

УДК 521.937

Особенности изменения координат полюса Земли

Г. С. Курбасова

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
kurbasovagalina@gmail.com

Поступила в редакцию 5 февраля 2010 г.

Аннотация. Появление особенностей с точками возврата на графиках изменений координат мгновенного полюса Земли (полодиях) рассматривается как результат отображения на плоскость его смещения по поверхности в процессе вращательно-поступательного движения Земли. Обсуждаются результаты качественного и количественного анализа данных о координатах мгновенного полюса Земли. В анализе используются основные положения теории особенностей Уитни и их применение для объяснения бифуркаций положений равновесия на примере машины катастроф Зимана (Арнольд, 1990).

FEATURES OF CHANGE OF COORDINATES OF A POLE OF THE EARTH, by G.S. Kurbasova. Occurrence of features with points of return on diagrams of changes of coordinates Instant pole of the Earth (polhody) are considered as a result of display to a plane of its displacement on a surface in the process of Earth's rotation. Results of the qualitative and quantitative analysis of the data on coordinates of an instant pole of the Earth are discussed. In the analysis substantive provisions of the theory of features Whitney H. and their application for an explanation bifurcation positions of balance on an example of the machine of accidents by Ziman's (Arnol'd, 1990) are used.

Ключевые слова: вращение Земли, движение полюса

1 Введение

Земля представляет собой огромную физическую лабораторию с множеством процессов, механизмы которых недостаточно изучены.

Атмосферные процессы, движения вод Мирового океана, подземных вод и мантийных масс находятся под воздействием солнечного излучения и гравитационных сил. При этом обнаруживается согласованность этих процессов и их влияние на параметры вращения Земли.

На рисунке 1 схематически изображены силы, которые возмущают вращение Земли (Дикке, 1995).

Возмущающее действие внешних сил вызывает изменения земных параметров в допустимых пределах с помощью механизмов обратных связей, что обеспечивает устойчивое функционирование всех систем нашей планеты даже в случае значительных изменений солнечной и космической обстановки. Одной из неотложных задач современной науки является построение математической модели, адекватной реальному процессу вращения Земли. При этом недостаточная информация о

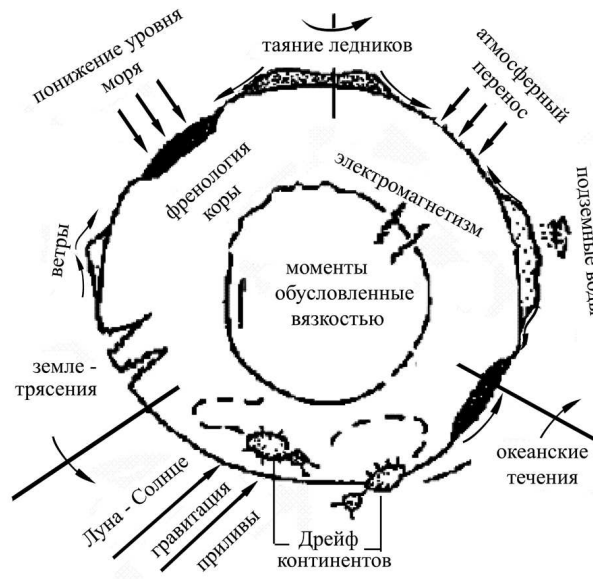


Рис. 1. Схематическая иллюстрация сил, возмущающих вращение Земли

происхождении и механизмах связи внутренних и внешних процессов создает определенные трудности, ограничивающие решение этой задачи в настоящее время.

Современная теоретическая модель вращения Земли основана на применении динамических уравнений Эйлера к решению задачи вращения слабо деформируемой твердой Земли под влиянием различных поверхностных и внутренних напряжений (Хайд и Дикке, 1991).

Фундаментальные уравнения вращения тела (динамические уравнения Эйлера) требуют, чтобы

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{L}, \tag{1}$$

где $\dot{\mathbf{H}}$ – изменение углового момента вращения Земли и \mathbf{L} – сумма моментов, действующих на Землю внешних сил.

