АСТРОНОМИЯ

УДК 521.9, 521.93

К ОБЪЯСНЕНИЮ ПАЛЕОМИГРАЦИИ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Ю. В. Баркин

(*ГАИШ*)

Дано объяснение наблюдаемой палеомиграции полюса Земли в современную геологическую эпоху. Показано, что основной причиной медленного дрейфа полюса является глобальный тектонический процесс и сопровождающие его геодинамические процессы субдукции и аккумуляции масс океанических плит вдоль Тихоокеанского пояса.

Проблема изучения векового движения (дрейфа) полюса оси вращения Земли относительно ее поверхности (или тела Земли) представляет собой одну из центральных проблем геодинамики и астрометрии, которая активно изучается в течение многих лет (см., напр., [1]).

Уже примерно 100 лет скорость дрейфа определяется астрометрическими и геодезическими методами, а в последнее двадцатилетие — методами космической геодезии, использующими лазерные измерения дальностей до специальных геодезических спутников Лагеос, Эталон и др. [2].

С современным движением полюса тесно связана палеомиграция полюса Земли на геологических интервалах времени (десятки миллионов лет). Изучение миграции полюса опирается на палеомагнитные данные, причем используется допущение, что палеомагнитная ось и ось вращения Земли в среднем (на геологических интервалах времени) совпадают [3]. Интерпретация данных астрометрических и палеомагнитных измерений заметно усложняется из-за движения литосферных плит, на поверхности которых производятся соответствующие наблюдения. Движение плит можно рассматривать либо в средней литосферной системе координат, либо в системе координат, связанной с горячими точками (ее также называют мантийной системой координат) [4]. Современные исследования, в частности изучение и моделирование плюмов и горячих точек, свидетельствуют о том, что указанные системы координат и ось вращения Земли определенным образом движутся относительно друг друга [5].

Данные о движении полюса оси вращения Земли (в мантийной системе координат), полученные различными авторами с помощью астрометрических и палеомагнитных методов, указывают на то, что в современную эпоху палеомиграционное движение полюса составляет лишь часть его наблюдаемого дрейфа. Эти данные можно интерпретировать так. Самым медленным движением полюса, совершающимся в течение миллионов лет, является его палеомиграция. Характерная угловая скорость этого движения составляет $0{,}1^\circ \div 0{,}5^\circ$ за миллион лет. На это медленное геологическое движение полюса накладываются более быстрые долгопериодические изменения (с периодами в сотни тысяч лет и характерными скоростями порядка 1° за миллион лет). Если первое из указанных движений обусловлено глобальным тектоническим процессом, то второе — геодинамическими процессами в гидро-ледовой оболочке Земли.

Теоретические исследования показывают, что вековое движение полюса вызвано перераспределением масс деформирующейся Земли, которое приводит к вариациям центробежных моментов инерции Земли или соответствующих им коэффициентов геопотенциала C_{21}, S_{21}. В работах [6, 7] дано аналитическое описание вековых эффектов во вращательном движении небесного тела с деформируемой внешней оболочкой. В соответствии с этими работами основные составляющие скорости дрейфа полюса по осям координат Cx_0, Cy_0 определяются простыми формулами:

$$\dot{p} = \omega\Big(\frac{\omega}{\Omega}+1\Big)\frac{\dot{C}_{21}}{I}, \quad \dot{q} = \omega\Big(\frac{\omega}{\Omega}+1\Big)\frac{\dot{S}_{21}}{I}. \qquad (1)$$

Здесь ω и Ω — частоты чандлеровского невозмущенного движения тела ($\omega + \Omega$ — частота суточного вращения Земли), $I = C/mR^2$ — безразмерный момент инерции (C, m и R — полярный момент инерции, масса и средний радиус Земли); $\dot{C}_{21}$, $\dot{S}_{21}$ — вековые вариации коэффициентов геопотенциала C_{21}, S_{21}. Движение полюса со скоростями (1) отнесено к главным центральным осям инерции тела для данной эпохи Cx_0, Cy_0, Cz_0. Вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ описывает вращение именно этой системы координат. Вариации $\dot{C}_{21}$, $\dot{S}_{21}$ тоже вычисляются в системе координат $Cx_0y_0z_0$.

