



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 8–15

УДК 528

Прогнозирование положения полюса Земли и скорости ее вращения

Л.В. Зотов

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

Колебания оси вращения в теле Земли и изменения скорости вращения планеты отражают многие астрономические и геофизические процессы, происходящие на планете и в космосе. Мониторинг и прогноз параметров вращения Земли (ПВЗ) представляет как фундаментальный интерес для астрометрии и геофизики, так и прикладной — для космической навигации и средств глобального позиционирования. Точность современных наблюдений за вращением Земли превышает точность моделирования, которое все еще сопряжено с рядом трудностей. Привлечение современных математических методов позволяет совершенствовать качество прогнозов параметров вращения Земли. Получены прогнозы с использованием авторегрессии, колокации и нейронных сетей, выполнено сравнение с прогнозами, предоставляемыми Международной Службы Вращения Земли (МСВЗ).

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПОЛЮСУ ЗЕМЛІ ТА ШВИДКОСТІ ЇЇ ОБЕРТАННЯ, Зотов Л.В. — Коливання вісі обертання в тілі Землі та зміни швидкості обертання планети відображають багато астрономічних та геофізичних явищ, що відбуваються на планеті та в космосі. Моніторинг та прогнозування параметрів обертання Землі має як фундаментальний інтерес для астрометрії та геофізики, так і прикладний — для космічної навігації та засобів глобального позиціонування. Точність сучасних спостережень за обертанням Землі перевищує точність моделювання, яке все ще пов'язане з рядом труднощів. Застосування сучасних математичних методів дозволяє вдосконалювати якість прогнозів параметрів обертання Землі. Отримано прогнози з використанням авторегресії, колокації та нейронних мереж. Виконано порівняння з прогнозами, представленими Міжнародною Службою Обертання Землі.

THE EARTH'S POLE POSITION AND ROTATION SPEED PREDICTION, by Zotov L. V. — Oscillations of the rotation axis inside the Earth and variations of planetary rotation speed reflect many astronomical and geophysical processes taking place at our planet and in the space. Monitoring and prediction of the Earth's rotation parameters are of fundamental interest for astrometry, and geophysics, and are of applied interest for space navigation and global positioning. The precision of the Earth rotation observations exceeds the modelling precision. Applying the modern mathematical methods permits improving of the Earth rotation parameters prediction quality. Prognoses are obtained due to autoregression, and collocation, and neural networks. Comparison with the predictions given by International Earth Rotation Service (IERS) is performed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Идея о том, что наша планета может вращаться неравномерно, а ось вращения менять свое положение, возникла еще в XVIII веке в умах таких выдающихся ученых, как Эйлер и Лаплас. Эйлером в 1765 г. была построена теория вращения твердой Земли, из которой следовало, что ось вращения может совершать круговые движения с периодом около 304 суток. Однако обнаружить периодические колебания оси вращения Земли удалось лишь в конце XIX века. Астроном Кюстнер, определявший постоянную аберрации, открыл годовой цикл изменения широт, а коммерсант Чандлер из Кембриджа, обработав ряды широтных наблюдений, выявил цикл с периодом около 430 суток, получивший его имя. Ньюкомб показал, что период Чандлера является аналогом периода Эйлера для Земли, обладающей упругими недрами и подвижным океаном. Эти открытия привели к созданию в 1899 г. Международной Службы Широты (МСШ). Сеть обсерваторий МСШ проводила наблюдения за изменениями широт, из которых определялось положение оси вращения Земли на протяжении более чем 80 лет.

Положение оси вращения в теле Земли задается двумя прямоугольными координатами X и Y . Они отсчитываются от Небесного Эфемеридного Полюса (НЭП), ось X направлена вдоль Гринвичского меридиана, ось Y — в направлении 90° западной долготы. Ось, проходящая через НЭП, совершает прецессионные и нутационные колебания в инерциальном пространстве. В 1962 году задача определения координат полюса была возложена на Международную Службу Движения Полюса (МСДП).

