

## В.Н. Сеначин

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ПЛОТНОСТИ В ЛИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО РАСЧЕТАМ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАНТИИ

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г.Южно-Сахалинск*

За последние полвека интенсивных геофизических исследований на суше и на море накоплен материал, позволяющий определить основные закономерности распределения мощности, скорости сейсмических волн и плотности в слоях земной коры нашей планеты. На основе этого материала американским геофизикам удалось построить модель земной коры, охватывающую весь земной шар, включая регионы, где прямых геофизических данных о строении коры очень мало или они вообще отсутствуют – такие, например, как Арктика и Антарктика.

Первая такая модель, получившая название CRUST 5.1, была разработана около 10 лет назад (1). Модель CRUST 5.1, представляющая данные по сетке с осреднением  $5^\circ \times 5^\circ$ , содержит информацию о скорости продольных и поперечных волн, а также о плотности во всех слоях земной коры включая подкоровый, и о глубинах раздела коры, включая границу Мохо.

Позднее была составлена более детальная модель CRUST 2.0, содержащая данные строения коры с осреднением по сетке  $2^\circ \times 2^\circ$ . Обе модели доступны в сети Интернет на сайте <http://mahi.ucsd.edu/Gabi/rem.html>.

Модель CRUST 2.0 может использоваться при изучении регионов и структур планетарного масштаба и, вероятно, для изучения закономерностей строения коры в определенных типах структур.

В настоящей работе представлены результаты изучения распределения плотностных неоднородностей в литосфере по модели CRUST 2.0, основанные на расчетах свободной поверхности мантии. Свободная поверхность мантии (далее СПМ) – это одна из характеристик изостатического состояния земной коры. Она показывает уровень земной поверхности при нулевой мощности земной коры, но с сохранением её нагрузки, т.е. когда земная кора уплотняется до плотности подстилающей её мантии.

Глубина СПМ зависит от температурного режима литосферы, от наличия плотностных неоднородностей в литосфере и от степени её изостатической скомпенсированности. В тектонически стабильных регионах – таких, как континентальные платформы и океанические плиты с возрастом дна старше 10 млн лет, где литосфера находится в изостатически скомпенсированном состоянии, все аномалии СПМ, рассчитанные как разность реального уровня СПМ и уровня, соответствующего термальному режиму литосферы, указывают на наличие плотностных неоднородностей. Таким образом, по рассчитываемым аномалиям СПМ мы можем выявлять аномалии плотности в литосфере, не связанные с её температурным режимом. Подробнее об аномалиях СПМ и методике их расчета можно прочитать в работах (2, 3, 4 и др.).

Ниже представлены результаты проведенного исследования.

**1. Методика расчета глубины СПМ.** Расчет глубины СПМ производится по формуле:

$$H_{см} = H_m - \frac{1}{\rho_m} \sum_1^n \rho_i \cdot h_i$$

где  $H_{спм}$  – глубина СПМ, отсчитываемая от уровня моря,  $H_m$  – глубина границы Мохо,  $\rho_i$  и  $h_i$  – плотность и мощность  $i$ -го слоя земной коры,  $n$  – количество слоев коры.

Данные по плотности и мощности слоёв земной коры взяты из модели CRUST 2.0, плотность подкорового слоя принималась с постоянным значением  $3.3 \text{ г/см}^3$ , что, как считает М.К.Кабан, лучше всего использовать при одновременном изучении океанических и континентальных структур (2 и др.). Данное значение позволит нам сравнивать полученные результаты с результатами М.К. Кабана, который получил наиболее значимые результаты в этой области исследований.

**2. Схема распределения глубины СПМ на Земле.** На основе рассчитанных данных построена схема распределения глубины СПМ по всему земному шару. На этой схеме проявляется нечёткое разделение между континентами и океанами.

