

УДК 539.3, 551.2

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА СУБСТАНЦИИ МАНТИЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В АСТЕНОСФЕРЕ¹*Зарецкая М. В.²***ABOUT A MODEL OF MANTLE INHOMOGENEITIES SUBSTANCE TRANSPORT IN THE ASTHENOSPHERE***Zaretskaya M. V.*

The work deals with the issues of substances transport in the multilayer medium and their settling on polytypic base. These issues arise in the problems about studying the action of the upper mantle on the lower base of the lithospheric plates. The solution of the problem of mantle inhomogeneities substance transport in the asthenosphere is obtained.

Keywords: lithospheric plates, upper mantle, asthenosphere, mantle inhomogeneity, transport.

1. В проблеме оценки сейсмичности территории и прогноза землетрясений одним из малоисследованных вопросов является оценка взаимодействия литосферы и верхней мантии, определяющего в течение геологического времени масштаб, энергию и направленность тектонических процессов. Очевидно, что динамика мантии определяет движение плит, а литосферу можно рассматривать как верхнюю термическую покрывку конвектирующей мантии. Менее очевидны масштабы областей, участвующих в конвекции, роль литосферы в определении схем конвекции, пространственное распределение напряжений и деформаций, следовательно, механизмы деформации земной коры, обуславливающие её расслоенность, дискретность и структурно-вещественную неоднородность. Движения литосферы выражаются в перемещениях ее отдельных участков в вертикальном или горизонтальном направлениях. Непосредственные источники тектонических движений лежат не в самой литосфере, а в более глубоких недрах, и прежде всего в подстилающем литосферу слое верхней мантии — астеносфере. Массивы литосферных плит в целом сложены из твёрдого упруго-

хрупкого материала. Астеносфера представлена пластично-вязким веществом, допускающим возможность вязкого течения. Потoki вещества в астеносфере, в соответствии с положениями современной концепции тектоники, способны переносить и литосферные плиты.

Согласно современным представлениям, не противоречащим данным сейсмической томографии, на границе литосферных плит и верхней мантии можно выделить следующие виды движений: вынужденное конвективное движение в астеносфере при субдукции литосферных плит и горизонтальное течение астеносферы, вызывающее за счет сцепления с литосферой горизонтальное движение последней.

Сейсмическая томография позволила выявить разнонаправленное горизонтальное или близкое к нему движение относительно холодного и нагретого вещества, а не только перемещение в вертикальной плоскости, как это предполагалось ранее. При этом наблюдается объемная картина мантийных неоднородностей, наличие сложно переплетающихся холодных и горячих или «быстрых» и «медленных» масс различной конфигурации.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (НШ-2298.2008.1.), грантов РФФИ (08-08-00669, 08-01-99012).

²Зарецкая Марина Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф КубГУ; e-mail: zarmv@mail.ru.

При изучении реологических свойств верхней мантии стала очевидной ее расслоенность, то есть чередование слоев повышенной и пониженной жесткости, охватывающих и литосферную, и астеносферную ее части, что также подчеркивается протяженными субгоризонтальными сейсмическими границами, некоторые из которых можно отнести к разряду глобальных.

Расслоенность верхней мантии, в том числе астеносферы, позволяет использовать для исследования оседания субстанции мантийных неоднородностей (СБ) на нижнее основание литосферной плиты математическую модель переноса вещества в слоисто-неоднородной среде.

2. В работе [1] выполнена постановка краевых задач переноса СБ для произвольных типов источников, разнотипных подстилающих поверхностей, не обязательно полуплоскостей. Получено приближенное, вырожденное, решение задачи в зонах, удаленных от границ областей. Обоснована возможность использования для описания оседания СБ проекций решений краевых задач с соответствующими граничными условиями, но заданными на всей плоскости.

Рассмотрим случай моделирования астеносферы трехслойной средой и получим интегральное представление решения поставленной задачи.

