

## АСТРОНОМИЯ

УДК 521.9:521.91:551.24

**ВЕКОВОЙ ДРЕЙФ ЦЕНТРА МАСС ЗЕМЛИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ ДВИЖЕНИЕМ ПЛИТ**

Ю. В. Баркин

(ГАИШ)

Изучается тонкое геодинамическое явление — вековое движение центра масс Земли вследствие движения литосферных плит. На основе принятой модели плит показано, что в данную эпоху центр масс Земли смещается относительно мантии в направлении точки с географическими координатами  $\varphi=42,3^\circ$  с. ш.,  $\lambda=131,2^\circ$  в. д. (в сторону Японского моря) со скоростью  $v_c=4,45$  см/век. Указанное явление обусловлено в первую очередь эффектом поддвига океанических плит.

**1. Введение**

Движение литосферных плит может быть одним из основных механизмов, порождающих вековое движение центра масс Земли.

В первую очередь это может быть связано с их взаимными перемещениями по деструктивным границам (при субдукции плит). Действительно, имеются свидетельства, что именно в окрестностях зон субдукции происходит концентрация погружающихся масс океанических плит, в то время как смещения плит вдоль трансформных разломов и их наращивание по конструктивным границам (вдоль срединно-океанических хребтов), по-видимому, не приводят к существенной перестройке масс внешней оболочки Земли.

Нетрудно показать, что если концентрация масс имеет место, то вследствие движения литосферных плит тензор инерции Земли, коэффициенты геопотенциала должны испытывать вековые вариации. Как следствие вековые вариации должны проявляться во вращении Земли, в смещении ее центра масс и даже в значениях силы тяжести на поверхности Земли.

Вековые вариации во вращении Земли вследствие движения плит были изучены в работе автора [1]. В этой работе было показано, что наблюдаемое вековое движение полюса в основном объясняется эффектами поддвига океанических плит.

Цель данной работы — оценить параметры векового движения центра масс Земли по отношению к ее мантии, обусловленного движением литосферных плит. В данном случае, однако, в отличие от работы [1] у нас нет возможности сравнить полученные параметры с данными наблюдений.

Аргументами в пользу существования предполагаемого механизма аккумуляции масс служат данные сейсмических и гравиметрических исследований:

- 1) при погружении в зонах субдукции холодные и тяжелые блоки плит не размягчаются, не теряют жесткости и встречают непреодолимые препятствия на глубине около 700 км [2];
- 2) существуют уплотнения масс на глубинах около 640 км в районах зон субдукции Тихого океана [3];
- 3) имеются «вздутия» геоида в районах Филиппинского архипелага и Индонезии, а также в Южной Америке [4].

Предлагаемая в данной работе модель плит и их движения фактически учитывает надвиг и поддвиг плит по их деструктивным границам, что и приводит к предполагаемому явлению аккумуляции масс.

Как и в работе [1], здесь плиты рассматриваются в виде тонких и жестких сферических оболочек с границами, определяемыми узкими поясами сейсмичности. Плиты совершают сферические движения в соответствии с кинематической теорией АМО-2 [5]. Эффекты, связанные с изменениями динамического строения плит, с эволюцией и трансформацией погрузившихся блоков плит, здесь в учет не принимаются.

Дополнительно заметим, что к зонам срединно-океанических хребтов поступает существенно меньшее количество астеносферных масс по сравнению с поддвигаемыми по зонам субдукции массами океанических плит [4]. Последние из указанных зон имеют существенно большую сейсмическую активность по сравнению с первыми. Эти явления фактически подтверждают правильность выбора предлагаемой модели плит. Тем не менее эффекты от присоединения масс в зонах срединно-океанических хребтов и от погружения масс океанических плит по зонам субдукции в будущем целесообразно изучить по отдельности и на основе различных моделей плит и их движения.

## 2. Вековое смещение центра масс Земли

Сферические движения плит  $P_\sigma$  ( $\sigma=1, 2, \dots, N$ ) в данную эпоху зададим кинематической моделью Минстера—Джордана АМО-2 [5]. В этой теории вращение плиты  $P_\sigma$  относится к земной системе координат  $S_{мхуз}$ , начало которой соответствует положению центра масс Земли в данную эпоху, а оси — гринвичской системе координат. Вращение плит задается в системе координат  $S_{мхуз}$  проекциями вектора угловой скорости  $\Omega_\sigma = (\Omega_{\sigma x}, \Omega_{\sigma y}, \Omega_{\sigma z})$ . Плиты будем рассматривать как неизменяемые тонкие оболочки с фиксированной толщиной  $H=60$  км и с плотностью  $\rho=3,3$  г/см<sup>3</sup> [1, 4].

