

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ В ДИНАМИКЕ ОКЕАНА

И. А. Маслов

*Показано, что Мировой океан находится в касательном поле гравитационных сил. На примере Гольфстрима проиллюстрировано как действуют эти силы на траекторию потока.*

Невозмущенная поверхность океана совпадает с поверхностью уровня потенциала силы тяжести — геоидом. В реальном океане непрерывно происходит перенос тепла, солей и кинетического момента, однако и при этих условиях средние отклонения поверхности океана от геоида не превышают нескольких метров /1/.

Поэтому представляет интерес рассмотрение происхождения сил, вызывающих компенсационные движения водных масс.

Предположим, что эти силы имеют гравитационную природу и рассмотрим структуру геоида. Потенциал силы тяжести  $U$ , представляющий собой сумму потенциалов гравитационных и центробежных сил и соответствующий эллипсоиду с однородным распределением внутренних масс, называется нормальным потенциалом, а его уровенная поверхность принимается в качестве отсчетной (эллипсоид относимости). Сила тяжести  $\vec{\gamma}$  на этой поверхности определяется нормальной производной потенциала.

Массы Земли распределены неоднородно, и потенциал силы тяжести ее  $W$  отличается от нормального  $U$ :

$$W = U + T,$$

где возмущающий потенциал  $T$  определяется отличием распределения масс реальной Земли от однородного.

Рассмотрим область расположения источников потенциала  $T$  в Земле. Средняя плотность Земли составляет  $5,52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  и меняется от  $2,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  для пород земной коры до  $\geq 12,2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  для вещества в центре Земли. Масса гидросферы составляет  $2,3 \cdot 10^{-4}$  полной массы Земли. Все значения плотности, возможные в Мировом океане, укладываются в пределы  $1,0757 - 0,9960 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  /2/. Отсюда следует, что возмущающий потенциал  $T$  вызывается источниками, расположенными в твердой Земле и внешними по отношению к покрывающему ее Мировому океану.

Действие потенциала  $T$  приводит к тому, что эквипотенциальная поверхность геоида  $W$  в Мировом океане перестает быть софокусной с эллипсоидом  $U$ . Вектор силы тяжести  $g$ , направленный по отвесной линии к  $W$ , перестает совпадать с вектором нормальной силы тяжести  $\vec{\gamma}$ . В результате в водной среде появляются составляющие силы тяжести  $g$ , направленные по нормали  $z$  и касательной  $s$  к эллипсоиду:  $g_z = \gamma$ ,  $g_s = \partial W / \partial s$ . То есть в каждой точке водной среды в географической системе координат появляется сила, касательная к координатной поверхности, близкой к среднему уровню океана.

Угол  $\vartheta$  между  $\vec{\gamma}$  и  $g$  называется отклонением отвесной линии /3/. Обычно  $\vartheta$  задают составляющими в плоскости меридиана  $\xi$  и первого вертикала  $\eta$ . С точностью до малых второго порядка  $g_s = \partial \gamma$ . Уклонение отвесной линии можно записать в виде:

$$\vartheta = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial W}{\partial s} = -\frac{1}{\gamma} \left( \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{\partial T}{\partial s} \right).$$

На поверхности эллипсоида относимости  $\partial U / \partial s = 0$ , тогда  $\vartheta = - (dT/ds) / \gamma$ , или, с учетом уравнения Брунса  $T = \gamma N$ , где  $N$  — расстояние между геоидом и эллипсоидом относимости,  $\vartheta = - \partial N / \partial s$ . При  $\vartheta = 1''$  в

водной среде действует касательная составляющая силы тяжести  $g_s = 5 \cdot 10^{-6} \gamma = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см/с}^2$ , направленная в сторону увеличения  $N$ .

Рассмотрим правильность предположения о гравитационной природе компенсационных сил на примере формирования траектории потока водных масс, считая действие  $g_s$  аналогичным геострофическому ветру в атмосфере /4/. Направление геострофического ветра перпендикулярно градиенту давления, т.е. направление потока, вызываемого  $g_s$ , должно совпадать с изолиниями  $N$ .

Пользуясь картой геоида /5/, оценим действие  $g_s$  и сопоставим его с действием ускорения Кориолиса в области формирования траектории флоридского течения Гольфстрима /6/. На рис. 1 показаны изолинии  $N$  с интервалами 5 м и траектория Гольфстрима.