Споры о постоянстве скорости вращения Земли также начались еще во времена Ньютона. Предположение о возможном замедлении скорости вращения планеты под действием приливного трения высказал И.Кант в 1754 году. Подтвердилось это из наблюдения за движением планет Солнечной системы и анализа древних астрономических наблюдений лишь более века спустя. И только изобретение атомных часов во второй половине XX века позволило начать регулярный и точный мониторинг отклонений в скорости вращения планеты. Сличение атомной шкалы Всемирного Координированного времени UTC с получаемой из астрономических наблюдений и связанной с вращением Земли шкалой Всемирного времени UT1 позволяет отслеживать эти отклонения, а также вычислять продолжительность суток. С 1962 г. Международное Бюро Времени (МБВ) публикует бюллетени, содержащие разность UT1–UTC и величину продолжительности суток. Следует сказать, что временной ряд UT1–UTC отражает помимо скорости вращения Земли все изменения, которые претерпевала шкала UTC. Вследствие замедления вращения Земли шкала UT1 отстает от UTC. Шкала UTC используется повсеместно и время от времени подводится для согласования с вращением Земли. До 1972 года к UTC при необходимости каждый раз добавлялась 0.1 секунда, так чтобы рассогласование не превышало 0.1 с. Однако столь частые поправки оказались неудобны. В 1972 году было принято решение о том, что вносить изменения в UTC нужно реже, и добавлять по 1 секунде для того, чтобы рассогласование с UT1 не превысило 0.7 с. Последняя такая секунда была добавлена к последней секунде 1998 года и с тех пор, по причине ускорения вращения Земли, не добавлялась. По новым соглашениям следующая будет добавлена лишь тогда, когда рассогласование приблизится к 0.9 с, что может случиться в 2006 г.

В 1982 году была создана Международная Служба Вращения Земли (МСВЗ) на которую были возложены задачи, ранее возлагавшиеся на МСДП и МБВ. Именно МСВЗ, ставшая наследницей накопленных за десятилетия ценных данных о вращении планеты, осуществляет сейчас сбор и обработку наблюдений современных обсерваторий, публикует бюллетени с ПВЗ, осуществляет прогноз. Современные средства наблюдений — радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ), системы глобального позиционирования GPS и Глонасс, станции лазерной локации Луны и искусственных спутников, объединенные в международные сети, дают высокоточные данные о вращении Земли с временным разрешением, достигающим нескольких часов и даже минут. Погрешности определения координат полюса составляют сотни микросекунд дуги, а погрешности величин UT1–UTC — десятки микросекунд времени. Однако координаты полюса X и Y и ход вращения Земли UT1 моделируются с точностью, все еще уступающей точности наблюдений.

Вращение планеты — уникальный процесс, отражающий множество геофизических и астрономических явлений. На него влияет большое число факторов, среди которых вариации приливного потенциала, обусловленного действием небесных тел, изменения момента импульса ветров, течений, годовой цикл возбуждения атмосферы, явление El Niño, таяние ледников и др. [1] Так или иначе, все явления, приводящие к перераспределению масс оболочек Земли и момента импульса между ними, влияют на вращение Земли. Прогноз многих из этих факторов краткосрочен, а некоторых, как, например, землетрясений, пока вообще невозможен. Даже природа самого мощного во вращении Земли чандлеровского колебания, амплитуда которого достигает 0.3 сек дуги (около 10 м на поверхности Земли), остается туманной. Обнаружены вариации его амплитуды и периода. Сила, его возбуждающая, до сих пор точно не известна [2]. Это сильно затрудняет прогнозирование. Однако чисто математические подходы, не требующие углубления в физические основания явления, позволяют осуществлять удовлетворительные прогнозы на ближайшее будущее. Некоторые из таких

моделей были использованы нами в данной работе.

Прогноз ПВЗ, определяющих взаимную ориентацию земной и небесной систем координат чрезвычайно важен. Современные средства глобального позиционирования, астрономические обсерватории, средства космической навигации не могут обходиться без этих данных. Более точный прогноз станет возможен, когда будут более подробно изучены процессы, приводящие к отклонениям во вращении Земли, будут созданы средства слежения за этими процессами. Возможен и обратный эффект — изучение вращения Земли послужит пониманию процессов, происходящих на Земле и в ближнем космосе.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовались бюллетени ЕОРС01 и ЕОРС04 МСВЗ. Бюллетень ЕОРС01 содержит координаты полюса с 1846 по 1889 г. шагом в 0.1 года и с 1890 г. шагом в 0.5 года. Данные по скорости вращения Земли имеются с 1962 г. На рис. 1 представлен график изменения координат полюса с 1900 г. На рис. 2 представлен временной ряд $UT1-UTC$. Графики зависимости погрешности от эпохи наблюдений иллюстрируют колоссальный прогресс в точности наблюдений. Бюллетень ЕОРС04, содержит параметры вращения Земли с 1962 г. по настоящее время шагом в одни сутки.

3. МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Двухмесячный прогноз строился по 6-летнему базовому отрезку ряда. На первом этапе выполнялось моделирование тренда. Для координат полюса X и Y использовалась линейная модель. Временной ряд $UT1-UTC$ предварительно спрямлялся, устранялись скачки, обусловленные введением дополнительной секунды, затем выделялся тренд второго порядка. Параметры тренда определялись методом наименьших квадратов (МНК), и он прогнозировался на 60 точек вперед (рис. 3).

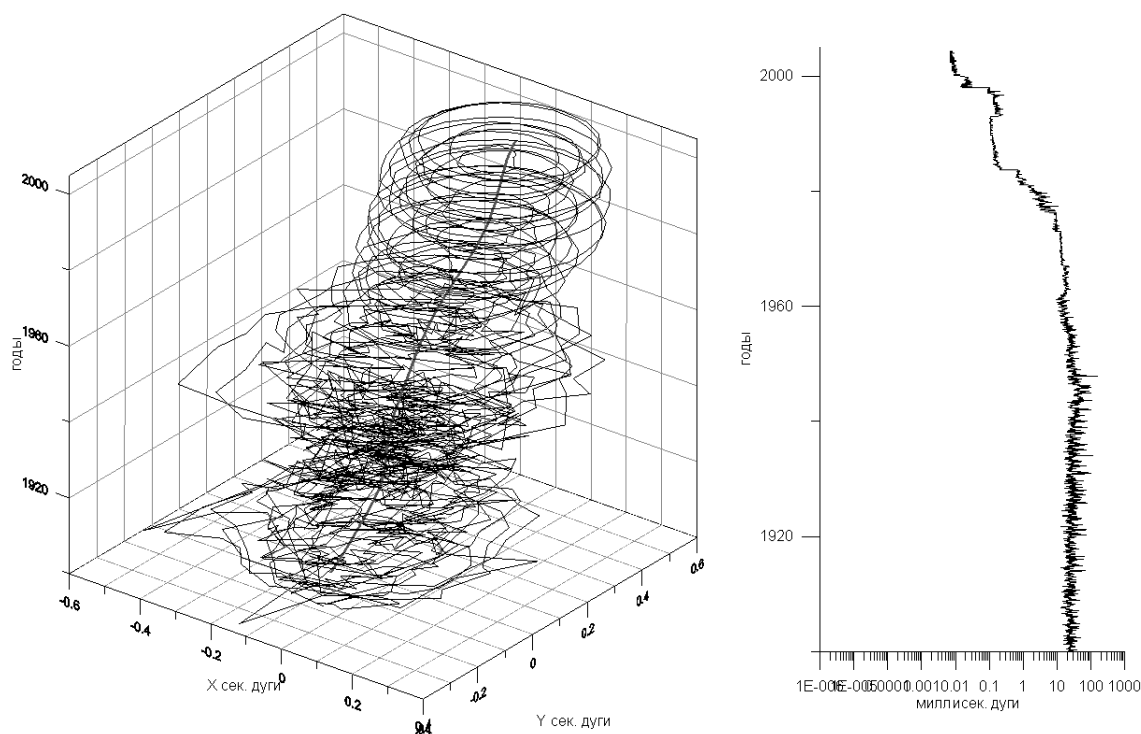


Рис. 1. Изменения координат полюса с 1900 года (слева) и погрешности измерений (справа).