Континенты имеют в целом более древнюю, холодную литосферу, и поэтому обладают большими глубинами СПМ, чем океаны. Граница между континентами и океанами на большей части своей длины соответствует изолинии СПМ  $5.5 \text{ км}$ . В океанах хорошо выделяются срединно-океанические хребты подъёмом уровня СПМ до  $3 \div 2.5 \text{ км}$ , в то время как зрелые океанические котловины по глубине СПМ достигают  $4.5 \div 5 \text{ км}$ , в чем приближаются к континентальным платформам. На континентах проявляется явная зависимость аномалий СПМ от мощности коры, что далее будет рассмотрено более подробно. Зоны молодой складчатости – такие, как Памир, Гималаи, Анды, характеризуются наибольшей глубиной СПМ, где она достигает  $8 \text{ км}$  и более.

Таким образом, в целом по Земле, устойчивые тектонические структуры на континенте и океане значения СПМ находятся в пределах  $4.5 \div 5.5 \text{ км}$ . Рифтовые зоны на континенте и в океане характеризуются повышенным уровнем СПМ, что связано с увеличением прогрева литосферы. Зоны субдукции в океанах и зоны складчатости на континентах, развивающиеся при столкновении континентальных плит в результате субдукции, характеризуются пониженным уровнем (т.е. увеличенной глубиной) СПМ.

**3. СПМ в океанах.** Океаническая литосфера, зарождающаяся в срединно-океанических хребтах, по мере отодвигания от них, охлаждается, что приводит к её уплотнению и, соответственно, углублению дна океана. Этот процесс в течение первых  $60 \div 70 \text{ млн. лет}$  достаточно точно объясняется моделью охлаждающегося полупространства, в соответствии с которой связь глубины СПМ с возрастом литосферы описывается выражением вида:  $h_{спм} = A + B\sqrt{T}$ , где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, зависящие от начального уровня СПМ и коэффициента термального расширения мантии, а  $T$  – возраст литосферы. М.К. Кабан по своим расчетам в Тихом океане получил аппроксимирующую зависимость вида:  $h_{спм} = 2.5 + 0.214\sqrt{T}$  (2). По данным модели CRUST 2.0 получается следующая зависимость, рассчитанная по всем океанам:

$h_{спм} = 2.8 + 0.184\sqrt{T}$ . В этих расчетах использовались цифровые данные возраста океанической литосферы (5). Полученная зависимость даёт несколько меньший диапазон изменений, что указывает на меньший коэффициент термального расширения. Однако, следует учитывать что данные в модели CRUST 2.0 задаются с осреднением.

Представляет отдельный интерес рассмотрение глубоководных котловин мирового океана. Академик Ю.М.Пушаровский в последние годы опубликовал ряд

работ, где рассматривает морфологию дна океанических котловин и делает вывод о том, что эти котловины «с полной определённой диагностируются как особая категория океанических тектонических форм» ((6), с.92). Их образование связано с процессом тектонического опускания, который действовал наряду со спрединговым развитием. В уровне СПМ глубоководные котловины всех океанов, выделенные по изобате 5.5 км, устойчиво характеризуются средним значением 4.8 км, что на 0.3 км глубже участков океана зрелого возраста. Они же, как правило, характеризуются пониженным уровнем гравитационного поля. Всё это указывает на то, что причиной образования глубоководных котловин в океане могут являться процессы уплотнения в нижней части литосферы.

**4. СПМ на континентах.** В континентальной литосфере отмечается зависимость глубины СПМ от мощности коры, что показал М.К. Кабан (2). На основании проведенных расчетов им был сделан вывод об увеличении плотности мантии при увеличении мощности коры. Расчет СПМ по данным модели CRUST 2.0 также показывает увеличение глубины СПМ с ростом мощности коры в диапазоне от 30 до 50 км. При этом на каждый километр нарастания её мощности приходится примерно 0.1 км увеличения глубины СПМ.

Вместе с тем, оценка изостатического состояния в горных сооружениях указывает на то, что изостатическая компенсация топографических масс в них осуществляется частично за счет мантии (7), т.е. мантия под горами должна быть разуплотнена. В.П.Семакин и А.В.Кочергин (8) предполагают, что в таких регионах происходит нарастание плотности в мантии за счет процессов разуплотнения подстилающей мантии.