Данная модель плит дает простое описание указанным выше явлениям надвига, поддвига и расхождения плит и фактически задает литосферу как изменяемую оболочку. Нижняя мантия и ядро Земли в данной работе рассматриваются как неизменяемые части Земли и более того — как тела с концентрическим распределением плотностей. В силу сказанного при движении плит оси координат  $S_{мхуз}$  остаются связанными с мантией и ядром. Поэтому движение центра масс Земли по отношению к системе координат  $S_{мхуз}$  означает его движение относительно ядра и нижней мантии. Земля рассматривается как изолированное небесное тело.

Пусть  $m_\sigma$  — эффективная масса плиты  $P_\sigma$ ,  $m$  и  $R$  — масса и средний радиус Земли. Через  $\mathbf{r}_\sigma = (x_\sigma, y_\sigma, z_\sigma)$  обозначим радиус-вектор и координаты центра масс плиты  $P_\sigma$  в системе координат  $S_{мхуз}$ , а через

$$S_\sigma = m_\sigma \mathbf{r}_\sigma$$

и

$$S_{\sigma x} = m_\sigma x_\sigma, S_{\sigma y} = m_\sigma y_\sigma, S_{\sigma z} = m_\sigma z_\sigma \quad (1)$$

— векторный и координатные статические моменты плит  $P_\sigma$  в той же системе координат.

Значения масс  $m_\sigma$  и параметров в (1) были рассчитаны для указанной выше модели плит с помощью метода трапеций [1] (табл. 1). В список плит мы включили 10 основных из них (т. е. для рассматриваемой модели  $N=10$ ). В таблицах, а также далее в тексте для плит

будем использовать следующие буквенные обозначения: Африканская — АФ, Евразийская — ЕА, Тихоокеанская — ТО, Индийская — ИН, Северо-Американская — СА, Южно-Американская — ЮА, Антарктическая — АН, Аравийская — АР, Кокос — КО, Наска — НА. Указанные в табл. 1 и 2 погрешности отражают принятую формально погрешность (10%) в значении эффективной мощности  $H$  для каждой из 88 трапезий, аппроксимирующих плиты.

Таблица 1

Массы и статические моменты плит (1 ед. массы равна  $10^{-8} m$ , 1 ед. статического момента равна  $10^{-3} mR$ )

$P_{\sigma}$	$m_{\sigma}$	$S_{\sigma x}$	$S_{\sigma y}$	$S_{\sigma z}$
АФ	$2,716 \pm 0,272$	$2,177 \pm 0,218$	$0,540 \pm 0,090$	$0,049 \pm 0,084$
ЕА	$2,682 \pm 0,268$	$0,042 \pm 0,075$	$1,313 \pm 0,141$	$1,629 \pm 0,166$
ТО	$3,822 \pm 0,382$	$-2,711 \pm 0,271$	$-1,080 \pm 0,145$	$0,108 \pm 0,137$
ИН	$2,301 \pm 0,230$	$-0,610 \pm 0,096$	$1,576 \pm 0,158$	$-0,652 \pm 0,076$
СА	$1,921 \pm 0,192$	$0,072 \pm 0,050$	$-0,845 \pm 0,093$	$1,406 \pm 0,141$
ЮА	$1,661 \pm 0,166$	$0,917 \pm 0,092$	$-1,009 \pm 0,101$	$-0,561 \pm 0,067$
АН	$1,971 \pm 0,197$	$0,108 \pm 0,044$	$0,141 \pm 0,070$	$-1,688 \pm 0,169$
АР	$0,161 \pm 0,016$	$0,103 \pm 0,010$	$0,107 \pm 0,011$	$0,059 \pm 0,006$
КО	$0,214 \pm 0,021$	$0,022 \pm 0,003$	$-0,204 \pm 0,020$	$0,038 \pm 0,004$
НА	$0,533 \pm 0,053$	$-0,019 \pm 0,005$	$-0,479 \pm 0,048$	$-0,184 \pm 0,018$

Вектор скорости центра масс Земли  $C$  (в системе координат  $C_{Mxyz}$ ) определяется формулой

$$v_C = \sum_{\sigma=1}^N m_{\sigma} (\Omega_{\sigma} \times r_{\sigma}) / m = \sum_{\sigma=1}^N (\Omega_{\sigma} \times S_{\sigma}) / m,$$