Второй этап — моделирование гармонических составляющих рядов, освобожденных от тренда. Перед тем, как приступить к их моделированию и прогнозу, был выполнен спектральный анализ. Спектрограммы координат полюса X , Y и $UT1-UTC$ вычислялись с использованием преобразования Фурье по данным бюллетеня ЕОРС01 (рис. 4). Известно, что основными гармоническими составляющими в движении полюса являются годовая составляющая и чандлеровское колебание со средним периодом 435 суток, однако период и амплитуда последнего непостоянны [2]. В составе ряда $UT1-UTC$ ярко выражены 18.6-летняя, годовая и полугодовая составляющие. Для более подробного исследования спектрального состава рядов координат полюса X и Y были выполнены вейвлет-анализ, в котором использовался вейвлет Морле с параметром $\alpha = 100$ [3]. Трехмерные скалограммы на рис. 5 иллюстрируют эволюцию периодических составляющих во времени. Видно, как сильно уменьшились период и амплитуда чандлеровского колебания в 30-е годы XX века. На базовом отрезке, по которому выполнялся прогноз координат X или Y , параметры годовой и чандле-

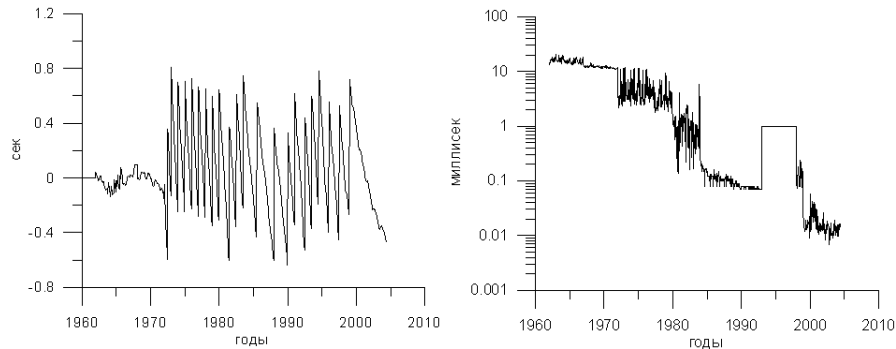


Рис. 2. Расхождение шкал времени $UT1-UTC$ (слева) и погрешности измерений (справа)

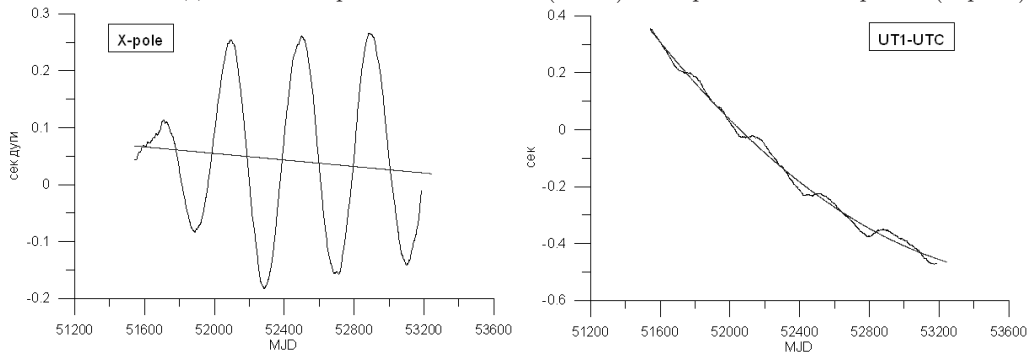


Рис. 3. Моделирование тренда координат полюса (слева) и $UT1-UTC$ (справа)

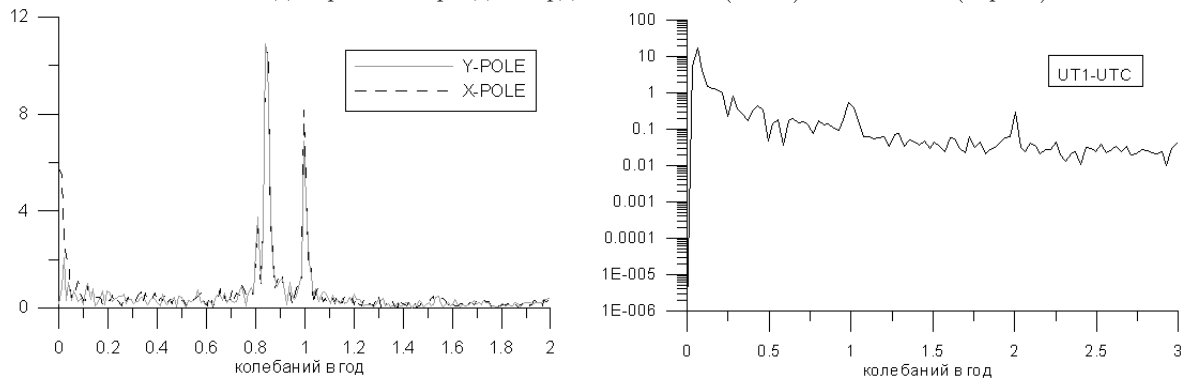


Рис. 4. Спектрограммы координат полюса X и Y (слева) и $UT1-UTC$ (справа)