Таким образом, смещение полюса оси вращения вследствие медленного изменения динамического строения тела происходит с угловой скоростью ν_ω вдоль меридиана λ_ω:

$$\nu_\omega = \Big(\frac{\omega}{\Omega}+1\Big)\frac{\sqrt{\dot{C}_{21}^2+\dot{S}_{21}^2}}{I}, \quad \lambda_\omega = \operatorname{arctg}\Big(\frac{\dot{S}_{21}}{\dot{C}_{21}}\Big). \qquad (2)$$

Поскольку по строению Земля близка к осесимметричному телу, то формулы (1), (2) сохраняют свой вид, если в качестве основной принимается гринвичская система координат. В этом случае λ_ω — грин-

вичская долгота, а вариации $\dot{C}_{21}$, $\dot{S}_{21}$ определены также в гринвичской системе координат.

В настоящей работе изучено, как влияют на движение полюса глобальные тектонические процессы, а именно движение плит, их субдукция и аккумуляция масс океанических плит, погружающихся вдоль зон субдукции. Роль и вклады других геодинамических процессов в движение полюса могут быть изучены независимо. Цель данной работы — объяснить палеомиграцию полюса Земли в современную геологическую эпоху.

В работе [8] отмечается, что методом сейсмической томографии обнаруживается наличие избыточных масс вдоль зон субдукции на глубинах $350 \div 550$ км. Избыток масс в зонах субдукции обусловлен пододвиганием под вулканические дуги относительно холодного вещества океанической литосферы, которое вытесняет вверх горячее мантийное вещество. Авторы работы [9] связывают глобальные структуры, выявленные в мантии методом сейсмической томографии, с аккумуляцией погружающихся вдоль зон субдукции блоков океанических плит. Кольцо областей с повышенными сейсмическими скоростями, окружающих Тихий океан, обусловлено субдукцией и аккумуляцией масс на глубинах около 1000 км. Отмечается, что этот процесс происходит в течение последних 200 миллионов лет.

Анализ глобального строения оболочек Земли четко указывает на их несбалансированность [10]. Весьма больших значений достигают смещения центров масс оболочек, на значительные углы повернуты их главные центральные оси инерции, что определяется большими значениями центробежных моментов инерции оболочек. Указанная асимметрия динамических оболочек, конечно, формировалась в течение геологических периодов времени.

Другими словами, массы, аккумулируемые вдоль зон субдукции на геологических интервалах времени, не были полностью изостатически компенсированы, а продолжали накапливаться с определенной интенсивностью миллионы лет. Определение интенсивности процесса аккумуляции масс вдоль зон субдукции важно для количественного описания палеомиграции полюса.

Замечание. Накопление масс вдоль определенных зон внешней оболочки Земли сопровождается малыми относительными смещениями верхней мантии, нижней мантии и других оболочек Земли и приводит к изменению положения центра масс Земли (например, по отношению к центру масс жидкого ядра) и к вариациям компонент тензора инерции Земли и коэффициентов геопотенциала. Относительные поступательные и вращательные смещения оболочек приводят к наблюдаемым вариациям вулканической и сейсмической активности, вызывают изменения в процессах рифтогенеза и в глобальном тектоническом процессе, изменения уровня океана, определяют вариации гравитационного и магнитного полей Земли и имеют геодинамические последствия в суточном вращении Земли, в движении ее полюсов и т. п.

В работах [6, 7, 11] на основе известных теорий абсолютного и относительного движения литосферных плит впервые были оценены вековые вариации положения центра масс Земли и компонент его тензора инерции, обусловленные аккумуляцией масс океанических плит, погружающихся в зонах субдукции. В этих работах фактически получены верхние оценки для вариаций компонент тензора инерции Земли и координат ее центра масс.