а его проекции на оси системы координат  $C_{Mxyz}$ :

$$\dot{x}_C = \sum_{\sigma=1}^N \dot{x}_C^{\sigma}, \quad \dot{y}_C = \sum_{\sigma=1}^N \dot{y}_C^{\sigma}, \quad \dot{z}_C = \sum_{\sigma=1}^N \dot{z}_C^{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\dot{x}_C^{\sigma} = (\Omega_{\sigma y} S_{\sigma z} - \Omega_{\sigma z} S_{\sigma y}) / m$ ,

$$\dot{y}_C^{\sigma} = (\Omega_{\sigma z} S_{\sigma x} - \Omega_{\sigma x} S_{\sigma z}) / m, \quad (3)$$

$$\dot{z}_C^{\sigma} = (\Omega_{\sigma x} S_{\sigma y} - \Omega_{\sigma y} S_{\sigma x}) / m$$

— компоненты скоростей вековых смещений центра масс Земли, обусловленные движением каждой из плит.

Расчетные значения параметров (3) вместе с их погрешностями приведены в табл. 2. Суммарные значения компонент скорости центра масс Земли (2), также приведенные в табл. 2, позволяют сделать следующий вывод.

Вследствие движения литосферных плит и предполагаемой аккумуляции масс в окрестностях деструктивных границ плит центр масс Земли смещается относительно ядра и нижней мантии из положения в данную эпоху к точке на поверхности Земли с географическими координатами  $\varphi = 42,3 \pm 6,7^{\circ}$  с. ш.,  $\lambda = 131,2 \pm 5,9^{\circ}$  в. д. со скоростью  $v_c = (4,454 \pm 0,605)$  см/век.

З а м е ч а н и е. В вековое движение центра масс Земли вносят определенный вклад все другие геофизические процессы, характеризую-

щие медленные перераспределения масс Земли: изменения ледового покрова Антарктиды и Гренландии, уровня Мирового океана, атмосферные изменения, связанные с вековыми вариациями климата, смещения внешнего и внутреннего ядер и др. Изучение перечисленных явлений и механизмов представляет важную научную задачу.

Таблица 2

Вклад плит в вековое смещение центра масс Земли

$P_{\sigma}$	$\dot{x}_C^{\sigma}$ , см/век	$\dot{y}_C^{\sigma}$ , см/век	$\dot{z}_C^{\sigma}$ , см/век
АФ	$-0,155 \pm 0,042$	$0,578 \pm 0,063$	$0,500 \pm 0,052$
ЕА	$-0,574 \pm 0,060$	$0,065 \pm 0,022$	$-0,037 \pm 0,018$
ТО	$-0,750 \pm 0,153$	$1,990 \pm 0,216$	$1,087 \pm 0,114$
ИН	$-0,937 \pm 0,097$	$0,058 \pm 0,087$	$1,017 \pm 0,106$
СА	$-0,370 \pm 0,037$	$-0,053 \pm 0,006$	$-0,013 \pm 0,016$
ЮА	$-0,030 \pm 0,017$	$-0,123 \pm 0,013$	$0,172 \pm 0,017$
АН	$0,145 \pm 0,035$	$-0,073 \pm 0,020$	$0,003 \pm 0,009$
АР	$-0,056 \pm 0,006$	$0,024 \pm 0,006$	$0,052 \pm 0,005$
КО	$0,109 \pm 0,022$	$0,044 \pm 0,005$	$0,176 \pm 0,019$
НА	$0,445 \pm 0,045$	$-0,032 \pm 0,006$	$0,037 \pm 0,008$
$\Sigma$	$-2,173 \pm 0,513$	$2,479 \pm 0,445$	$2,995 \pm 0,364$

### 3. Закономерности в движении плит и особенности смещения центра масс Земли

По найденным значениям параметров  $m_{\sigma}S_{\sigma x}, S_{\sigma y}, S_{\sigma z}$  (табл. 1) трудно определить многие другие кинематические характеристики плит: декартовы и сферические координаты центров масс плит  $C_{\sigma}$  и их эпицентров на поверхности Земли  $O_{\sigma}$ ; составляющие линейных скоростей  $v_{C_{\sigma}}, v_{O_{\sigma}}$  этих точек в декартовой системе координат  $C_Mxyz$ ; широтные и долготные составляющие векторов  $v_{C_{\sigma}}, v_{O_{\sigma}}$ ; значения проекций векторов  $\Omega_{\sigma}$  на ось, проходящую из начала координат  $C_M$  через соответствующий эпицентр  $O_{\sigma}$ .

Ниже мы сформулируем основные выводы предварительного анализа указанных кинематических характеристик в контексте с изучаемым явлением смещения центра масс Земли.

