

Создание гармонических моделей динамики полюсов планет на основе спутниковых наблюдений и корреляционно-спектрального подхода

© Р.Р. Мубаракшина,¹ А.О. Андреев,^{1,2} Ю.А. Нефедьев,¹ Н.Ю. Демина¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
e-mail: star1955@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 18 августа 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Рассмотрены вопросы построения динамической модели полюса, позволяющей осуществлять прогнозирование движения полюса. Разработанный для этих целей метод основан на корреляционно-спектральном подходе и регрессионном моделировании. В результате выполнения работы, как практический пример, построены прогнозные значения движения земного полюса.

Ключевые слова: динамика планет, движение полюса, регрессионное моделирование.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59255.384-24

В настоящее время все более актуальным становится моделирование положения тела планетных объектов относительно осей их вращения на различных уровнях точности [1]. Такие исследования необходимы для анализа астрофизических процессов, связанных с уточнением природы полярных вихрей, встречающихся в атмосферах Земли, Марса и спутника Сатурна Титана [2]. При этом масштабы полярных вихрей, вероятно, намного более значительны для экзопланет земной группы, имеющих большие наклоны к плоскости эклиптики. Эти исследования необходимы для изучения приливов от массивных тел, сходных по принципу воздействия для небесных систем различных масштабов — от планетарного до галактического [3]. Особенно важно отметить зависимость динамики движения полюсов планет от процессов, протекающих в жидком ядре и на границе ядро–мантия, и вариаций магнитного поля [4]. Актуальность данного направления подтверждается проявлением аномальных эффектов проникновения солнечного ветра в средних широтах Земли сквозь магнитные силовые линии, которое вызывает сияния, наподобие северных и южных. Параметры вращения планетных объектов также необходимы для высокоточной космической навигации и позиционирования [5]. Так как предсказание движения полюсов является сложной задачей по причине влияния многих планетофизических процессов, предлагается достаточно большой спектр подходов для ее решения [6]. При этом следует отметить, что в отличие от детерминированных моделей регрессионные модели не остаются постоянными по структуре и значениям параметров в течение всего периода использования. После получения прогноза на шаг или несколько шагов дискретности в будущем модель „обновляется“

в соответствии с текущими значениями параметров. Данное свойство является важным для прогнозирования динамики небесных тел, в том числе геофизических систем. В настоящей работе проведено исследование использования корреляционно-спектрального подхода (КСП) для построения гармонической модели полярных и неполярных колебаний. Данный подход является одним из наиболее достоверных для выявления периодических гармоник. В настоящей работе сравниваются наблюдаемая динамическая модель земного полюса (построенная непосредственно на основе данных ОПЕР) и теоретическая прогнозная модель, которая построена как адаптивная гармоническая регрессионная модель (ГРМ), описывающая динамику полюса за 30 лет и представленная как гармонический ряд. Гармонические коэффициенты ГРМ определены из спектрального анализа наблюдений с использованием метода пошаговой регрессии. Данные подходы подробно описаны в работах [7–11]. Используемые в работе наблюдаемые положения полюса Земли, полученные из наземных телескопических наблюдений и спутниковых данных GPS, размещены на сайте International Earth Rotation and Reference System Service https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html (ОПЕР — observed positions of the Earth's pole).

Алгоритм КСП состоит из следующих этапов: строится автокорреляционная функция (АФ), характеризующая спектральную плотность мощности случайного процесса, затем АФ сглаживается с помощью корреляционного окна, далее по спектру определяются периоды и параметры колебаний широты от 1 года до сотен лет. Следующий этап посвящен изучению структурных характеристик колебаний, далее выявляются неявные периоды изменения спектральной плотности в зависимо-