Количественная сторона изменения содержания СБ в среде во времени и пространстве описывается уравнением переноса

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_n}{\partial t} + u_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial x} + v_n \frac{\partial \varphi_n}{\partial y} + (w_n - w_{gn}) \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} + \\ + \sigma_0 \varphi_n - \mu_n \left(\frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial y^2} \right) - \nu_n \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial z^2} = \\ = \delta_{ni} C \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0). \end{aligned} \quad (1)$$

Принятые обозначения: $\varphi_n(x, y, z)$ — функция концентрации СБ в n -м слое; u_n, v_n, w_n — компоненты вектора скорости в направлениях x, y, z для n -го слоя; w_{gn} — абсолютная величина вертикальной скорости под действием силы тяжести в n -м слое; σ_0 — коэффициент поглощения; ν_n, μ_n — коэффициенты диффузии в вертикальном и горизонтальном направлениях для n -го слоя; $n = 1, 2, 3$ — номер слоя; $\delta_{ni} = \begin{cases} 1, & n = i \\ 0, & n \neq i \end{cases}$ показывает, что точечный источник находится в i -м слое; C — постоянная, характеризующая мощность ис-

точника субстанции; x_0, y_0, z_0 — координаты точечного источника субстанции.

На границах слоев задаются условия сопряжения, имеющие вид

$$\begin{aligned} \varphi_n(x, y, z) = \varphi_{n+1}(x, y, z), \quad z = -h_n, \\ \nu_n \frac{\partial \varphi_n(x, y, z)}{\partial z} = \nu_{n+1} \frac{\partial \varphi_{n+1}(x, y, z)}{\partial z}, \\ z = -h_n, \quad n = 1, 2. \end{aligned}$$

Так как в пределах астеносферы вязкость и плотность среды не изменяется и диффузионные характеристики одинаковы для всех слоев, перепишем условия сопряжения в виде

$$\varphi_n(x, y, z) = \varphi_{n+1}(x, y, z), \quad z = -h_n, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_n(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_{n+1}(x, y, z)}{\partial z}, \\ z = -h_n, \quad n = 1, 2. \end{aligned}$$

Граничные условия на поверхности контакта литосферной плиты и астеносферы ставятся в предположении наличия разнотипных поверхностей (океаническая кора, рифтовые зоны, континентальная кора). Считаем, что в совокупности эти подстилающие поверхности полностью покрывают всю поверхность контакта. На другой границе определяем некоторое значение концентрации субстанции.

На границе контакта литосферной плиты и астеносферы, при $z = 0$, и на границе контакта астеносферы с верхней мантией, при $z = h_3$, выполняются граничные условия

$$L_m \varphi_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - \lambda_{1m} \varphi_1 = q_1(x, y), \quad (3)$$

$$z = 0, \quad x, y \in \Omega_m, \cup \Omega_m = R^2,$$

$$m = 1, 2, \dots, M,$$

$$\varphi_3 = q_2(x, y), \quad z = -h_3. \quad (4)$$

Здесь λ_{1m} — определяемый экспериментально коэффициент, характеризующий степень отражения вещества мантийных неоднородностей при контакте с нижним основанием литосферной плиты для каждой зоны m , $m = 1, 2, \dots, M$; M — количество зон, обладающих различными характеристиками сцепления; $q_1(x, y)$ — функция, определяющая интенсивность притока субстанции в астеносферу со стороны литосферы; $q_2(x, y)$ — функция, определяющая интенсивность притока субстанции в астеносферу со стороны верхней мантии.

Краевая задача (1), (2)–(4) является смешанной, для ее решения применим метод,

изложенный в работе [1]. Решение строится в два этапа: в первую очередь получим интегральное представление решения вспомогательной задачи о распространении СБ в слоисто-неоднородной среде для бесконечной однородной подстилающей поверхности, затем обобщим это решение для случая разнотипных подстилающих поверхностей.