Вначале укажем на закономерности в движении плит [6]. Для полноты их описания включим здесь в рассмотрение также Филиппинскую плиту (ФП).

Введем в рассмотрение геоцентрическую декартову систему координат  $C_Mx_Ly_Lz_L$ , названную автором в работе [6] литосферной системой координат (ЛСК). Координатная плоскость  $C_Mx_Ly_L$  наклонена к плоскости экватора Земли  $E$  на угол  $I=31,5^{\circ}$  и имеет долготу восходящего узла  $\Lambda=3,5^{\circ}$  з. д. Эту плоскость будем называть плоскостью экватора литосферы ( $P_L$ ), а ее пересечение со сферической поверхностью Земли — экватором литосферы ( $E_L$ ). Ось  $C_Mx_L$  направлена к восходящему узлу  $\Omega_L$  экватора литосферы на экваторе Земли. Ось  $C_Mz_L$  ортогональна плоскости  $P_L$  и направлена в Северное полушарие. Ось  $C_My_L$  дополняет систему координат до правой (рисунок). Плоскость  $C_Mx_Lz_L$  является плоскостью нулевого меридиана. Другая координатная плоскость  $C_My_Lz_L$  одновременно является меридиональной плоскостью грин-

вичской и литосферной системы координат. Соответствующий меридиан обозначим  $M_L$ .

Ниже также используется понятие магнитного центра Земли  $M$  (или эксцентричного диполя). Как известно, этот подвижный диполь описывает основную дипольную составляющую магнитного поля Земли, а также его временную эволюцию — западный дрейф. Траектория центра  $M$  определяется в ядре работ как эллиптическая, расположенная и определенным образом ориентированная в некоторой плоскости  $P_M$ , наклоненной к плоскости экватора Земли  $E$  [7].

Сформулируем главные закономерности в движении основных плит литосферы, рассматриваемых в данной работе.

1°. Эпицентры центров масс  $O_c$  плит  $P_c$  расположены вблизи экватора литосферы  $E_L$  (АФ, АР, ФП, ТО, НА, ЮА) и вблизи меридиана  $M_L$  (СА, КО, НА, АН, ЕА).

2°. Центры плит АФ, АР, ФП, ТО, НА, ЮА «распределены равномерно» по экватору литосферы. При этом центры плит ТО и АФ, ФП и ЮА являются диаметрально противоположными.

3°. Преимущественное направление в движении центров плит АФ, АР, ФП, ТО, НА, ЮА — вдоль экватора литосферы.

4°. Плоскость  $P_M$  траектории магнитного центра Земли, моделирующего ее дипольное поле и западный дрейф, совпадает с плоскостью экватора литосферы ( $P_L$ ).

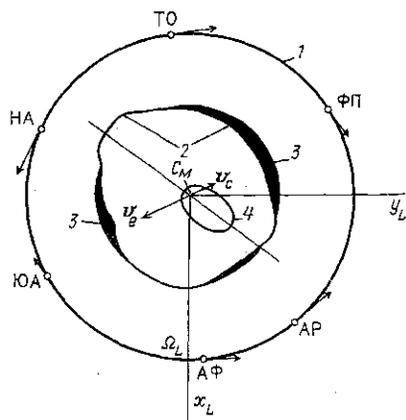
Положения 1°—4° хорошо иллюстрируются на рисунке, где схематически представлено сечение Земли плоскостью  $S_{Mx_Ly_L}$ . Наряду с эллиптической траекторией магнитного центра Земли (4) здесь изображено сечение плоскостью  $P_L$  поверхности внешнего ядра (2). Особенности поверхности внешнего ядра, полученной на основе сейсмических наблюдений [8], представлены в увеличенном масштабе.

Анализ результатов данной работы в совокупности с закономерностями в движении плит 1°—4° позволил установить ряд важных дополнительных свойств геодинамического устройства Земли и ее эволюции (см. рисунок):

(1) вектор  $v_c$  скорости смещения центра масс Земли вследствие движения плит расположен вблизи плоскости экватора литосферы;

(2) процессы субдукции океанических плит обладают определенной симметрией по отношению к плоскости экватора литосферы  $P_L$  (так, полярные составляющие количества движения погружающихся масс в Южном и в Северном полушариях ЛСК равны по модулю и противоположны по знаку);

(3) в своем сечении плоскостью  $P_L$  ядро сжато вдоль линии центров плит ФП и ЮА, а ортогональная ей линия пересекает основное возвышение поверхности ядра и срединно-океанический Тихоокеанский хребт (в их сечении плоскостью  $P_L$ );



