

# Анализ динамики земного полюса с использованием регрессионного моделирования

А.О. Андреев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Нефедьев<sup>1</sup>, Р.Р. Мубаракшина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Кремлевская 18, Казань, Россия, 420008

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, Красносельская, 51, Казань, Россия, 420066

## Аннотация

Детерминированные математические модели позволяют прогнозировать изучаемые динамические процессы для будущих моментов времени. Попытки построить такие модели предпринимались неоднократно, однако их прогностическая ценность оказывалась достаточно низкой. В нашем случае для обработки наблюдений за динамикой земного полюса использовался подход регрессионного динамического моделирования (DRM). С помощью программного пакета DRM были построены модели, описывающие динамику полярных координат Земли (PCT). Этот подход позволяет создать точные комбинированные модели наблюдений, которые в некоторой степени описывают причинно-следственную и детерминированную связь и позволяют выполнить прогнозирование. Проведено сравнение наблюдений и прогнозных значений динамики PCT, полученных с помощью подхода DRM и другими исследователями. Для решения данной задачи было выполнено расширение системы DRM. Базовая версия дополнена новыми программными модулями для разработанной методики и особенностей геофизических наблюдений.

## Ключевые слова

фундаментальные результаты в науках о данных, регрессионное моделирование, динамические параметры полюса Земли

## 1. Введение

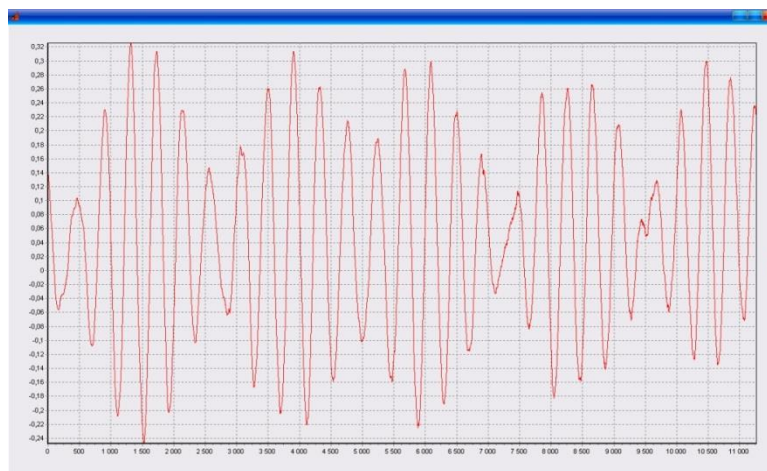
Развитие статистических методов моделирования временных рядов (TSM) позволяет надеяться на успешное применение статистических моделей в геофизических системах для описания изменчивости координат во времени. В отличие от детерминированных моделей, статистические (регрессионные) не остаются постоянными по структуре и значениям параметров на весь период использования. После получения прогноза на шаг или несколько шагов дискретности модель «обновляется» в соответствии с текущими значениями координат. Регрессионное динамическое моделирование является частным случаем подхода адаптивного регрессионного моделирования. При его применении формируется сложная модель, состоящая из набора оптимальных математических структур, каждая из которых описывает зависимость «остатков» своего шага от времени. В данных моделях несмотря на то, что время является главным аргументом, окончательная форма DRM формируется в результате вычислительной адаптации к свойствам остатков того или иного шага и к нарушениям условий применения метода наименьших квадратов (МНК).

## 2. Моделирование и прогнозирование динамики полюса Земли

Программный комплекс DRM, предназначенный для анализа геофизических процессов, содержит следующие модули: 1) спектральное окно для преобразования неравномерных наблюдений; 2) кросс-спектральный анализ для выявления общих значимых гармоник двух наблюдений; 3) фильтр Калмана для устранения шума из остатков модели; 4) фрактальный анализ для проверки ряда на устойчивость тренда; 5) набор вейвлетов; 6) сценарии обработки

для автоматического построения наилучшего для «внешней» модели стандартного отклонения (SD) модели временного ряда (TSM).

На первом этапе анализа данных в рамках DRM-подхода гипотеза о стационарности ряда отклонялась с вероятностью 0,95. Выполнялось центрирование исходной временной серии (оценка точности аппроксимации ( $\sigma$ )= 0,1323 и прогнозирования ( $\sigma_{\Delta}$ )= 0,14). По результатам спектрального анализа подтверждено наличие гармонических составляющих. Для определения несущих гармоник использовался метод ступенчатой регрессии. В результате были выделены 4 значимые гармоники с периодами 363, 388, 433, 490 суток ( $\sigma$ ) = 0,0831, ( $\sigma_{\Delta}$ ) = 0,0962). Далее была построена модель DRM (6,0) ( $\sigma$ ) = 0,0002 и ( $\sigma_{\Delta}$ ) = 0,0094). Диаграмма комбинированной модели динамики земного полюса представлена на Рисунке 1. По оси абсцисс отложены дни, по оси ординат – значения координаты X.



**Рисунок 1:** Динамика координаты X Северного полюса для комбинированной модели

Аналогично была построена комбинированная модель для координаты Y и прогнозные диаграммы для координат X и Y Северного полюса Земли на 90 и 365 суток. Выполнено сравнение наших прогнозов с результатами: а) военно-морской обсерватории США (US Naval Observatory [1]), б) Пулковской обсерватории [2], в) Центра космических исследований (Space Research Centre [3]).

### 3. Заключение

Сравнение полученных в работе результатов с работами других исследователей динамики Северного полюса показало, что предложенные модели в применении DRM-подхода позволяют более точно прогнозировать координату Y при сохранении точности координаты X. Также результаты подтверждают перспективность использования так называемых адаптивных динамических регрессий, разрабатываемых в настоящее время для описания изменений координат. Их преимуществами по сравнению с традиционными подходами к анализу временных рядов являются: 1) расширение представления о структуре математической модели, описывающей динамику; 2) обособленность устойчивых во времени гармоник колебаний; 3) в несколько раз повышается точность прогноза изменений на определенном промежутке времени, что может иметь важное практическое применение.

### 4. Литература

- [1] Dick, S. Observatory sciences and culture in the nineteenth century / S. Dick // *Metascience*. – 2011. – Vol. 21(1). – P. 235-237.
- [2] Miller, N.O. Early latitude observations at the Pulkovo observatory / N.O. Miller, E.Y. Prudnikova // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2011. – Vol. 27(1). – P. 30-37.
- [3] Drewes, H. The Geodesist's Handbook / H. Drewes, F. Kuglitsch, J. Adám, S Rózsa // *Journal of Geodesy*. – 2016. – Vol. 90(10). – P. 907-1205.