3. Если подстилающая поверхность является бесконечной и однородной, граничные условия (3)–(4) перепишутся в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - \lambda_1 \varphi_1 &= q_1(x, y), \\ z &= 0, \quad x, y \in R^2, \\ \varphi_3 &= q_2(x, y), \quad z = -h_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как для настоящего исследования интерес представляет распределение концентрации СБ на границе астеносферы с нижним основанием литосферной плиты, выпишем интегральное представление решения краевой задачи (1), (2), (5) только для первого слоя, полученное в работах [1, 3]:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1(z) &= \exp(\sigma_1 z) \left\{ \frac{1}{2} F(\alpha, \beta) \exp^{-1}(\sigma_3 z_0) \times \right. \\ &\times e_{12}^{-1} e_{23}^{-1} \Delta_0^{-1} a^{-1} \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0)) \Delta(z) + \\ &+ \bar{q}_1 a^{-1} \Delta_0^{-1} \theta_3^{-1} \left[\exp(\theta_1 h_1) (A_{q_1} \Delta_{16} - \right. \\ &- (\sigma_3 A_{q_1} \theta_3 B_{q_1}) \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0))) \Delta(z) + \\ &\left. + \theta_3 \Delta_0 \exp(\theta_1 z) \right] + \\ &\left. + \bar{q}_2 e_{12}^{-1} e_{23}^{-1} \Delta_0^{-1} \exp(-\sigma_3 h_3) a^{-1} \theta_3 \Delta(z) \right\}. \end{aligned}$$

В последнем соотношении

$$\begin{aligned} \Delta &= \theta_1 \operatorname{ch}(\theta_1 h_1) - (\sigma_1 - \lambda_1) \operatorname{sh}(\theta_1 h_1); \\ \Delta(z) &= \theta_1 \operatorname{ch} \theta_1 z - (\sigma_1 - \lambda) \operatorname{sh} \theta_1 z; \\ \Delta_p &= \theta_1 \operatorname{sh}(\theta_1 h_1) - (\sigma_1 - \lambda_1) \operatorname{ch}(\theta_1 h_1); \\ \Delta_1 &= \sigma_2 \operatorname{ch}(\theta_2(h_2 - h_1)) + \theta_2 \operatorname{sh}(\theta_2(h_2 - h_1)); \\ \Delta_2 &= \sigma_2 \operatorname{sh}(\theta_2(h_2 - h_1)) + \theta_2 \operatorname{ch}(\theta_2(h_2 - h_1)); \\ \Delta_3 &= \sigma_2 \operatorname{sh}(\theta_2(h_2 - h_1)) - \theta_2 \operatorname{ch}(\theta_2(h_2 - h_1)); \\ \Delta_{12} &= (\theta_1 \Delta_p + \sigma_1 \Delta) \Delta_2 - \Delta(\sigma_2 \Delta_2 - \theta_2 \Delta_1); \\ \Delta_{13} &= (\theta_1 \Delta_p + \sigma_1 \Delta) \operatorname{sh}(\theta_2(h_2 - h_1)) - \Delta \Delta_3; \\ \Delta_{14} &= (\theta_1 + \sigma_1) \Delta_2 - (\sigma_2 \Delta_2 - \theta_2 \Delta_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{15} &= (\theta_1 + \sigma_1) \operatorname{sh}(\theta_2(h_2 - h_1)) - \Delta_3; \\ \Delta_{16} &= \sigma_3 \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0)) - \theta_3 \operatorname{ch}(\theta_3(h_3 - z_0)); \\ \Delta_{cs} &= \theta_3 \operatorname{ch}(\theta_3(z_0 - h_2)) - \sigma_3 \operatorname{sh}(\theta_2(z_0 - h_2)); \\ \Delta_{sc} &= \theta_3 \operatorname{sh}(\theta_3(z_0 - h_2)) - \sigma_3 \operatorname{ch}(\theta_2(z_0 - h_2)); \\ A_c &= [\Delta_{12} \operatorname{sh}(\theta_3(z_0 - h_2)) + \Delta_{13} \Delta_{cs}] / \theta_2 a; \\ B_c &= [\Delta_{12} \operatorname{ch}(\theta_3(z_0 - h_2)) + \Delta_{13} \Delta_{sc}] / \theta_2 a; \\ A_{q_1} &= [\Delta_{14} \operatorname{sh}(\theta_3(z_0 - h_2)) + \Delta_{15} \Delta_{cs}] / \theta_2 a; \\ B_{q_1} &= [\Delta_{14} \operatorname{ch}(\theta_3(z_0 - h_2)) + \Delta_{15} \Delta_{sc}] / \theta_2 a; \\ \Delta_0 &= A_c \operatorname{ch}(\theta_3(h_3 - z_0)) + B_c \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0)); \\ e_{12} &= \exp((\sigma_1 - \sigma_2) h_1); \\ e_{23} &= \exp((\sigma_2 - \sigma_3) h_2); \\ a &= \sigma_1 + \theta_1 - \lambda; \end{aligned}$$

