

ратуру. Анализ многих конвективных течений показал, что турбулентный режим определяется аттрактором малой размерности ($2,5 < \nu < 6$) (4).

Полученные результаты позволяют также сделать вывод, что быстрые изменения состояния озера описываются его термодинамическим потенциалом с особенностью типа элементарной функции катастроф A_{+5} .

В результате проведенного анализа показано, что для озер рассматриваемого типа возможна классификация вертикальных профилей температуры, которая определяется тепловым состоянием озера. Эта классификация в озерах обычного типа (без геотермальных донных источников) необязательна. Выполненная работа подчеркивает, что ведущим звеном в формировании теплообмена в исследуемом озере является его связь с общей геотермальной системой Узон-Гейзерной кальдеры, а следовательно, геотермальные источники на дне озера формируют тепловой режим озера в большей степени, чем его взаимодействие с атмосферой.

Приведенная в статье классификация распределений $T(z)$ показывает, что состояние геотермального озера может быть описано с привлечением теории катастроф (для термодинамического потенциала озера может быть использована функция элементарной катастрофы A_{+5}).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов Г. А. В кальдере вулкана. Новосибирск, 1980.
2. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. М., 1984. Т. 1, 2.
3. Павлов С. В. Методы теории катастроф в исследовании фазовых переходов. М., 1993.
4. Ахромеева Т. С., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Самарский А. А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М., 1992.
5. Пастухов Д. Ф. Метод эквивалентной струи для описания развитой турбулентной области температурного поля, порожденной взаимодействием нескольких конвективных струй: Деп. ВИНТИ № 934-В94. М., 1994.

Поступила в редакцию
17.03.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 6

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.93; 551.24; 521.937

ДВИЖЕНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ КАК МЕХАНИЗМ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГЕОПОТЕНЦИАЛА И ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Ю. В. Баркин

(ГАНШ)

На основе простой модели литосферных плит в виде неизменяемых, однородных и тонких сферических оболочек с заданной постоянной толщиной, абсолютное движение которых описывается кинематической теорией АМО-2, определены вековые вариации коэффициентов второй гармоники геопотенциала и вращения Земли. Показано, что вследствие перераспределения масс по конструктивным и деструктивным границам плит полюс оси вращения Земли смещается со скоростью $0,331''$ за век вдоль меридиана с западной долготой $32,073^\circ$.

1. Модель литосферных плит и их движения

Надежно установленное в настоящее время движение литосферных плит определяет глобальную перестройку масс Земли, прежде всего в самой литосфере, а также в других мантийных оболочках. Эта медленная перестройка масс порождает временные вариации гравитационного поля Земли и влияет на ее вращение и на геодинамические процессы. Изучение указанных вариаций и сопутствующих им эффектов представляет собой важную задачу геодинамики.

Цель данной работы — на основе принятой модели движения литосферных плит оценить вековые вариации коэффициентов второй гармоники геопотенциала, обусловленные движением каждой из плит по отдельности, и их суммарный эффект, а также определить соответствующие этим вариациям параметры векового движения полюса оси вращения Земли.

Согласно основным положениям глобальной тектоники литосфера Земли (упругий жесткий наружный слой) разделена на отдельные плиты — жесткие тонкие оболочки с определенными контурами, соответствующими узким поясам сейсмичности. Границы плит бывают трех типов: 1) конструктивные — границы наращивания плит; 2) деструктивные — границы поглощения плит; 3) границы скольжения, связанные с трансформными разломами [1, 2].

В данной работе для изучения указанных выше геодинамических эффектов мы предлагаем наиболее простую модель плит: 1) плиты P_σ ($\sigma=1, 2, \dots, N$) рассматриваются как тонкие, сферические, однородные оболочки с неизменными контурами, характерными для данной эпохи; 2) океанические и материковые участки плит имеют одинаковые фиксированные эффективные толщины $H=60$ км и плотность $\rho=3,3$ г/см³; 3) абсолютные движения плит в гринвичской земной системе координат $Sx'y'z'$ представляют собой сферические движения, которые задаются кинематической теорией абсолютного движения плит АМО-2 [3] (численными значениями компонент $\Omega_{ox}, \Omega_{oy}, \Omega_{oz}$ вектора угловой скорости Ω_σ каждой плиты P_σ в данную эпоху по отношению к системе координат $Sx'y'z'$). Движение окружающих плиты масс в данной работе не рассматривается.

Несмотря на свою простоту, данная модель фактически учитывает важное наблюдаемое явление в тектонике плит, а именно их подвиг и надвиг по зонам субдукции. Эти области являются глубоко иррегулярными, на что указывают данные сейсмических и гравиметрических наблюдений (поддвигаемые плиты клином входят в астеносферу, погружающиеся их концы имеют конечные размеры до 300–700 км, в зонах субдукции нарушаются принципы изостазии [2]). Кроме того, некоторые теоретические исследования указывают на уплотнения масс на глубинах 640 км в районах зон субдукции Тихого океана [4]. Это же подтверждается и глобальными особенностями геоида, а именно его «вздутиями» в районах Филиппинского архипелага и Южной Америки [2].