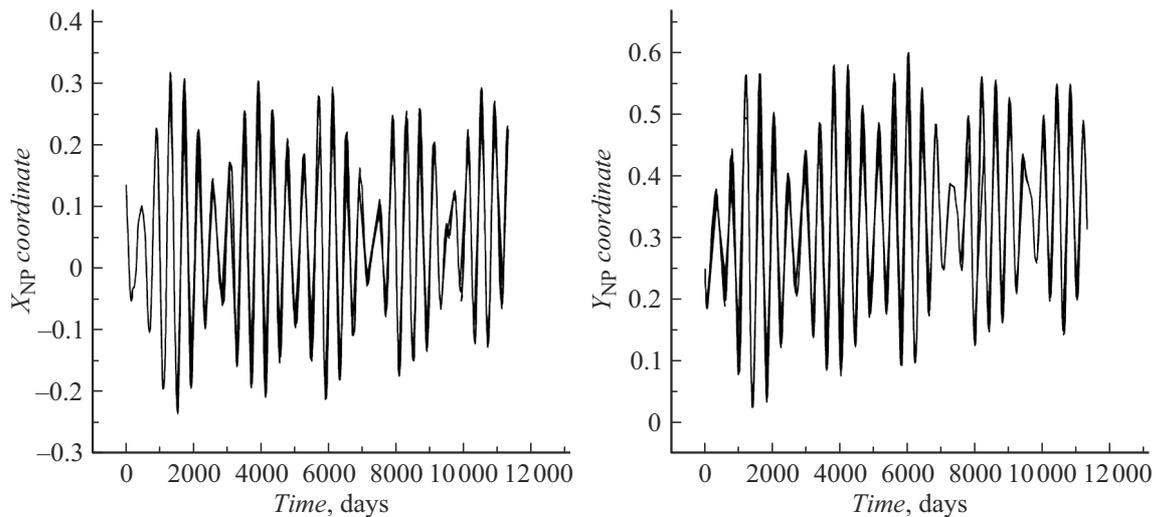


Рис. 1. Вариации динамики земного полюса по координатам X и Y .

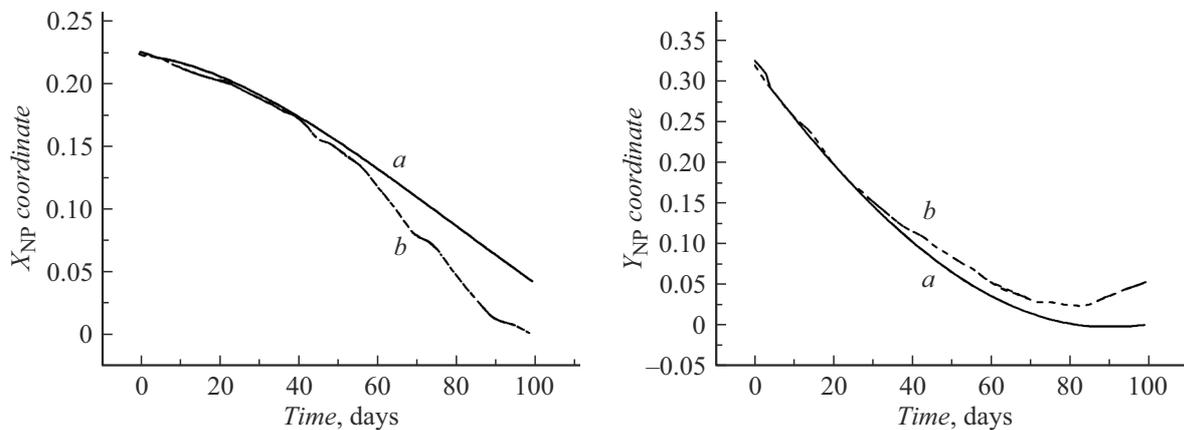


Рис. 2. Сравнительная диаграмма теоретических значений движения полюса (a) и полученных из наблюдений (b) по координатам X и Y .