$$F(\alpha, \beta) = C v^{-1} \exp(i(\alpha x_0 + \beta y_0));$$

$$\bar{q}_1 = V q_1 = \iint_{\infty} q_1(x, y) e^{i(\alpha x_0 + \beta y_0)} dx dy;$$

$$\bar{q}_2 = V q_2 = \iint_{\infty} q_2(x, y) e^{i(\alpha x_0 + \beta y_0)} dx dy;$$

$$\begin{aligned} \theta_n &= -0,5 \nu_n^{-1} \left((w_n - w_{gn})^2 + \right. \\ &\left. + 4\nu [\mu_n(\alpha^2 + \beta^2) + i(\alpha u_n + \beta v_n) + \sigma_0] \right)^{0,5}; \end{aligned}$$

$$\sigma_n = 0,5 \nu_n^{-1} (w_n - w_{gn}), \quad n = 1, 2, 3.$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} K_1(\alpha, \beta, z) &= \exp(\sigma_1 z) a^{-1} \Delta_0^{-1} \theta_3^{-1} \times \\ &\times [\exp(\theta_1 h_1) (A_{q_1} \Delta_{16} - \\ &- (\sigma_3 A_{q_1} + \theta_3 B_{q_1}) \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0))) \Delta(z) + \\ &+ \theta_3 \Delta_0 \exp(\theta_1 z)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2(\alpha, \beta, z) &= 0,5 \exp(\sigma_1 z) \times \\ &\times \exp^{-1}(\sigma_3 z_0) e_{12}^{-1} e_{23}^{-1} \Delta_0^{-1} a^{-1} \times \\ &\times \operatorname{sh}(\theta_3(h_3 - z_0)) \Delta(z); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_3(\alpha, \beta, z) &= \exp(\sigma_1 z) e_{12}^{-1} e_{23}^{-1} \Delta_0^{-1} \times \\ &\times \exp(-\sigma_3 h_3) a^{-1} \theta_3 \Delta(z). \end{aligned}$$

Тогда

$$\bar{\varphi}_1(z) = K_2(\alpha, \beta, z) F(\alpha, \beta) + K_1(\alpha, \beta, z) \bar{q}_1 + K_3(\alpha, \beta, z) \bar{q}_2. \quad (6)$$

Формула (6) получена в предположении, что и со стороны верхней мантии, и со стороны

литосферной плиты возможен приток субстанции, характеризующийся некоторой интенсивностью.

Предположим, что $q_2(x, y) = 0$ и перепишем (6) в виде

$$\bar{\varphi}_1(z) = K_2(\alpha, \beta, z)F(\alpha, \beta) + K_1(\alpha, \beta, z)\bar{q}_1. \quad (7)$$

Для получения решения поставленной краевой задачи применим к (7) обратное преобразование Фурье

$$\varphi_1(x, y, z) = V^{-1}(K_2(\alpha, \beta, z)F(\alpha, \beta) + K_1(\alpha, \beta, z)\bar{q}_1),$$

или

$$\varphi_1(x, y, z) = V^{-1}K_2(\alpha, \beta, z)F(\alpha, \beta) + V^{-1}(K_1(\alpha, \beta, z)Vq_1), \quad (8)$$