Соответствующие динамические уравнения Эйлера, точные в произвольной вращающейся системе отсчета с вектором вращения $\boldsymbol{\omega}$, определяются по формуле:

$$\dot{\mathbf{H}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{L}. \tag{2}$$

В обоих случаях момент импульса определяется

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{I}(t)\boldsymbol{\omega}(t) + \int \mathbf{X}(t) \times \dot{\mathbf{X}}(t)dm, \tag{3}$$

где $\mathbf{I}(t)$ – тензор инерции массы.

Уравнения (2) обычно используется, когда моменты меняются медленно в фиксированной земной системе отсчета (атмосферные возбуждения и проблемы, связанные с колебанием Чандлера). С другой стороны, уравнение (1) обычно используется, когда моменты меняются медленно в инерционном пространстве (например, изучение проблемы прецессии/нутаии).

Основная тенденция в изучении вращения Земли заключается в совершенствовании математической модели таким образом, чтобы ее отклонения от наблюдений становились все меньше и меньше, а теоретические выводы могли быть использованы для объяснения изменений и прогноза параметров вращения Земли. При этом наименее изученными до настоящего времени являются

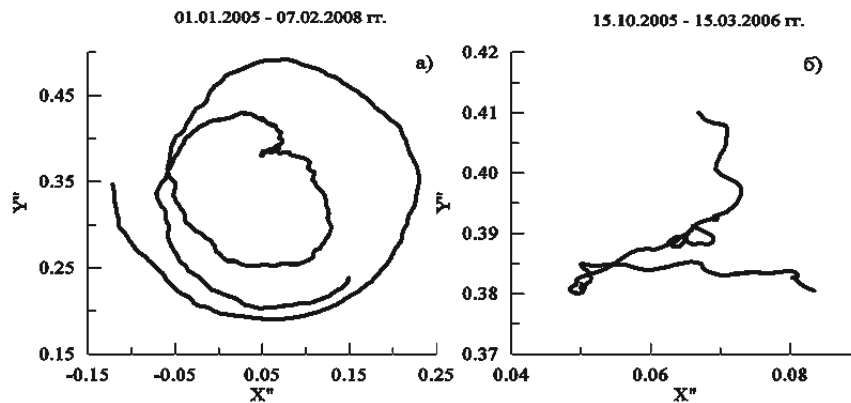


Рис. 2. Нерегулярность движения мгновенного полюса Земли на интервале 2005–2008 гг.: а) полодии на интервале 2005–2008 гг.; б) более детальное изображение движения полюса на интервале аномалии

нерегулярные изменения длительности суток и флуктуации в изменении координат мгновенного полюса Земли.

Возросшая за последние десятилетия точность наблюдений, методов обработки и анализа экспериментальных данных повысила информативность временных рядов координат полюса Земли и отклонений от стандарта (86400 сек) длительности суток. Это приблизило решение задачи происхождения и предсказуемости особенностей наблюдаемых в экспериментальных измерениях параметров ориентации Земли.

В настоящей работе обсуждается возможность применения теории особенностей Уитни (1955) и теории катастроф Арнольда (1990) для объяснения и прогноза некоторых нерегулярных изменений координат полюса Земли.

2 Точки возврата на графиках полодий и теория особенностей Уитни

На рисунке 2 изображены графики изменений координат мгновенного полюса на плоскости с осями X (ось абсцисс) и Y (ось ординат).

Для построения графиков использовались суточные данные о координатах мгновенного полюса за период 2005–2008 гг., публикуемые регулярно Международной службой (IERS).

Такое графическое отображение регулярного движения полюса по поверхности Земли на плоскость принято называть полодиями. Графики полодий, кроме некоторых случаев, имеют вид регулярных кривых. Полодии на рисунке 2 содержат кратковременное отклонение от регулярной кривой (особенность) с точкой возврата (острие).

Аномальное смещение мгновенного полюса на рассматриваемом временном интервале авторы многочисленных публикаций связывают с внешними воздействиями атмосферы, океанов, планет и Луны (Акуленко и др., 2007; Настула и Колачек, 2007; Пономарева, 2008). Автор настоящей работы полагает, что подобные особенности могут и должны появляться в движении полюса Земли как результат закономерного отображения на плоскости его смещения по поверхности Земли. В основе их проявления лежат периодические изменения внешних и внутренних параметров, характеризующих вращательно-поступательное движение Земли. Результаты численных экспериментов и проведенный на их основе качественный анализ согласуются с этим предположением (Курбасова и др., 2009).

