линейной аппроксимацией:

$$K = K_s(1 - \Lambda_1(\gamma)\phi), G = G_s(1 - \Lambda_2(\gamma)\phi) \quad (3)$$

Коэффициенты пропорциональности сильно зависят от аспектного отношения: значения, рассчитанные при коэффициенте Пуассона твердой фазы  $\nu = 0.25$ , при  $\gamma = 1$  (флюидные включения в минералах или жидкость в тройных стыках зерен при малом угле смачивания) равны  $\Lambda_1 = 2.20$   $\Lambda_2 = 1.95$ , а при  $\gamma = 0.01$  (трещина, заполненная

флюидом)  $\Lambda_1=325.3$   $\Lambda_2=59.1$ . Уравнения (1-3) позволяют в рамках упрощенной модели оценить величину вариаций скоростей сейсмических волн при переходе от текстуры изометричных включений к системе трещин. Результаты расчетов отношения  $V_p/V_s$  приведены на Рис.1. Видно, что величина отношения зависит от пористости, отношения объемных модулей жидкости (флюида) и породы, а также от аспектного отношения  $\gamma$ .



**Рис.1** Рассчитанное отношение  $V_p/V_s$  как функция пористости ( $\phi$ ) и  $z=\log(K_f/K_s)$  при аспектных отношениях, ограничивающих диапазон характерных для осадочных пород значений а) трещины:  $\gamma=0.04$   $\Lambda_1=25.60$ ,  $\Lambda_2=9.96$  (пористость ограничена условием  $K/K_s > 0.1$ ) б) включения:  $\gamma=0.63$   $\Lambda_1=2.32$ ,  $\Lambda_2=1.98$ .

При  $\gamma=0.04$  ( $\nu=0.25$ ) вариации отношения  $V_p/V_s$  достигают  $\pm 5-10\%$  от среднего. Наиболее значительные отклонения наблюдаются при приближении к порогу разрушения:  $K/K_s \approx 0.1$ . Важно, что при большой сжимаемости (флюид)  $K_f/K_s \leq 100$  аномалия отрицательная, а при  $K_f/K_s \approx 1$  (расплав) положительная. При аспектном отношении 0.63 в физически разумном интервале пористостей до 0.05 вариации  $V_p/V_s$  не превышают 0.3-0.4% и слабо зависят от сжимаемости жидкости. Полученные в рамках специфической геометрической модели результаты качественно иллюстрируют возможные эффекты. Численные значения в природе могут отличаться от расчетных, в частности потому, что ориентировка включений-трещин как правило упорядочена, а механические свойства анизотропны.

Полученные данные позволяют уточнить интерпретацию результатов сейсмической томографии на С.Камчатке, полученных [Koulakov et al.\(2013\)](#). В земной коре под Ключевской группой вулканов (С. Камчатка) согласно данным томографии за 2001-2008 годы происходили значительные изменения скоростей сейсмических волн на 4-5% в масштабе времени несколько месяцев – год. Эти изменения затрагивали значительные области объемом в сотни км<sup>3</sup>.

Авторы объяснили эти изменения перетеканием огромных объемов частичного расплава за короткое время, что представляется маловероятным. Структурная модель дает альтернативный механизм быстрого изменения физических свойств пород за счет изменения структурного состояния жидкой фазы (флюида, расплава). Большая аномалия повышенных значений  $V_p$  и  $V_p/V_s$  на глубинах свыше примерно 25 км (давление 7-8 кбар) приписывается области частичного расплава. В 2001 и 2007 годах эта аномалия сокращалась в размерах в несколько раз, а отношение  $V_p/V_s$  падало в среднем с 1.81 до 1.75 (на 4%). Поскольку эффективное давление на этой глубине равно 0, незначительный рост давления расплава способен вызвать трескание каркаса. Вблизи порога устойчивости и содержания расплава около 3 об.% возможен рост отношения  $V_p/V_s$  примерно на наблюдаемую величину, при переходе от аспектного отношения 0.6 к 0.04. Аналогичные структурные превращения протекали и во флюидном резервуаре над очагом частичного расплава, характеризуемом низкими значениями  $V_p/V_s$ .  
*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 19-17-00241).*

## Литература

1. Cheng A. H.-D. Poroelasticity. Springer. 2016. 877 P.
2. Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // J. Volcanol Geotherm. Res. 2013. V. 263, P. 75-91.
3. Takei Y. Effect of pore geometry on  $V_p/V_s$ : From equilibrium geometry to crack// J. Geoph. Res. 2002. V. 107:B2. 2043.

## ON THE STATE OF FLUID IN THE LOW CRUST OF THE SUBDUCTION ZONE OF N. KAMCHATKA

<sup>1,2</sup>**Simakin A.G.**

<sup>1</sup>Institute of experimental mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka

<sup>2</sup>Institute of Earth Physics (IFZ) RAS, Moscow, [simakin@ifz.ru](mailto:simakin@ifz.ru)

Rapid variations in the time scale months-year in seismic parameters ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) under Klyuchavskaya group of volcanoes (Koulakov et al., 2013) can be attributed to a change in the structural state of the fluids (supercritical fluid and melt) in the lower crust, rather than huge mass fluxes that cause large variations in porosity. A simple poroelastic model demonstrates that fracturing of a fluid reservoir with isometric pores with low connectivity leads to a change (an increase for a melt and a decrease for a fluid with high compressibility) in  $V_p/V_s$  by 5-10% at a porosity up to 3 vol.%. Due to the high solubility of rock, cracks will quickly heal, thus restoring the texture disturbed by tectonic stresses and magma intrusion.