где

$$V^{-1}\bar{\varphi} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\infty} \bar{\varphi} e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta.$$

4. Рассмотрим случай разнотипных подстилающих поверхностей. Граничные условия для каждого из типов подстилающих поверхностей имеют вид

$$L_m \varphi_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - \lambda_{1m} \varphi_1 = 0, \quad (9)$$

$$z = 0, \quad x, y \in \Omega_m,$$

$$\cup \Omega_m = R^2, \quad m = 1, 2, \dots, M,$$

$$\varphi_3 = 0, \quad z = -h_3.$$

Применим известную технику сведения смешанных краевых задач к интегральным уравнениям [2].

Рассмотрим вспомогательную краевую задачу для дифференциального уравнения переноса для трех слоев с следующим граничным условием

$$L_0 \varphi \equiv \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \lambda_0 \varphi = \psi(x, y),$$

$$z = 0; \quad -\infty \leq x, y \leq \infty.$$

Здесь $\psi(x, y)$ — неизвестная функция, подлежащая определению.

В соответствии с (8) функцию $\varphi(x, y, z)$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2} \iint_{\infty} [K_2(\alpha, \beta, z)F(\alpha, \beta) + \\ &+ K_1(\alpha, \beta, z)V\psi] e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta = \\ &= V^{-1}[K_2(\alpha, \beta, z)F(\alpha, \beta) + \\ &+ K_1(\alpha, \beta, z)V\psi]. \end{aligned} \quad (10)$$

Введем P_m — проекторы на области Ω_m

$$P_m = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \Omega_m; \\ 0, & (x, y) \notin \Omega_m. \end{cases} \quad (11)$$

Подставив (10) с учетом (11) в граничные условия (9), получим систему интегральных уравнений первого рода

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \iint_{\Omega_m} k_l(x - \xi, y - \eta) \psi_m(\xi, \eta) d\xi d\eta = \\ = f_l(x, y), \end{aligned} \quad (12)$$

$$l = 1, \dots, M,$$

где

$$k_l(x, y) = V^{-1}L_l K_1(\alpha, \beta, 0);$$

$$f_l(x, y) = -P_l V^{-1}L_l K_2(\alpha, \beta, 0)F(\alpha, \beta);$$

$\psi_m = P_m \psi$ — искомые функции данной системы интегральных уравнений.

Найденные после решения системы интегральных уравнений (12) значения функций ψ_m в каждой области Ω_m должны быть подставлены в (10) для определения значения концентрации $\varphi(x, y, 0)$.

Построение приближенного решения системы интегральных уравнений (12) в значительной степени связано с их происхождением, как результата решения краевой задачи для дифференциальных уравнений эллиптического типа и наличием у символа ядра интегрального уравнения только комплексных нулей и полюсов [2]. Кроме того, рассматриваемые системы интегральных уравнений (12) обладают специфическими свойствами локальности их ядер. Ядра систем интегральных уравнений экспоненциально затухают при увеличении аргументов. Это обстоятельство позволяет строить приближенные решения интегральных уравнений специальным методом, развитым для решения смешанных задач теории упругости.

Решение уравнений с указанными свойствами ядер можно осуществить методом построения вырожденных составляющих решения [4]. Суть метода состоит в том, что решение представимо в виде суммы

$$\psi_m(x, y) = \psi_{m1}(x, y) + \psi_{m2}(x, y).$$

$\psi_{m1}(x, y)$ — это вырожденная или проникающая составляющая решения, которая описывает его поведение во внутренних точках области Ω_m .

Вторая составляющая $\psi_{m2}(x, y)$ называется погранслошной. Ее особенность заключается в том, что она наиболее значительна у границы области и убывает по экспоненте по мере удаления от границы области вглубь.