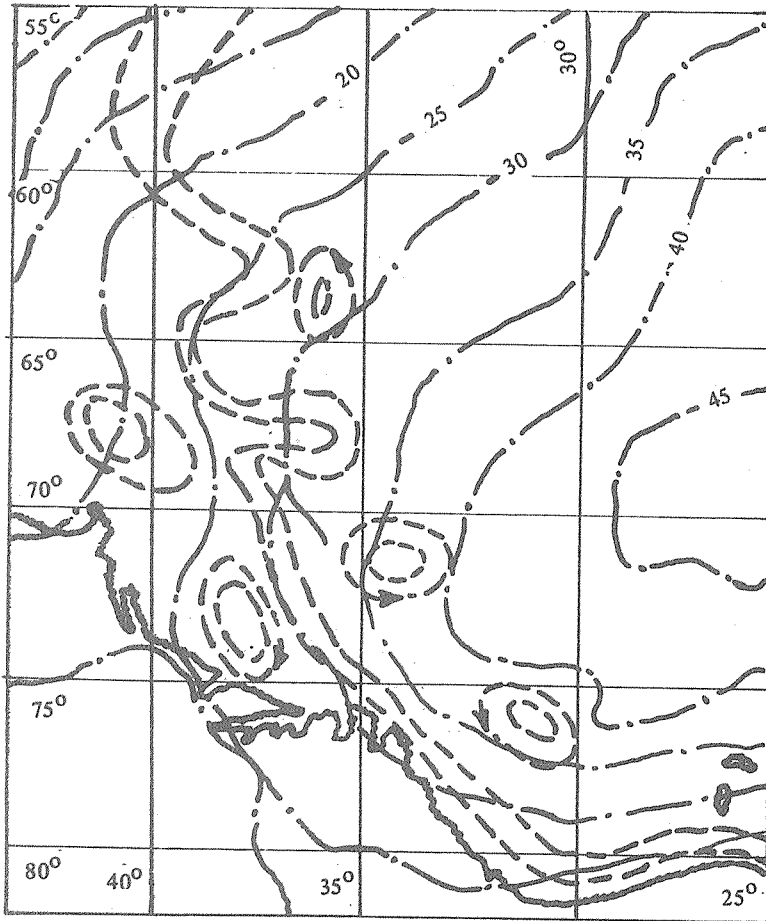


Рис. 1. Изолинии геоида ( $\Delta N = 5 \text{ м}$ ) в области Гольфстрима.

В районе с координатами  $\varphi = 30^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 80^\circ$  з.д.  $\Delta N = 5 \text{ м}$  на расстоянии  $\Delta y = 164 \text{ км}$  /7/. Отсюда  $\eta \approx \Delta N / \Delta y = 6''$  создает составляющую силы  $g_\lambda = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}^2$ , направленную в сторону берега, а в районе с  $\varphi = 37^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 72^\circ$  з.д.  $\Delta N = 5 \text{ м}$  на расстоянии 220 км и  $\xi \approx \Delta N / \Delta x = 4,5''$  создает составляющую силы  $g_\varphi = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}^2$ , направленную к северу.

Скорости течения в этом районе составляют от 0,4 до 2,0 м/с /8/, и на поток действует ускорение Кориолиса от  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $15 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}^2$ , стремящееся отклонить его вправо. Как следует из приведенных оценок,  $g_s$  доминирует над ускорением Кориолиса и течение должно следовать изолиниям  $N$ , что хорошо согласуется с наблюдениями.

Рассмотренный пример подтверждает верность сделанных предположений и свидетельствует о необходимости учета гравитационных сил, касательных к средней поверхности океана, при решении задач его динамики.

Автор благодарит Ф.В. Бункина за интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wyrтки К. J. Phys. Oceanogr., 5, 450 (1975).
2. Таблицы физических величин. М., Атомиздат, 1976, с. 998.
3. Грушинский Н. П. Теория фигуры Земли. М., Физматгиз, 1963, с. 329.
4. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1962, с. 472.
5. Vincent S. et al. A detailed gravimetric Geoid from North America to Euroasea. Goddard Space Flight Center, 1972.
6. Стюарт Р. В. В кн. Наука об океане. М., Прогресс, 1981.
7. Грушинский Н. П. Теория фигуры Земли. М., Физматгиз, 1963, с. 75.
8. Meadows G. A. et al. J. Geophys. Res., 88, № С7, 4393 (1983).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 30 декабря 1986 г.