

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАНТИЙНОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ

Четырбоцкий А.Н.

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток
chetyrbotsky@yandex.ru*

Разработана крупномасштабная модель верхне- и нижнемантийной конвекции в зоне погружения холодной литосферной плиты (субдукции) в толщу Земли. Обсуждаются вопросы построения уравнений модели, начальных распределений, построения численных схем и применения вычислительных алгоритмов, проведения вычислительных экспериментов.

Погружение холодной океанической плиты в толщу Земли обычно рассматривается только в среду ее верхней мантии [1–3]. Для плотности принимается также соблюдение условия Буссинеска (согласно которому ее динамика определяется ее характерным средним) и постоянная вязкость. Приемлемость таких ситуаций является допустимой лишь в отдельных частных случаях. Здесь областью рассмотрения выступает вся толща мантии Земли, протяженность которой составляет 2800 км. Безразмерная запись уравнений динамики, которой в терминах завихренности – функция тока, принимает вид [1]

$$\Delta \mu \xi - 2 \left[\mu_{xx} \psi_{yy} - 2 \mu_{xy} \psi_{xy} + \mu_{yy} \psi_{xx} \right] - Ra^{(D)} \rho_x = 0 \quad (1)$$

$$\mu_{xx} \psi_{yy} - \xi = 0 \quad (2)$$

$$T_t + (UT)_x + (VT)_y = \Delta T, \quad (3)$$

$$\rho_t + (U\rho)_x + (V\rho)_y = \chi_\rho \Delta \rho, \quad (4)$$

где безразмерные переменные принимают такой смысл: x, y оси декартовой системы координат ($x=y=0$ левый угол), ось u направлена

вниз; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 2D оператор Лапласа; $\mu(T, y)$, $\xi(x, y, t)$, $\psi(x, y, t)$, $\rho(x, y, t)$ динамическая вязкость мантии, завихренность, функ-

ция тока мантийных течений и ее плотность; $U(x, y, t) = \psi_y$, $V(x, y, t) = -\psi_x$, $T(x, y, t)$ латеральная и вертикальная скорости мантийных течений, распределение температуры в мантии; $Ra^{(D)} = g \frac{\overline{\rho} H^2}{\rho \mu U}$

плотностное число Рэлея верхней мантии; g , $\overline{\rho}$, $\overline{U}$, β , H ускорение свободного падения, характерные значения плотности и скорости мантийных течений, а также коэффициент теплового расширения и глубина верхней мантии; $dT - T_{max} - T_{min}$ характерный перепад температуры в верхней мантии; χ_p коэффициент диффузии плотности горных пород; нижние индексы переменных указывают на соответствующие одноименные частные производные.

Тогда модель субдукции можно определить такими безразмерными уравнениями

$$(\eta u_x)_x - Ra_S^{(D)} y \rho_x^* = 0 \quad (7)$$

$$(\eta v_y)_y + Ra_S^{(D)} g (\rho^* - \rho) = 0 \quad (8)$$

$$T_t^* + (u T^*)_x + (v T^*)_y = \kappa \cdot \Delta T^* \quad (9)$$

$$C_t + (uC)_x + (vC)_y = a \cdot \Delta C + B(C, \rho^*) \quad (10)$$

$$\rho^* = [C \rho_H^{-1} + (1 - C) \rho_L^{-1}]^{-1} \quad (11)$$

где $\eta(T, y)$ вязкость слэба (порядка 10^{21} – 10^{23} Н·с/м² [2]); $u(x, t)$, $v(x, t)$, $T^*(x, y, t)$, $\rho^*(x, y, t)$ горизонтальная и вертикальная скорости погружения его вещества, температура и плотность слэба; y безразмерная вертикальная координата; коэффициент температуропроводности слэба; $Ra_S^{(D)} = g \frac{\overline{\rho} H^2}{\rho \eta u}$ плотностное число Рэлея для слэба; $C(x, y, t)$ концентрация тяжелой составляющей слэба; $B(C, \rho^*)$ определяет динамику частичных фазовых превращений его вещества вследствие всплытия или удаления легких составляющих вещества слэба.

Расчет динамики погружения плиты – на основании метода сглаженных частиц SPH [4]. Выполнена серия вычислительных экспериментов. Предлагается численная модель единой субдукции в верхней и нижней мантии Земли, где для вещества в обоих резервуарах учитываются распределения вязкости, температуры и

плотности. Изучение перестройки структуры мантийной конвекции в зоне субдукции здесь было выполнено при таких численных значениях параметров вычислений: $N_x = 100$, $N_y = 50$, $dt = 10^{-4}$, $\Delta x = 9,67 \cdot 10^{-2}$, $\Delta y = 5,76 \cdot 10^{-2}$. Временной промежуток $H/\bar{u}$ составляет $9,1324 \cdot 10^7$ лет ($\bar{u}$ характерный масштаб скорости погружения слэба). Число временных слоев $N_t = 2500$ и временной шаг $\Delta t = 4,132 \cdot 10^4$ лет. На рисунке 1 представлена динамика погружения для отдельных временных слоев.

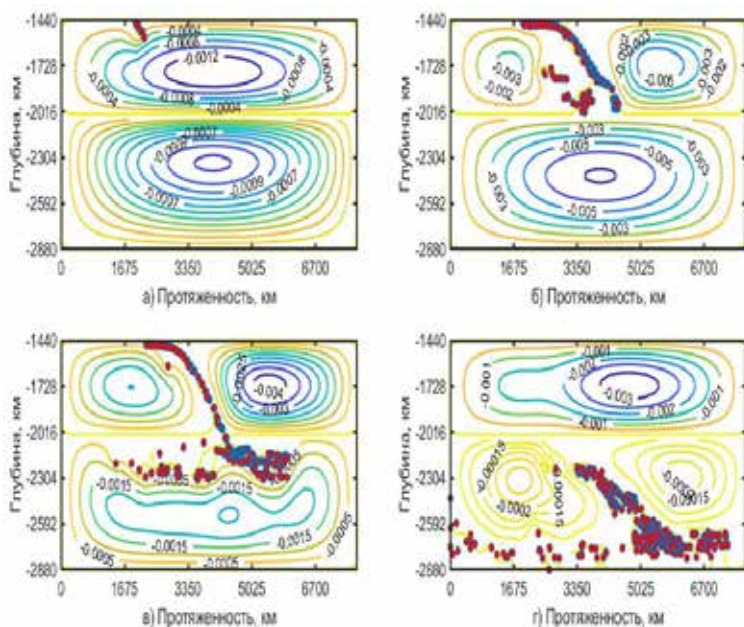


Рис. 1. Динамика модельной субдукции для: а) 100 итераций; б) 1000 итераций; в) 1500 итераций; г) 2500 итераций

Характер распределения отдельных составляющих слэба показывает, что вплоть до границы верхняя-нижняя мантия он неделим, а далее ее передняя кромка начинает разрушаться. Здесь также полагается практически его неделимость вплоть до границы. На рисунке 1г у слэба уже отсутствует верхняя примыкающая к литосфере его часть, что вызвана конечной длиной слэба.

Литература

1. Роуч П. Дж. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
2. Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Распределение температуры в субдуцирующей плите и в верхней мантии на континентальном крыле зоны субдукции // Геосферные исследования. 2023. № 1. С. 6-19.
3. Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics // Rep. Prog. Phys. 2005. 68. P. 1703-1759.