В зонах срединно-океанических хребтов сопряженные плиты расходятся и в то же время образующаяся между ними область заполняется вновь поступающим мантийным веществом. Эти области также имеют характерные сейсмические и гравитационные особенности, однако выраженные более слабо, чем аналогичные особенности зон субдукции. Также отметим, что молодая океаническая плита (или соответствующие участки плит) имеет малую мощность, а массы сопряженных заходящих участков плит расходятся строго в противоположных

направлениях симметрично относительно направляющих соответствующих хребтов [1, 2].

Отмеченные выше особенности движения плит означают, что основные изменения динамического строения Земли обусловлены аккумуляцией поступающих масс океанических плит в зонах субдукции и их окрестностях.

Рассматриваемая в данной работе модель плит и их движения учитывает основные из описанных выше явлений (в первую очередь наложение плит по зонам субдукции), в связи с чем она представляет важный интерес для предварительного изучения вариаций коэффициентов второй гармоники геопотенциала и вращения Земли. В последующих работах, тем не менее, мы планируем отдельно изучить роль зон субдукции для указанных вековых вариаций на основе других моделей плит и их движения.

Подчеркнем, что в данной работе не рассматриваются механизмы, порождающие движение самих плит. Движение плит предполагается известным и заданным на данную эпоху кинематической моделью АМО-2.

В дальнейшем будем рассматривать движение 10 основных плит, используя для них следующие сокращенные обозначения: АФ — Африканская плита, ЕА — Евразийская, ТО — Тихоокеанская, ИН — Индийская, СА — Северо-Американская, ЮА — Южно-Американская, АН — Антарктическая, АР — Аравийская, КО — Кокос, НА — Наска.

Для вычисления вековых вариаций коэффициентов геопотенциала была решена промежуточная задача по вычислению компонент тензора инерции каждой отдельной плиты в земной системе координат $Sx'y'z'$. Для этого использовался метод трапеций [5], согласно которому каждая из плит аппроксимировалась определенным набором трапеций (всего 88 трапеций). Для анализа возможных ошибок вычислений были введены формальные погрешности в значения толщин каждой из трапециевидных ячеек плит, составляющие 5%.

Результаты данной работы показали, что для принятой модели движения плит вековое движение полюса Земли в основном объясняется горизонтальными тектоническими движениями литосферных плит.

2. Вариации коэффициентов второй гармоники геопотенциала

Вследствие медленных сферических движений плит P_σ ($\sigma=1, 2, \dots, 10$) в рамках принятой модели коэффициенты второй гармоники геопотенциала испытывают вековые изменения со скоростями [5]

$$C_{nm}^{\sigma} = \sum_{\sigma=1}^{10} C_{nm}^{\sigma}, \quad \dot{S}_{nm}^{\sigma} = \sum_{\sigma=1}^{10} \dot{S}_{nm}^{\sigma} \quad (n=2; m=0, 1, 2), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{C}_{20}^{\sigma} &= 3(D_{\sigma}\Omega_{\sigma x} - E_{\sigma}\Omega_{\sigma y})/(mR^2), \\ \dot{C}_{22}^{\sigma} &= (D_{\sigma}\Omega_{\sigma x} - 2F_{\sigma}\Omega_{\sigma z} + E_{\sigma}\Omega_{\sigma y})/(2mR^2), \\ \dot{C}_{21}^{\sigma} &= [F_{\sigma}\Omega_{\sigma x} + (A_{\sigma} - C_{\sigma})\Omega_{\sigma y} - D_{\sigma}\Omega_{\sigma z}]/(mR^2), \\ \dot{S}_{21}^{\sigma} &= [(C_{\sigma} - B_{\sigma})\Omega_{\sigma x} - F_{\sigma}\Omega_{\sigma y} + E_{\sigma}\Omega_{\sigma z}]/(mR^2), \\ \dot{S}_{22}^{\sigma} &= [-E_{\sigma}\Omega_{\sigma x} + D_{\sigma}\Omega_{\sigma y} + (B_{\sigma} - A_{\sigma})\Omega_{\sigma z}]/(2mR^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь \dot{C}_{nm}^σ , \dot{S}_{nm}^σ — вариации, обусловленные влиянием движением отдельной плиты с индексом σ ; A_σ , B_σ , C_σ и F_σ , E_σ , D_σ — осевые и центробежные моменты инерции плиты P_σ ; $\Omega_{\sigma x}$, $\Omega_{\sigma y}$ и $\Omega_{\sigma z}$ — компоненты угловой скорости вращения плиты P_σ в гринвичской системе координат $Cx'y'z'$, в которой построена кинематическая модель движения плит Минстера—Джордана АМО-2; m и R — масса и радиус Земли.