ровской гармонике подбирались нелинейным МНК. Таким же образом для UT1–UTC подбирались параметры годовой и полугодовой гармоник (рис. 6).

Поведение оставшихся после извлечения полиномиального и гармонического трендов временных рядов рассматривалось как случайное, и на третьем этапе для их моделирования использовались статистические методы. Метод авторегрессионного (АР) моделирования основан на представлении отсчетов временного ряда моделью

$$x_i = - \sum_{j=1}^N a_j x_{i-j} + n_i$$

где a_j — параметры модели, n_i — поступающий на вход белый шум, N — порядок модели. Параметры вычислялись по алгоритму Берга. Порядок модели N был принят равным 50, данный порядок приводит к достаточно хорошим значениям остаточной дисперсии, информационного критерия Акаике и вполне удовлетворительным прогнозам [4, 5].

Метод среднеквадратической коллокации (СКК) позволяет прогнозировать отсчеты временного ряда с привлечением статистической информации, заключенной в автоковариационной функции

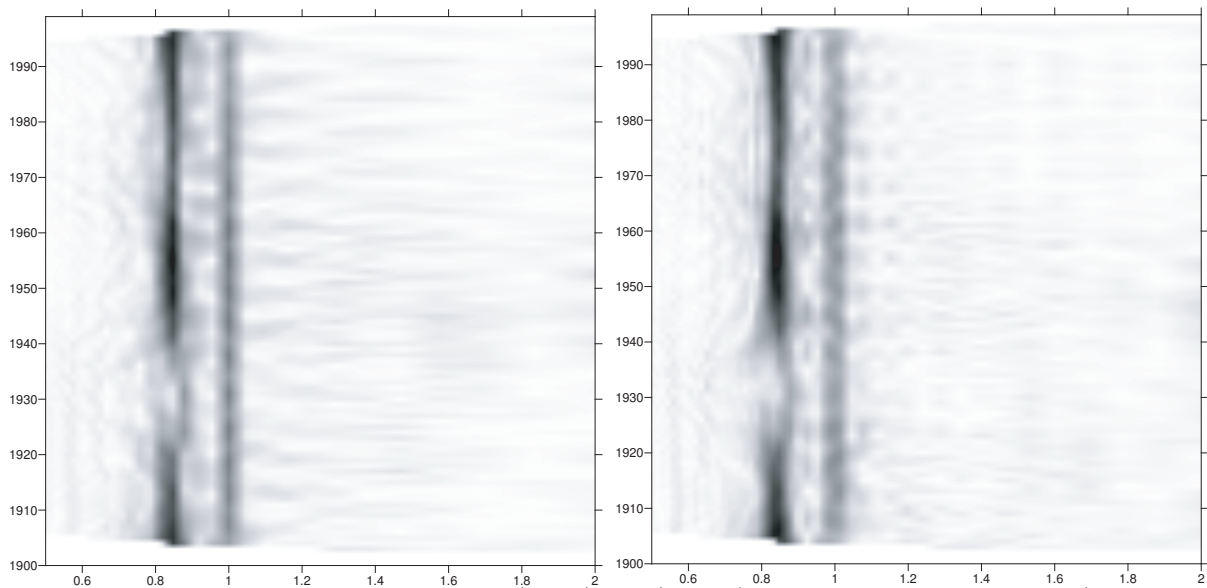


Рис. 5. Скалограммы координат полюса X (слева) и Y (справа). По горизонтали — частоты (число колебаний в год), по вертикали — годы.