Перепишем систему уравнений (12), оставив в левой части один член для заданного $l = m$, в виде

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega_m} k_m(x - \xi, y - \eta) \psi_m(\xi, \eta) d\xi d\eta = f_m(x, y) - \\ - \sum_{s=1}^N \iint_{\Omega_m} k_s(x - \xi, y - \eta) \psi_s(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (13) \end{aligned}$$

$$N = M - 1$$

и построим приближенное решение системы, используя свойство экспоненциального убывания ядра. Это свойство позволяет построить вырожденную составляющую решения уравнения доступным путем, а также учесть вклад последующих приближений.

В силу линейности интегрального уравнения (13) его решение является суперпозицией решений для отдельных правых частей.

Построим решение уравнения

$$\iint_{\Omega_m} k_m(x - \xi, y - \eta) \psi_{m1}(\xi, \eta) d\xi d\eta = f_m(x, y),$$

$$x, y \in \Omega_m.$$

Распространим уравнение на всю плоскость, положив $f_m(x, y)$ ее непрерывным продолжением, следующим из интегрального представления вне Ω_m . В результате получим интегральное уравнение

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_m(x - \xi, y - \eta) \psi_m(\xi, \eta) d\xi d\eta = \\ = f_m(x, y), \end{aligned}$$

$$-\infty \leq x, y \leq \infty.$$

Его можно переписать в виде

$$\begin{aligned} VV^{-1} [L_m K_1(\alpha, \beta, 0) \psi_m(\alpha, \beta) + \\ + L_m K_2(\alpha, \beta, 0) F(\alpha, \beta)] = 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} L_m K_1(\alpha, \beta, 0) \psi_m(\alpha, \beta) = \\ = -L_m K_2(\alpha, \beta, 0) F(\alpha, \beta), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_m(\alpha, \beta) = \\ = -L_m^{-1} K_1(\alpha, \beta, 0) L_m K_2(\alpha, \beta, 0) F(\alpha, \beta). \end{aligned}$$

Внося найденное значение $\psi_m(\alpha, \beta)$ в представление $\varphi(x, y, 0)$, получим представление концентрации СБ на поверхности

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, 0) = V^{-1} [K_2(\alpha, \beta, 0) - K_1(\alpha, \beta, 0) \times \\ \times L_m K_2(\alpha, \beta, 0) L_m^{-1} K_1(\alpha, \beta, 0)] F(\alpha, \beta). \end{aligned}$$

Найденное таким образом решение после проектирования в область Σ_m дает вырожденную составляющую и отвечает случаю краевой задачи о распространении субстанции мантийных неоднородностей и осадения их на подстилающую поверхность при следующем граничном условии:

$$L_m \varphi = 0; \quad -\infty \leq x, y \leq \infty.$$

Можно построить вырожденные составляющие решения для всех зон Ω_m , $m = 1, 2, \dots, N$.

В [4] показано, что погранслошная составляющая решения ψ_{m2} имеет вклад вблизи границы и уменьшается экспоненциально при движении вглубь области. Таким образом, для получения качественной картины распределения концентрации субстанции мантийных неоднородностей достаточно учитывать вырожденную составляющую и для каждого участка подстилающей поверхности получать решение краевой задачи об осадении на однородную бесконечную подстилающую поверхность [3].

Литература

1. Бабешко В. А., Зарецкая М. В., Рядчиков И. В. К вопросу моделирования процессов переноса в экологии, сейсмологии и их приложения // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2008. № 3. С. 20–25.
2. Бабешко В. А., Гладской И. Б., Зарецкая М. В., Евдокимов С. М., Евдокимова О. В. Роль разнотипных поверхностей при оседании загрязняющих выбросов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естественные науки. 2000. № 4. С. 56–57.
3. Зарецкая М. В. Моделирование процесса массопереноса в средах со сложным характером распределения параметров // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, № 5. С. 58–62.
4. Евдокимова О. В. К проблеме эколого-экономической оценки дизайна территорий // Вестник южно-российского отделения международной академии наук высшей школы. Природа. Общество. Человек. Естественные науки. 2002. № 1. С. 45–49.

Ключевые слова: литосферная плита, верхняя мантия, астеносфера, мантийная неоднородность, перенос.

Статья поступила 1 сентября 2009 г.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

© Зарецкая М. В., 2009