Вековые вариации коэффициентов геопотенциала, обусловленные движением литосферных плит (1 ед. = 10^{-9} (1/Т), Т — век)

Плита	\dot{C}_{20}^σ	\dot{C}_{22}^σ	\dot{C}_{21}^σ	\dot{S}_{21}^σ	\dot{S}_{22}^σ
АФ	$-0,125 \pm 0,035$	$-0,133 \pm 0,019$	$0,556 \pm 0,061$	$0,091 \pm 0,046$	$0,287 \pm 0,035$
ЕА	$0,069 \pm 0,021$	$0,036 \pm 0,010$	$-0,381 \pm 0,061$	$0,018 \pm 0,019$	$-0,150 \pm 0,037$
ТО	$0,154 \pm 0,083$	$0,605 \pm 0,062$	$-0,687 \pm 0,159$	$-0,190 \pm 0,133$	$-0,618 \pm 0,140$
ИН	$-1,261 \pm 0,075$	$0,078 \pm 0,031$	$0,026 \pm 0,111$	$1,000 \pm 0,143$	$-0,459 \pm 0,062$
СА	$-0,123 \pm 0,026$	$-0,013 \pm 0,004$	$-0,364 \pm 0,100$	$-0,061 \pm 0,011$	$0,111 \pm 0,008$
ЮА	$-0,231 \pm 0,014$	$-0,062 \pm 0,007$	$0,123 \pm 0,026$	$-0,082 \pm 0,018$	$-0,029 \pm 0,010$
АН	$-0,001 \pm 0,017$	$-0,017 \pm 0,006$	$-0,169 \pm 0,031$	$0,085 \pm 0,018$	$-0,028 \pm 0,035$
АР	$0,086 \pm 0,004$	$-0,039 \pm 0,003$	$0,022 \pm 0,006$	$0,062 \pm 0,008$	$-0,011 \pm 0,004$
КО	$0,152 \pm 0,008$	$0,036 \pm 0,003$	$0,072 \pm 0,050$	$-0,237 \pm 0,017$	$-0,069 \pm 0,010$
НА	$0,068 \pm 0,007$	$-0,032 \pm 0,004$	$-0,233 \pm 0,053$	$-0,036 \pm 0,007$	$-0,295 \pm 0,021$

В таблице представлены расчетные значения вековых вариаций коэффициентов геопотенциала, обусловленных движением каждой из 10 основных плит. Как уже отмечалось, соответствующие значения компонент тензоров инерции плит, фигурирующих в формулах (1), (2), были рассчитаны методом трапеций (всего для аппроксимации плит использовалось 88 трапеций). Средняя толщина всех плит принималась одинаковой — 60 км, а средняя плотность — 3,3 г/см³. Приведенные в таблице формальные погрешности определяют области изменений значений вековых вариаций коэффициентов геопотенциала при независимых изменениях толщин каждой из трапециевидных ячеек на 5%.

По значениям вековых вариаций из таблицы находим суммарные значения вековых вариаций коэффициентов второй гармоники геопотенциала, обусловленные движением всех плит:

$$\dot{C}_{20} = (-1,344 \pm 0,291) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T}, \quad \dot{C}_{22} = (0,457 \pm 0,152) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T},$$

$$\dot{S}_{21} = (0,651 \pm 0,416) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T}, \quad \dot{C}_{21} = (-1,039 \pm 0,610) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T},$$

$$\dot{S}_{22} = (-1,261 \pm 0,360) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T}. \quad (T — \text{век}). \quad (3)$$

Из выполненных расчетов следует, что определяющую роль в вариациях параметров гравитационного поля Земли \dot{C}_{20} , \dot{S}_{21} , \dot{S}_{22} играет движение Индийской плиты. Вариации \dot{C}_{22} , \dot{S}_{21} , \dot{S}_{22} в значительной степени определяются движением Тихоокеанской и Африканской плит.

3. Движение плит как возможный механизм векового движения полюса Земли

Вековое перераспределение масс Земли приводит к вековому движению ее полюса, что в первую очередь определяется вековыми вариациями

циями произведений инерции Земли или коэффициентов геопотенциала C_{21} , S_{21} . Аналитические формулы, описывающие указанный эффект, были получены для модели слабдеформируемой Земли в работах автора [6, 7]. В этой модели мантия Земли рассматривалась как эластичное тело, деформируемое вращением, а ее литосферная оболочка — как тело, динамическое строение которого испытывает вековые изменения.