сти от частотных параметров. В итоге гармонические коэффициенты разложения неполярных колебаний имеют сложную структуру, включающую более 20 всплесков частоты и выраженную дифференциацию спектральной плотности. В качестве верификации и проверки достоверности КСП были получены вариации полярных и неполярных колебаний земного полюса с использованием данных наземных и космических наблюдений. Алгоритм вычислений состоял из следующих этапов:

- 1) формировалось программное спектральное окно для редуцирования неравноточных наблюдений;
- 2) на основе кросс-спектрального метода определялись общие главные гармоники в наблюдениях;
- 3) для нивелирования шумовых составляющих использовался фильтр Калмана;
- 4) проводилась обработка построенной модели для автоматизированного построения наиболее достоверного отклонения полученной наблюдательной модели от прогнозной теоретической модели.

На рис. 1 приведены вариации динамики земного полюса по координатам X и Y . Анализ вариаций координат полюса позволил определить четыре основных гармоники с периодами 492, 444, 377, 363 суток и со значением точности аппроксимации (σ) = 0.1334 и прогнозирования ($\sigma\Delta$) = 0.19. На рис. 2 представлена сравнительная диаграмма линий движения земного полюса по координатам X и Y , полученных на основе наблюдений, и линий движения полюса согласно созданной в работе прогнозной регрессионной теоретической модели.

Судя по рис. 2, можно сделать вывод, что теоретическая модель обеспечивает хорошую точность аппроксимации и прогнозирования в диапазоне 60 дней. Сравнение с диаграммами динамики Северного полюса, полученными другими исследователями, показало, что ГРМ позволяет осуществлять более точное прогнозирование на горизонте 70 дней. Для этого был проведен сравнительный анализ наших прогнозных кривых с данными Naval Observatory USA. Эти данные приведены на диа-

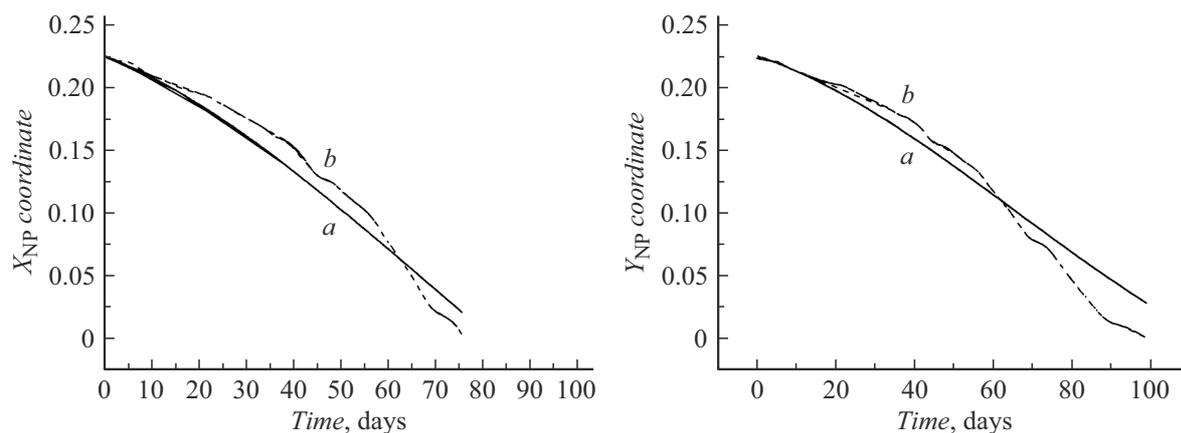


Рис. 3. Диаграммы сравнительного анализа прогнозных кривых (а) с данными Naval Observatory USA (b) по координатам X и Y.

граммах, показанных на рис. 3. Как видно из диаграмм, теоретические прогнозные значения достаточно хорошо согласуются как с наблюдательными данными, так и с результатами, полученными другими исследователями.

В заключение следует отметить, что регрессионное моделирование может быть применено к описанию динамических параметров полюсов планет. Особыми достоинствами примененного в работе подхода для анализа наблюдательных временных рядов являются:

- 1) более широкое представление о структуре регрессионной динамической модели;
- 2) устойчивость во времени гармонических членов разложения полиномиальной модели;
- 3) значительное увеличение точности прогноза, что является важным для решения практических задач [12].