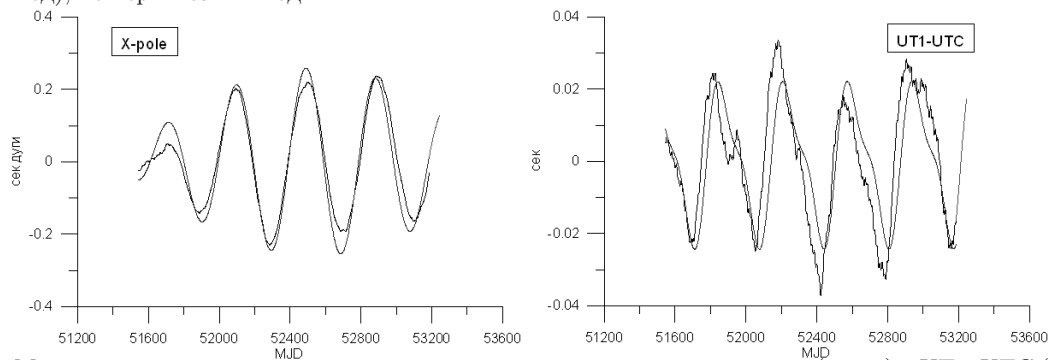


Рис. 6. Моделирование гармонических составляющих рядов координат полюса (слева) и UT1–UTC (справа) после вычитания полиномиального тренда

(АКФ). Несмещенная оценка АКФ вычисляется по временному ряду по формуле

$$R_{xx}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} x_n^*$$

Если нам известна автоковариационная функции для числа точек N , превышающего число точек N_1 базового отрезка, по которому строится прогноз, мы можем построить прогноз на $N - N_1$ точек вперед. Для этого значения АКФ заносятся в симметрическую ковариационную матрицу \mathbf{Q}_{xx} , так что $\{q_{ij}\} = R(|i-j|)$. Прогноз выполняется по формуле

$$\hat{\mathbf{i}} = \mathbf{Q}_{ft} \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \mathbf{1},$$

где \mathbf{Q}_{ll} — левая верхняя часть матрицы \mathbf{Q}_{xx} размерностью $N_1 \times N_1$, а \mathbf{Q}_{ft} — левая нижняя часть