Основной результат работ [6, 7, 11] состоит в том, что впервые была показана определяющая роль тектонических процессов (движения плит, субдукции и аккумуляции масс плит вдоль зон субдукции) в палеомиграции полюса Земли. В работах [6] и [7] были предложены два метода определения вариаций моментов инерции Земли, обусловленных механизмом субдукции и аккумуляции масс.

Первый из них основывается на аналитическом описании «эффекта наложения плит» вдоль зон субдукции и опирается на кинематическую теорию абсолютного движения плит. Второй, более прямой метод использует анализ поступления масс по всем зонам субдукции. Определение вариаций компонент тензора инерции здесь сводится к приближенному вычислению объемных интегралов по зонам субдукции. При этом используются известные данные о мощности погружающейся литосферы ($H = 80$ км), ее средней плотности ($\rho = 3{,}3$ г/см^3), а также параметры кинематической теории относительного движения плит [12].

Долю аккумулируемой массы по отношению ко всем погружающимся массам в зонах субдукции назовем коэффициентом интенсивности аккумуляции масс i_a. Оценки этого параметра были получены двумя методами. Первый из них использует анализ параметров модели несферичных оболочек Земли и оболочек ее неоднородностей [10]. Согласно этому подходу, были оценены моменты инерции оболочки, сформированной аккумулируемыми массами. В результате было установлено, что аккумуляции подвержена лишь часть ($i_a \approx 1/3$) всех поступающих к зонам субдукции масс океанических плит, а основная их часть активно участвует в глобальных перемещениях и деформациях (в конвективных мантийных движениях, увлекается глобальным вращением литосферы и т. д.). Коэффициент i_a был найден при предположении, что рассматриваемый процесс формирования оболочки аккумулируемых масс происходил с постоянной интенсивностью на протяжении последних 43 млн лет [10]. Основанием к этому, в частности, послужили известные данные о характере изменения полярного момента инерции Земли и ее динамического сжатия в указанный геологический период [13].

Другая оценка параметра i_a была получена из анализа родственного геодинамического явления — дрейфа центра масс Земли на геологических интервалах времени [11], который можно также трактовать как смещение центра масс жидкого ядра относительно центра масс Земли. При этом смещении изменяется относительная скорость вращения мантии и

ядра. Из закона сохранения кинетического момента системы мантия-ядро следует, что вращение ядра, наблюдаемое по западному дрейфу магнитного поля, сформируется при смещении его центра масс на расстояние около 3,6 км от центра масс Земли. Соответствующее смещение действительно имеет место, если интенсивность аккумуляции масс субдуцируемых плит за последние 43 млн лет характеризуется величиной $i_a \approx 1/3{,}01$ [10]. Несмотря на простоту предложенных моделей оболочек Земли и их движения полученные оценки параметра i_a приблизительно совпадают.

Приведем окончательные значения вариаций, вычисленные по методике [6] для коэффициента $i_a \approx 3{,}3$:

$$\begin{aligned} \dot{C}_{21} &= -0{,}297 \cdot 10^{-9}\ (\text{век})^{-1}, \\ \dot{S}_{21} &= -0{,}444 \cdot 10^{-9}\ (\text{век})^{-1}. \end{aligned} \tag{3}$$

Подставляя значения (3) в формулы (1), (2), находим, что полюс оси вращения Земли смещается со скоростью $\nu_\omega = 0{,}40°$ за миллион лет вдоль меридиана $\lambda_\omega = 56{,}2°$ з. д. Найденные параметры хорошо согласуются с их значениями, полученными палеомагнитными методами [14]: $\nu_\omega = 0{,}56°$ за миллион лет вдоль меридиана $\lambda_\omega = 40°$ з. д.

Отметим также, что вследствие указанного процесса перераспределения масс Земли ее центр масс смещается на геологических интервалах времени со скоростью 8,5 мм·(век)$^{-1}$ по направлению к географической точке с координатами 15° с. ш., 168° в. д., что близко к направлению на магнитный центр Земли [10, 11].