Положения и скорости эпицентров центров масс плит на экваторе литосферы (1); сечение внешнего ядра Земли плоскостью экватора литосферы (2); утолщения мантии (затяжканы) (3); траектория магнитного центра (4). Особенности рельефа внешнего ядра представлены в увеличенном масштабе (экстремальные вариации рельефа составляют 4—6 км)

(4) понижения поверхности ядра и соответствующие им утолщения мантии со стороны плит ТО и ФП менее выражены, чем со стороны плиты ЮА;

(5) вековое смещение центра масс Земли со скоростью  $v_c$  происходит вдоль линии центров плит ЮА—ФП в направлении центральной части соответствующего утолщения мантии (см. рисунок).

(6) вековому смещению центра масс Земли соответствует обратное вековое смещение центра ядра и нижней мантии со скоростью  $v=4,5$  см/век в направлении точки на земной поверхности с географическими координатами  $42,3^\circ$  ю. ш.,  $48,8^\circ$  з. д.; если количество движения всех плит сопоставить смещению лишь внешнего ядра Земли, то скорость этого смещения будет равна  $v_e=(14,91\pm 2,01)$  см/век (в этом пункте речь идет о смещениях относительно положения центра масс Земли в данную эпоху);

(7) геофизические процессы, ответственные за формирование и эволюцию магнитного поля Земли, в частности течения в жидком ядре, обладают определенной симметрией по отношению к плоскости экватора литосферы;

(8) линия апсид эллиптической орбиты эксцентричного диполя симметрично пересекает грушевидный профиль сечения поверхности ядра; перигентр орбиты расположен со стороны основного ее возвышения (см. рисунок);

(9) линия апсид орбиты диполя образует угол  $35^\circ$  с осью  $S_{MYL}$  ЛСК, которая задает наклон плоскости экватора литосферы по отношению к земному экватору.

## Выводы

1. Конструктивное выделение ЛСК имеет веское геодинамическое и геофизическое содержание. К указанным выше свойствам 1°, 3°, 4° и (1)—(9) можно добавить, что точки пересечения оси  $S_{MYL}$  с земной поверхностью приходятся на высокогорный район Тибета и центральную часть плиты Наска, т. е. на районы высокой тектонической, сейсмической и вулканической активности.

2. Свойства 4° и (7)—(9) указывают на тесные связи глобальных структур и эволюции всего ансамбля плит и магнитного поля Земли. Свойство (8) указывает на зависимость структур неоднородностей на границе ядро—мантия и особенностей магнитного поля. Это является аргументом в пользу предположения, что магнитный центр соответствует гравитационному центру (своеобразной точке либрации) внутреннего гравитационного поля, создаваемого неоднородностями оболочек Земли, особенно в их переходных областях: ядро—мантия, нижняя мантия—литосфера и др.

3. Свойства (4) и (6) свидетельствуют в пользу обсуждаемого в литературе смещения центра масс внешнего ядра к центральной части Бразилии примерно на 300 м. Этот вывод был получен в работах [9, 10] на основе анализа особенностей поверхности геоида. Фактически это смещение направлено вдоль линии центров плит ФП—ЮА (см. рисунок).

Результаты работы указывают на глобальную асимметрию в строении литосферы и других оболочек Земли. Свойства этой асимметрии должны учитываться при проведении геодинамических исследований и при интерпретации данных геологических, геофизических и астрономических наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам 93-05-9945 и 95-05-15638а.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баркин Ю. В. // Вести. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 6. С. 89 (Moscow University Phys. Bull. 1995. N 6. P. 87.)
2. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М., 1983.
3. Wang S., Li R. // Acta Seismol. Sinica. 1992. 5, N 1. P. 87.
4. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Природа тектонической активности Земли // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М., 1993. Т. 12.
5. Minster J. B., Jordan T. H. // J. Geophys. Res. 1978. 83, N B11. P. 5331.
6. Баркин Ю. В. // Тез. докл. Междунар. конф. «Общепланетарные проблемы исследования Земли» (15—18 нояб. 1994). Казань, 1994. С. 1.
7. Пудовкин И. М., Валуева Г. Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 1967. 7, № 5.
8. Dziewonski A. M., Morelli A. // Nature. 1987. 325, N 6106. P. 678.
9. Kaula W. A. // SAO Sp. Report. 1967, July. N 246.
10. Kozai Y. // SAO Sp. Report. 1969, Febr. N 295.

Поступила в редакцию  
04.01.95