Данное противоречие можно объяснить наиболее простым, по мнению автора, предположением о линейном уменьшении плотности с глубиной в континентальной литосфере. В этом случае плотность под корой будет тем меньше, чем глубже её подошва. А формула расчета СПМ основана на предположении о постоянном значении плотности в мантии, и неучет уменьшения плотности с глубиной дает аномальное увеличение СПМ при росте мощности коры.

Предположение об отрицательном градиенте плотности в литосфере не является таким уж невероятным, как кажется на первый взгляд: вспомним, что температура в литосфере растет с глубиной, достигая на её подошве 1300 градусов. В одной из наиболее часто используемых параметрических моделей Земли – модели PREM (9) плотность в литосфере уменьшается с глубиной.

Интересно также, что при нарастании мощности коры в диапазоне 50–70 км в модели CRUST 2.0 глубина СПМ уже имеет тенденцию к уменьшению. Степень этого уменьшения составляет примерно 0.05 км на каждый километр мощности коры. Можно выдвинуть предположение, что это связано с изостатической нескомпенсированностью земной коры. Кора такой мощности образуется только в Андах и Гималаях – складчатых сооружениях, расположенных в зонах столкновения плит.

**5. СПМ в окраинных морях.** Окраинные моря, образующиеся за зонами субдукции вдоль западной границы Тихого океана, имеют аномально увеличенную глубину СПМ. Впервые это было отмечено Т.Ватанабе с соавторами (10). Высокий тепловой поток, отмечаемый в этих морях, говорит о значительной степени прогрева литосферы, что должно поднимать уровень СПМ гораздо выше, чем в прилегающей области океана. Вместе с тем, уровень СПМ в окраинных морях примерно

такой же, как в океане. Это говорит об аномальном уплотнении в мантии окраинных морей. Автор провел детальное исследование аномалий СПМ и изостатических гравитационных в Охотоморской зоне Тихоокеанской активной окраины и пришел к выводу о глубинном характере изостазии в зонах субдукции, который приводит к углубленному положению литосферы в окраинных морях (3).

Приведенный в данной работе краткий анализ результатов расчета СПМ по всей Земле на основе модели CRUST 2.0 показал основные закономерности распределения плотности в литосфере Земли, а также возможности применения данного метода в изучении плотностного строения верхней оболочки нашей планеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №08-05-99098-р\_офи.

### Литература

1. Mooney W.D., Laske G., Masters T.G. CRUST 5.1: A global crustal model at 5°x5°. // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103B. P. 727–747.
2. Кабан М.К. Изучение изостазии литосферы. М.: ИФЗ АН СССР. 1988.
3. Сеначин В.Н. Аномалии “свободной поверхности мантии” Охотоморского региона и их связь с глубинными процессами // *Тихоокеан. геология.* 2005. Т. 24, № 5 С. 50–65.
4. Сеначин В.Н. Свободная поверхность мантии как индикатор геодинамических процессов (на примере Охотоморского региона) // *Вестник ДВО РАН.* 2006. № 1. С. 18–25.
5. Muller R.D., Roest W.R., Royer R.D. et al. Digital isochrons of the world’s ocean floor // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. N B2. P. 3211–3114.
6. Пушаровский Ю.М. Сравнительная тектоника глубоководных впадин Атлантического, Тихого и Индийского океанов // *ДАН.* 2006. Т. 409, № 1. С.90–93.
7. Артемьев М.Е. Гравиметрия и изостазия: современное состояние и новые задачи. /Комплексные исследования по физике Земли. М.: Наука, 1989. С. 53–68.
8. Семакин В.П., Кочергин А.В. Глубинные факторы формирования континентального горообразования // *Тектоника и металлогения Северной Циркум-Пацифики и Восточной Азии: Материалы всеросс. Конф. с междунар. участием, посвящ. памяти Л.М.Парфенова, Хабаровск, 11–16 июня 2007 г.* / Под ред. А.И.Ханчука – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2007. С. 314–316.
9. Dziewonski A.M., Anerson D.L. Preliminary reference Earth model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 25. P. 297–356.
10. Watanabe T., Langseth M.G., Anderson R.N. Heat flow in back-arc basins of the Western Pacific // *Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins / Eds.: M.Talwani and W.C.Pitman. Washington D.C., 1977. P. 17–161.*