В настоящей работе, в дополнение к приведенным ранее доводам, рассмотрим применение теории особенностей Уитни к случаю, изображенному на рисунке 2.

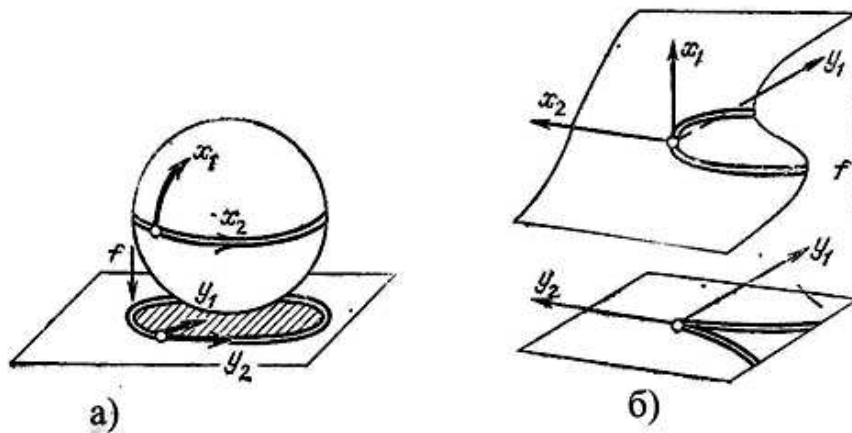


Рис. 3. Два вида особенностей: а) складка проектирования сферы на плоскость; б) сборка проектирования поверхности на плоскость

Уитни показал, что в общем случае (кроме некоторых исключений) при проектировании гладких поверхностей (определены многократно дифференцируемые функции) на плоскость встречаются особенности лишь двух видов: складка проектирования сферы на плоскость и сборка проектирования поверхности на плоскость (см. рис. 3). Эти особенности устойчивы. Все другие особенности разрушаются при малом шевелении тел или направлений проектирования. Более того, Уитни доказал, что всякая особенность гладкого отображения поверхности на плоскость после подходящего малого шевеления рассыпается на складки и сборки. В местах, где проектирования имеют сборки, появляются точки возврата.

Исходя из теории Уитни, точки возврата на графиках изменения положений мгновенного полюса Земли могут рассматриваться как геометрические образы проектирования гладкого (квазипериодического) процесса движения мгновенного полюса по поверхности Земли на плоскость при определенном соотношении между величинами внешних управляющих параметров и внутренних параметров, определяющих вращение Земли вокруг оси. В таком случае появляется возможность предсказывать появление особенностей (Курбасова и др., 2009).

Кроме того, согласно уравнениям (1–3), множественные воздействия на вращение Земли вызывают ряд восстановительных процессов, что влияет на вид траектории возврата на регулярную кривую (см. рис. 2б).

“Сейчас уже многим ясно, что эти сложные колебания могут быть связаны с самим существом дела, могут определяться основными уравнениями задачи, а не случайными внешними воздействиями; они могут и должны изучаться наравне с классическими стационарными и периодическими режимами протекания процессов” (Арнольд, 1990).

Применение теории особенностей к изменению (бифуркации) положений равновесия может быть полезным в качественном анализе механизма, вызывающего “блуждание” полюса по поверхности Земли.

3 Бифуркации положений равновесия и машина катастроф Зимана

Изложим суть проблемы на примере машины катастроф Зимана и сопоставим с тем, что наблюдается в движении полюса Земли.

В теории упругости возможность применения теории особенностей Уитни к исследованию бифуркаций положений равновесия строго обоснованна. Сложность и недостаточная изученность системы Земля ограничивает возможности строгих выводов. Тем не менее, как это часто бывает при обсуждении сложных проблем, правильный выбор ограниченного числа управляющих параметров не только позволяет сделать правильные выводы о работе всей системы, но и получить количественные оценки изменения этих параметров.