Отсюда можно сделать следующий вывод: применение ГСП подхода позволило получить прогноз динамики земного полюса для временного горизонта от 50 до 80 дней в зависимости от используемых наблюдательных данных. Полученные результаты подтверждают, что применение адаптивных динамических регрессий может быть полезным для моделирования движения полюсов небесных тел. Их преимуществами являются:

- 1) расширение концепции структуры математической модели, описывающей динамику;
- 2) выделение устойчивых по времени гармоник разложения наблюдательного ряда, что может иметь важное практическое значение.

Следует отметить, что работы по прогнозированию динамики полюса необходимы не только для изучения природы полярных вихрей на планетах земной группы, но и теоретически, они могут быть применены и к экзопланетам. Вместе с тем заметное число (а если быть точнее — большая часть) экспериментально обнаруженных экзопланет классифицируются как газовые планеты (горячие и теплые юпитеры, а также газовые гиганты). Газовые гиганты в Солнечной Системе обладают заметно более высокой атмосферной активностью по сравнению с планетами земной группы,

и, скорее всего, газовые экзопланеты также обладают этим свойством. Значит, вариации движения полюсов у таких планет могут приводить к достаточно заметным эффектам. Поэтому в перспективе продолжением наших исследований может стать изучение движения полюсов газовых планет.

Финансирование работы

Выполненные работы поддержаны Российским научным фондом, грант 22-72-10059.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Imai, J. Kurihara, T. Kouyama, T. Kuwahara, S. Fujita, Y. Sakamoto, Y. Sato, S.-I. Saitoh, T. Hirata, H. Yamamoto, Y. Takahashi. *Sensors*, **21** (7), 2429 (2021). DOI: 10.3390/s21072429.
- [2] D.W. Waugh. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **55**, 265 (2023). DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-032208
- [3] C. Xiao, F. He, Q. Shi, W. Liu, A. Tian, R. Guo, C. Yue, X. Zhou, Y. Wei, I.J. Rae, A.W. Degeling, V. Angelopoulos, E.V. Masongsong, J. Liu, Q. Zong, S. Fu, Z. Pu, X. Zhang, T. Wang, H. Wang, Z. Zhang. *Nature Physics*, **19**, 486 (2023). DOI: 10.1038/s41567-022-01882-8
- [4] S. Modiri, R. Heinkelmann, S. Belda, Z. Malkin. *Sensors*, **21**, 7555 (2021). DOI: 10.3390/s21227555
- [5] Ch. Wang, P. Zhang. *Earth, Planets and Space*, **75**, 153 (2023). DOI: 10.1186/s40623-023-01910-8
- [6] K. Shi, H. Ding, T. Chen, Ch. Zou. *Astronomy and Space Sciences*, **10**, 1 (2023). DOI: 10.3389/fspas.2023.1158138
- [7] Q. Zhou, Z. Zhu, G. Xian, C. Li. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, **185**, 48 (2022). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.01.006
- [8] T. Buckley, V. Pakrashi, B. Ghosh. *Structural Health Monitoring*, **20** (6), 3150 (2012). DOI: 10.1177/1475921720981735

- [9] H. Queffelec, D. Volný. J. Theoretical Probability, **25** (2), 438 (2011). DOI: 10.1007/s10959-011-0386-z
- [10] Y. Nefedyev, S. Valeev, R. Mikeev, N. Varaksina, A. Andreev. Advances in Space Research, **50** (11), 1564 (2012). DOI: 10.1016/j.asr.2012.07.012
- [11] C.K. Madsen. EURASIP J. Advances Signal Processing, **2005** (10), 1566 (2005). DOI: 10.1155/ASP.2005.1566
- [12] Н.К. Петрова, Ю.А. Нефедьев, А.О. Андреев, А.А. Загидуллин. *Астрономический журнал*, **97** (12), 1042 (2020). [N.K. Petrova, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, A.A. Zagidullin. *Astron. Rep.*, **64**, 1078 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120094]