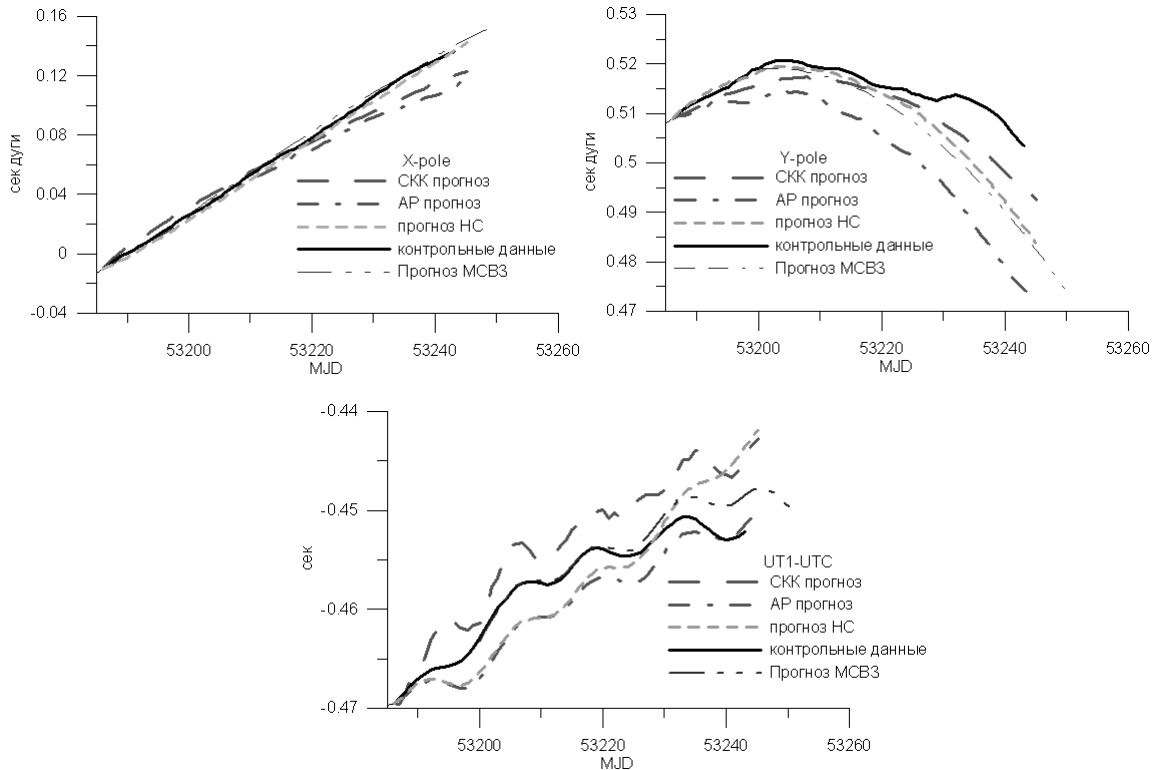


Рис. 7. Двухмесячный прогноз ряда координат полюса X (слева), Y (справа) и UT1–UTC (внизу)

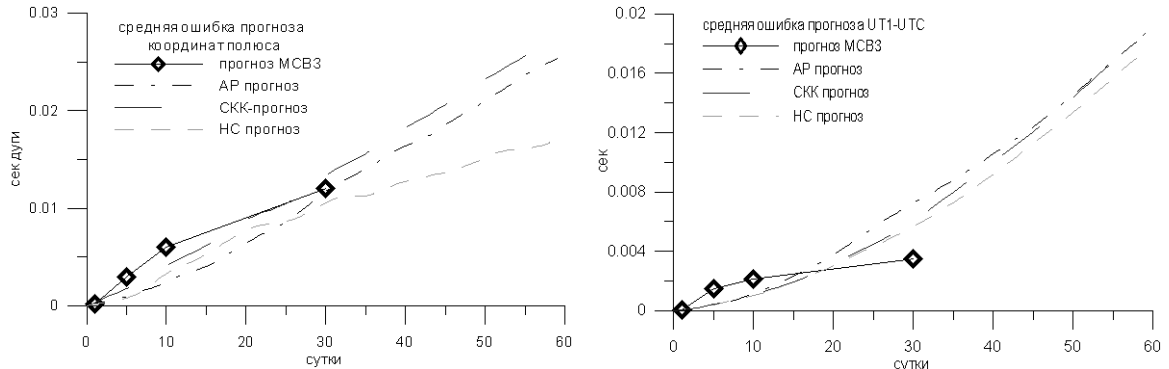


Рис. 8. Средние ошибки прогнозов координат полюса (слева) и UT1–UTC (справа) в сравнении с прогнозами МСВЗ

Таблица 1. Сравнение средней точности прогнозов, полученных разными методами для разных интервалов времени

| Горизонт сутки | Прогноз МСВЗ | | АР-прогноз | | НС-прогноз | | СКК-прогноз | |
|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| | X, Y 0.001'' | UT1-UTC 0.001 сек | X, Y 0.001'' | UT1-UTC 0.001 сек | X, Y 0.001'' | UT1-UTC 0.001 сек | X, Y 0.001'' | UT1-UTC 0.001 сек |
| 1 | 0.15 | 0.02 | 0.15 | 0.02 | 0.14 | 0.034 | 0.27 | 0.032 |
| 5 | 3 | 1.5 | 1.0 | 0.4 | 0.78 | 0.39 | 1.8 | 0.43 |
| 10 | 6 | 2.1 | 2.4 | 1.1 | 3.3 | 0.96 | 4.0 | 1.07 |
| 30 | 12 | 3.5 | 11.7 | 7.2 | 10.6 | 5.7 | 13.4 | 6.0 |

матрицы \mathbf{Q}_{xx} размерностью $(N - N_1) \times N_1$. Вектор прогноза \mathbf{f} имеет размерность $N - N_1$, вектор базового сигнала $\mathbf{1}$ — размерность N_1 [6].