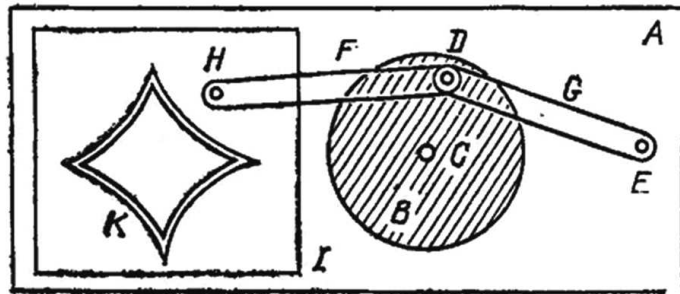


Рис. 4. Машина катастроф Зимана

Одно из простейших приспособлений, демонстрирующих возможности применения теории особенностей для предсказания бифуркаций положений равновесия, называется машиной катастроф Зимана (см. рис. 4). Следуя изложению Арнольда (1990), приведем описание работы машины катастроф Зимана и применение теории особенностей для изучения бифуркаций положений равновесия для этой простой системы.

На рисунке 4 изображен насаженный на ось C подвижный диск B , в точке D которого закрепляются две легко растяжимые ленты F и G . Лента G прикреплена к доске A в точке E . В точке H ленты F закрепляется карандаш.

При движении карандаша диск будет поворачиваться. Причем при некоторых положениях острия карандаша малое изменение его положения способно вызвать “катастрофу”, т. е. скачок диска в новое положение равновесия. Экспериментируя, можно получить кривую катастроф K , которая сама имеет четыре точки возврата.

Состояние машины катастроф может быть описано тремя параметрами: координатами x, y конца карандаша (внешние управляющие параметры) и углом поворота (внутренний параметр системы).

Если все три параметра, описывающие состояние машины катастроф, известны, то определены степени растяжения лент F и G , а следовательно, определена потенциальная энергия всей системы.

В зависимости от значений управляющих параметров потенциальная энергия может иметь несколько минимумов (см. рис. 5).

Скачок происходит при тех значениях управляющих параметров, для которых локальный минимум исчезает, слившись с локальным максимумом (рис. 5, гр. ϵ). Проектируя поверхность равновесия в трехмерном пространстве на плоскость, получаем особенности обоих видов. Проекция точек складок и есть кривая катастроф.

При изменении параметров машины катастроф Зимана автором настоящей работы получены следующие результаты:

- 1) точки возврата на кривой катастроф смещаются при увеличении растяжения лент в состоянии равновесия в направлении, противоположном вращению диска;
- 2) существует верхняя граница растяжения лент, выше которой не наблюдаются бифуркации положений равновесия;
- 3) в момент “скачка” направление вращения диска меняется на противоположное.

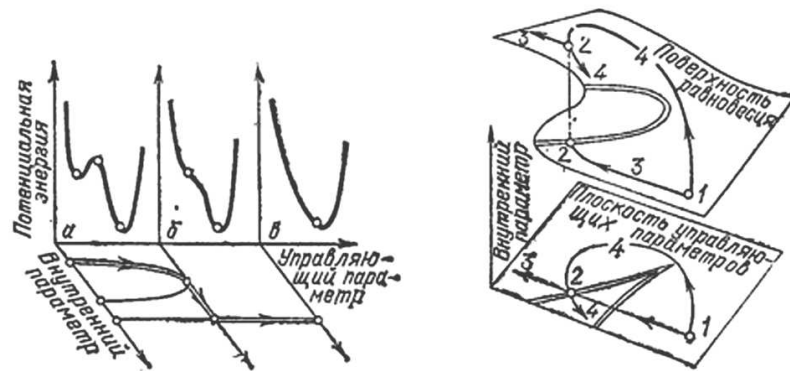


Рис. 5. Потенциальная энергия и поверхность равновесия машины катастроф

4 Смещения полюса Земли

Движение полюса по поверхности Земли отражает динамику системы с множеством степеней свободы, в которой гравитация является определяющей.

В отличие от всех остальных систем (здесь имеются в виду четыре фундаментальных взаимодействия), у которых потенциальная энергия всегда положительна и имеется точка устойчивого равновесия с минимумом потенциальной энергии, даже у простейшей гравитационной системы из двух притягивающих масс (например, Земля – Луна) точки устойчивого равновесия не существует. Если такую систему предоставить самой себе, ее потенциальная энергия будет монотонно стремиться к $-\infty$.