Таким образом, палеомиграция полюса в современную геологическую эпоху получает объяснение как по величине, так и по направлению. Ее основной причиной является глобальный тектонический процесс и сопровождающие его геодинамические процессы субдукции и аккумуляции масс океанических плит.

В заключение отметим, что в работах [14–16] предложен иной подход к объяснению дрейфа полюса оси Земли, в котором центральное место занимает механизм мантийной конвекции, учитывающий наличие неоднородностей в мантии, особенности геометрии и движения плит, их субдукцию и др. Предложенная в данной работе модель проще и, видимо, понятнее с точки зрения механики. На основе этой модели оказалось возможным оценить вековые вариации коэффициентов первой и второй гармоник геопотенциала и, в частности, выявить новое фундаментальное явление в геодинамике — вековой дрейф центра масс Земли, впервые изученный в работе [11]. Известные данные о процессе субдукции плит в прошлые геологические эпохи позволяют на основе предложенного подхода изучить движение полюса и геоцентра за последние 180 миллионов лет.

Результаты работы также подтверждают, что центр масс жидкого ядра (вместе с нижней мантией) смещается относительно центра масс Земли. Предположение об относительных смещениях центров масс оболочек Земли (в первую очередь верхней мантии и нижней мантии) положено в основу новой геодинамической концепции взаимодействующих и подвижных оболочек Земли, предложенной автором [10]. Выполненные предварительные исследования показали, что основные планетарные явления в сейсмологии, вулканологии, тектонике, во вращении Земли взаимосвязаны во времени (в различных временных шкалах — от дней до миллионов лет) и эти связи обусловлены одним и тем же механизмом — регулярными и иррегулярными относительными поступательными и вращательными смещениями нижней мантии, верхней мантии и других оболочек Земли.

Литература

1. *Подобед В.В., Нестеров В.В.* Общая астрометрия. М.: Наука, 1982.
2. *Eubanks T.M.* // Contributions of Space Geodezy to Geodynamics: Geodynamics Series / Ed. D.F. Smith, D.L. Turcotte. 1984. Vol. 24. P. 1.
3. *Паркинсон У.* Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986.
4. *Argus D.F., Gordon R.G.* // Geophys. Res. Lett. 1991. **18**, No. 11. P. 2039.
5. *Gordon R.G., Livermore R.A.* // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1987. **91**. P. 1049.
6. *Barkin Yu.V.* // Proc. Intern. Conf. «Earth Rotation Reference Systems in Geodynamics and Solar System» (Warsaw, Poland, September 18–20, 1995). Journeés 1995. SRC, PAS, Warsaw, Poland, 1996. P. 159.
7. *Баркин Ю.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 6. С. 89 (Moscow University Phys. Bull. 1995. No. 6. P. 79).
8. *Хаин В.У., Зверев А.Т.* // ДАН СССР. 1991. **219**, № 2. С. 221.
9. *Dziewonski A.M., Ekstrom G.* // Ann. Geophys. 1996. **14**, Suppl. 1. Part I. P. C31.
10. *Баркин Ю.В.* // Тр. конф. «Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера–атмосфера» (Москва, 28–29 ноября 1996). М., 1999. С. 46.
11. *Баркин Ю.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 2. С. 79 (Moscow University Phys. Bull. 1996. No. 2. P. 65).
12. *Ушаков С.А., Галушкин Ю.И.* Литосфера Земли // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М., 1978. Т. 3.
13. *Чебаненко И.И., Федорин Я.В.* // ДАН СССР. 1984. **274**, № 4. С. 907.
14. *Richards M.A., Ricard Y., Lithgow-Bertelloni C., Sabadini R.* // Science. 1997. **275**. P. 372.
15. *Stienberger B., O'Connell R.J.* // Nature. 1997. **387**. P. 169.
16. *Sabadini R., Yuen D.A.* // Nature. 1989. **339**. P. 373.

Поступила в редакцию
06.07.98