Пусть $Cxyz$ — главные центральные оси инерции изменяемой Земли в определенную эпоху, ω — вектор угловой скорости вращения осей $Cxyz$ по отношению к осям координат, связанным с постоянным вектором кинетического момента вращательного движения Земли, рассматриваемой как изолированное тело (т. е. здесь пренебрегается механическими воздействиями других небесных тел). Через p , q и r обозначим проекции вектора ω на оси координат Cx , Cy и Cz соответственно. Положение полюса оси вращения Земли P_0 можно определить направляющими косинусами: $x_0 = p/\omega$, $y_0 = q/\omega$ (ω — величина угловой скорости Земли).

В результате решения дифференциальных уравнений вращательного движения слабдеформируемого тела в переменных Андуайе и в переменных Эйлера в работе [6] был выявлен следующий эффект. Вследствие медленного векового изменения динамического строения Земли средний полюс P_0 вектора угловой скорости ω совершает вековое движение со скоростью v_0 , компоненты которой по осям Cx и Cy определяются формулами

$$v_{\omega x} = \dot{x}_0 = \frac{n_g}{I_{n1}} \dot{C}_{21}^p, \quad v_{\omega y} = \dot{y}_0 = \frac{n_g}{I_{n1}} \dot{S}_{21}^p. \quad (4)$$

Здесь $I = C/(mR^2)$ — безразмерный момент инерции, n_l и n_g — частоты невозмущенного вращательного движения Земли, C — полярный момент инерции Земли.

В формулах (4) \dot{C}_{21}^p , \dot{S}_{21}^p — вековые вариации коэффициентов геопотенциала, определенные в главных центральных осях инерции $Cxyz$. Они определяются через коэффициенты C_{21} , S_{21} (вычисленные в гринвичской системе координат $Cx'y'z'$) по формулам [7]:

$$\dot{C}_{21}^p = \dot{C}_{22} \cos \gamma - \dot{S}_{21} \sin \gamma, \quad \dot{S}_{21}^p = \dot{C}_{21} \sin \gamma - \dot{S}_{21} \cos \gamma, \quad (5)$$

где $\gamma = 14,5^\circ$ — угол между главной осью Cx и соответствующей экваториальной гринвичской осью Cx' .

По формулам (5) и по значениям C_{21} , S_{21} из (3) находим

$$\dot{C}_{21}^p = (-1,164 \pm 0,693) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T}, \quad \dot{S}_{21}^p = (0,374 \pm 0,111) \cdot 10^{-9} \frac{1}{T}. \quad (6)$$

Соответствующие (6) значения компонент вековой скорости движения полюса P_0 составляют

$$v_{\omega x} = (0,315'' \pm 0,187'') \frac{1}{T}, \quad v_{\omega y} = (0,101'' \pm 0,030'') \frac{1}{T}$$

и определяют вековое движение среднего полюса оси вращения Земли со скоростью $v_0 = 0,331'' (1/T)$ вдоль меридиана с западной долготой $\lambda_0 = 32,073^\circ$ (в гринвичской системе координат).

Полученные выше параметры векового движения полюса Земли являются близкими к их значениям, полученным на основе наблюдений [8]. Некоторое расхождение в значении λ_0 может быть связано с неточностями в аппроксимациях плит системами трапеций, а также с особенностями учета масс, поступающих в зонах срединно-океанических хребтов. В связи с этим желательно отдельное исследование на базе других модельных задач влияния этих особенностей, а также, как уже отмечалось, исследование влияния погружения океанических плит по зонам субдукции.

Тем не менее полученные результаты означают, что рассматриваемое здесь движение плит (с позиций предложенной модели) является определяющим механизмом для наблюдаемого векового движения полюса Земли, а возможные другие механизмы движения полюса (изменения уровня Мирового океана и ледовых покровов Гренландии, Антарктиды, ледников и др. [8]), видимо, должны рассматриваться как уточняющие и дополняющие основной эффект.

Автор выражает благодарность С. К. Татевян и проф. С. А. Ушакову за внимание к работе и полезное обсуждение.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Глобальная эволюция Земли. М., 1991.
2. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Природа тектонической активности Земли // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М., 1993. Т. 12.
3. Minster J. B., Jordan T. H. // J. Geophys. Res. 1978. 83, N B11. P. 5331.
4. Shiren W., Ruihao Li // Acta Seismologica Sinica. 1992. 5, N 1. P. 87.
5. Баркин Ю. В. // Астрон. цирк. 1994. № 1556. С. 31.
6. Баркин Ю. В. // Тез. докл. Междунар. конф. «Современные проблемы теоретической астрономии» (22—24 июня 1994 г.). С.-Пб., 1994. Т. 2. С. 14.
7. Баркин Ю. В. // Астрон. цирк. 1994. № 1556. С. 33.
8. Mueller I. I., Zerbini S. (Eds.) / Lecture Notes in Earth Sciences. V. 22: The Interdisciplinary Role of Space Geodesy. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989. P. 18—22.

Поступила в редакцию
04.01.95