Для прогнозирования ПВЗ была предпринята попытка использования нейронных сетей (НС). На начальном этапе была построена модель «Амебы», состоящая из одного нейрона с линией задержки на входе. Схема такой модели представлена на рис. 9. Отсчеты временного ряда $p(i)$ поступают на вход линии задержки D размерностью $N = 100$, с линии задержки на k -шаге вектор $pd(k)$ поступает на нейрон, где взвешивается с весами $w(i)$ и смещается на величину b . После прохождения результирующего сигнала $n(k)$ через линейную передаточную функцию формируется выход $a(k)$, представляющий собой в нашей модели прогноз будущего значения ряда. Таким образом, N предыдущих значений используются для прогноза будущего значения, которое в свою очередь может быть вновь использовано на входе. Весовые коэффициенты нейрона адаптируются для решения задачи с помощью тренировки. Сигнал неоднократно пропускается через сеть, и прогнозное значение сравнивается с контрольным. К модели «амеба» можно привести нейронную сеть, содержащую любое количество линейных слоев и один нейрон выходного слоя.

Для вычисления средних отклонений прогнозных значений от наблюдений было сделано 20 прогнозов для разных эпох в прошлом и выполнено их сравнение с реальными данными. Результаты представлены в табл. 1. Там же представлены средние погрешности прогнозов МСВЗ [7] Графики погрешностей представлены на рис. 8. Можно видеть, что прогноз НС оказался наиболее адекватным из всех. На протяжении двух месяцев его точность для координат полюса оказалась лучше точности МСВЗ. АР прогноз превышает по точности прогноз МСВЗ на интервалах до 15 суток для UT1-UTC и до 30 суток для координат полюса X и Y .

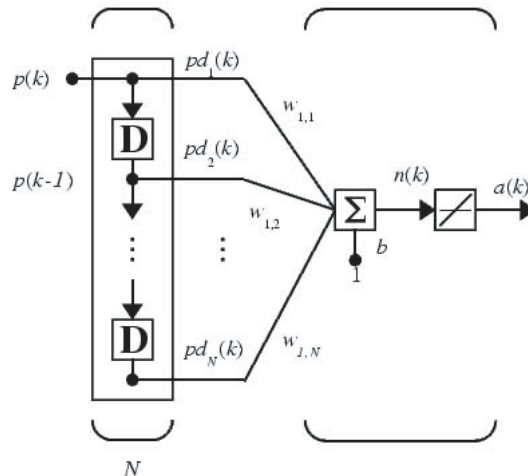


Рис. 9. Структурная схема нейронной сети «Амеба»

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что прогнозирование ПВЗ регрессионными методами АР и СКК дает хорошие результаты, по точности сравнимые с прогнозами МСВЗ и даже лучше на первых неделях, прогноз нейронной сети превышает по точности прогнозы МСВЗ на всем интервале прогнозирования. Перспективными видятся подходы к прогнозированию временных рядов, основанные на совместном использовании нейронных сетей и вейвлет-анализа. Моделирование отклонений во вращении Земли, по крайней мере, на уровне точности наблюдений — задача будущего, для решения которой чрезвычайно важны постоянный мониторинг всех основных процессов на Земле и в Космосе, который послужит более глубокому пониманию физических основ явления и построению их моделей. Результаты прогноза ПВЗ доступны в интернете по адресу <http://lnfm1.sai.msu.ru/~tempus/pvz/prediction/index.html>.

Благодарности. Автор благодарит научного руководителя Жарова В.Е. за предложения по работе, Сурдина В.Г. за предложенное название для модели нейронной сети, Баринову О.В. за помощь в разработке программ. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 02-05-39004.

1. *Сидоренков Н.С.* Физика неустойчивостей вращения Земли. — М.: Физматлит, 2002.
2. *Yatskiv Y.* Chandler Motion Observations // ASP Conference Series. — 2000. — **208**. — P. 383.
3. *Вутязев В.В.* Вейвлет-анализ временных рядов. — С.-Пб. университет, 2001.
4. *Кей С.М., Марпл С.Л.* Современные методы спектрального анализа // ТИНЭР. — 1981. — **69**, № 11.
5. *Лукаш Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. — М.: Финансы и статистика, 2003.
6. *Губанов В.С.* Обобщенный метод наименьших квадратов. — С.-Пб.: Наука, 1997.
7. IERS Annual Report 2002, BKG, Frankfurt am Main, 2003.
8. *Kosek W., Kalarus M.* Time-frequency analysis and prediction of polar motion radius and angular motion // Artificial satellites. — 2003. — **38**, № 2. — P. 41.
9. *Kosek W.* Polar motion prediction by different methods in polar coordinates system // Journees 2002 proceedings. — P. 125.

Поступила в редакцию 9.09.2004