Существование факторов, стабилизирующих “деградацию” энергии, происходящей под действием одной гравитации, изменяет монотонный характер убыли потенциальной энергии. Поэтому функция изменения потенциальной энергии системы Земля имеет относительные максимумы и минимумы.

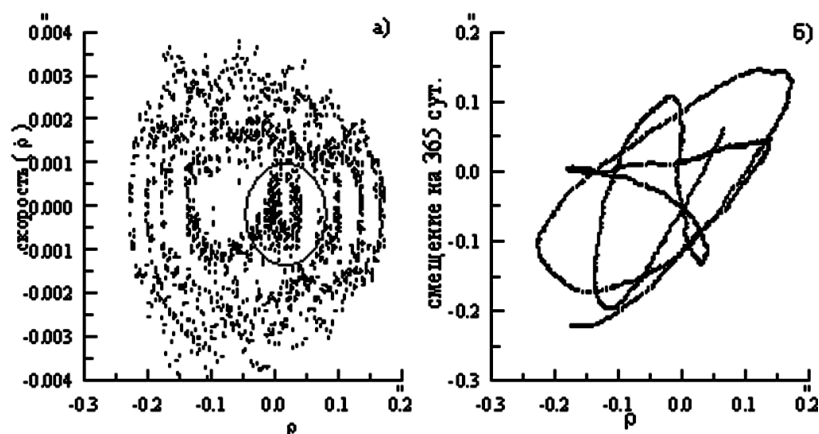


Рис. 6. Движение мгновенного полюса по данным за период 01.01.2003 – 31.12.2006 гг.: а) фазовый портрет; б) отображение Пуанкаре

Отсутствие внутреннего состояния равновесия, асимметрия фигуры и положений Земли на орбите отражаются на движении полюса по поверхности Земли. На фазовой плоскости фазовые кривые огибают две точки устойчивого (в некотором смысле) равновесия. Смещение точки притяжения фазовых кривых показаны на рис. 6.

Изменение положений равновесия при критических соотношениях между управляющими и внутренними параметрами системы сопровождается появлением точек возврата на графиках полодий (Курбасова и др., 2009).

5 Заключение

1. Движение полюса по поверхности Земли сопровождается появлением особенностей с точками возврата при отображении на плоскости изменения координат (полодии).
2. На примере работы машины катастроф Зимана показана возможность и условия возникновения подобных особенностей в детерминированных процессах; их происхождение связано с присутствием процессу закономерностями (в случае движения полюса – с изменением параметров поступательно-вращательного движения Земли), а не случайными внешними воздействиями на систему.
3. Результаты анализа экспериментальных данных (Курбасова и др., 2009) обнаруживают периодичность (~ 32 года) появления особенностей с точками возврата и критические соотношения между характеристиками основных колебаний (годового и чандлеровского).
4. Фазовый портрет движения мгновенного полюса, построенный по экспериментальным данным, обнаруживает две точки притяжения фазовых кривых, что указывает на возможность бифуркаций положений относительного равновесия при движении полюса.

Литература

- Акуленко Л.Д., Кумакшев С.А., Марков Ю.Г., Рыхлова Л.В. // Астрон. журн. 2007. Т. 84. №. 5. С. 471.
- Арнольд В.И. // Теория катастроф. М.: Наука. 1990. С. 128.
- Дикке (Dickey, Jean O.) // Earth Rotation. In Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants/ Ed. T.J. Ahrens. Washington: American Geophysical Union. 1995. P. 356.
- Курбасова Г.С., Корсунь А.А., Рыбалова М.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2009. Т. 105. №. 1. С. 202.
- Настула и Колачек (J. Nastula, Kolaczek B.) // Artificial satellites. V. 42. №. 1. 2007. P. 9.
- Понамарева О.В. // О механизме возмущения периодического движения полюса Земли планетами Солнечной системы. Камчатский государственный университет им. В. Беринга. Петропавловск-Камчатский. 2008. С. 202.
- Уитни (Whitney H.) // Ann. Math. 1955. V. 62. P. 374.
- Хайд и Дикке (Hide R., and Dickey J.O.) // Science. 1991. V. 253. P. 629.