

О МЕТОДАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ГЕОДИНАМИКЕ

В.Л. Горшков

Дано краткое описание методов, применяемых в геодинимике для прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ). На материале данных международной службы вращения Земли (IERS) проведен сравнительный анализ некоторых методов прогнозирования.

ВВЕДЕНИЕ

Все более точное прогнозирование геофизических процессов является конечной целью многих научных задач особенно в прикладных направлениях, к которым относится большинство наук о Земле. На пути повышения точности их прогноза имеются интуитивно понятные ограничения. Они связаны с нестационарностью большинства рядов, с наличием случайных или, тем более, не совсем случайных помех. Помехи могут быть обусловлены как средствами наблюдений, так и невозможностью отделить данный процесс от взаимодействия с другими процессами геосистемы, многообразие которых также порождает почти случайный фон воздействий. Повышение точности регистрирующих систем привело к эффекту микроскопа – стали видны *реальные*, не вызванные ошибками наблюдений почти случайные флуктуации многих геофизических процессов. По этим причинам методы прогнозирования становятся все более изощренными. При этом меняется сам подход к прогнозу. Там, где за вычетом всех известных составляющих процесса, остается только шум, открывается не менее интересная, многокрасочная картина этого шума (от белого до коричневого). Возможность традиционного прогнозирования (чему будет равно $f(t_i)$ в момент t_{i+k}) там отсутствует, но содержится достаточно нерасшифрованной информации о характере процесса, его поведении и даже возможных кризисных состояниях (точках бифуркаций).

Истоки современного прогнозирования можно найти в монастырях средневековья, в которых монахи были озабочены познанием истинных путей Господних (не дай Бог не так понять Его *замысел*). Имея в виду эту величайшую и недостижимую цель – понять замысел, исследовались наблюдаемые закономерности в природе, многие из которых со временем оформились в родившейся таким образом науке как законы природы. Будучи многократно подтверждены в эксперименте и математически формализова-

ны, они дали направление детерминизму в науке, и вместе с ним иллюзию возможности точного предсказания. Использование гармонического анализа временных рядов разной природы с последующим восстановлением основных гармоник для целей их прогноза – следствие этого подхода. В общем случае такого рода *детерминированные* модели предусматривают представление рядов набором трендов, гармоник, полиномов, экспонент и их аддитивных и мультипликативных комбинаций.

Идеи детерминизма до сих пор не изжиты в научной среде, потому что в целом достаточно продуктивны. Многие процессы допускают представление их в виде линейных композиций вышеперечисленных функций, наращивание параметров в них часто оправдано с практической точки зрения. Однако надежность с прогностической точки зрения даже небесной механики на масштабах миллионов лет уже не достаточна для солнечной системы в целом, не говоря уже об орбитах малых тел. Прогнозируя наблюдаемый процесс, мы всегда опираемся на предшествующую, часто непродолжительную зарегистрированную его часть. Из этого, кстати, следует необходимость всемерно поддерживать сеть обсерваторий астрономического и геофизического направлений, уже имеющих долговременные ряды наблюдений и продолжающих их накапливать. Со временем различные непрерывные геофизические ряды наблюдений становятся всё более востребованными, и не только в науке.

Даже не принимая во внимание всегда присутствующие многообразные ошибки наблюдений и стохастичность практически всех природных процессов, всегда нужно помнить, что могут существовать компоненты циклического характера, превосходящие по продолжительности любой заданный интервал наблюдений. Модели, в которых на основе предшествующих наблюдений процесса оценивается и пролонгируется его *стохастическая* составляющая, образуют большой класс прогностических моделей. Любопытно, что столь часто используемый в прогностике термин «стохастический» имеет прямое отношение к прогностике. В переводе с греческого языка «стохастический» значит «умеющий угадывать».

Возвращаясь к методам прогнозирования, отметим, что помимо рассматриваемого в данной работе прогноза параметров вращения Земли (ПВЗ), существует обширная литература по прогнозам временных рядов, также имеющих геофизическое происхождение. Для сложных систем, к которым, безусловно, необходимо отнести большинство геофизических процессов, типично отсутствие характерных частот в спектре мощности процесса, что резко ограничивает возможности традиционного прогнозирования. Характерный для многих процессов степенной вид спектра мощности ряда (фликкер-

шум) означает, что значительная часть его энергии связана с очень медленными процессами, для которых, как отмечалось ранее, невозможен прогноз ввиду непроявленности в данной реализации долговременных составляющих. В этом случае возможны огромные непредсказуемые флуктуации исследуемого ряда.

Эти проблемы в приложении к прогнозу геофизических полей, в частности, к прогнозу землетрясений более подробно рассмотрены в работе (Дещеревский и др, 2003). Вообще для сложных систем, характеризуемых нелинейностью и, как правило, невозможностью их детерминированного описания из-за сильной взаимообусловленности компонент, разрабатываются специальные методы прогноза, приведенные, например, в книге (Владимиров и др., 2000).

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ

Для прогноза параметров вращения Земли может быть успешно применен классический подход, основанный на Фурье-анализе (FFT) исследуемых рядов. Гармоники, определяемые с помощью FFT, имеют определенный физический смысл и достаточно хорошо разделяются (аддитивны).

На рис.1, заимствованном на сайте IERS (<http://hpiers.obspm.fr/>), представлена декомпозиция (с помощью метода CENSUS X-11) Y-компоненты движения полюса на основные составляющие по сводному решению EOP(IERS)C01. Для демонстрации выбрана именно эта составляющая движения полюса, т.к. помимо квазигармонических чандлеровской и годичной компонент в ней отчетливо заметны линейный и полиномиальный тренды. Видно также, что остатки разложения не свободны от более слабых квазигармонических компонент.

На основании выбранных за определенный предшествующий интервал (временной лаг) гармоник находится наилучшая (в гауссовом приближении, т.е. с помощью метода наименьших квадратов - МНК) аппроксимирующая функция, которая и пролонгируется на выбранный интервал в будущее. Именно детерминированная модель стандартно используется в IERS (McCarty, Luzum, 1991) перед использованием авторегрессионного прогнозирования (см. следующий раздел). В нее включены полугодичная, годичная, чандлеровская и трендовые составляющие движения полюса, оцениваемые на предшествующем лаге в 6 лет. С недавнего времени (Kosek et al., 1998) помимо них стали включать в модель данные автоковариационной функции рядов ПВЗ.

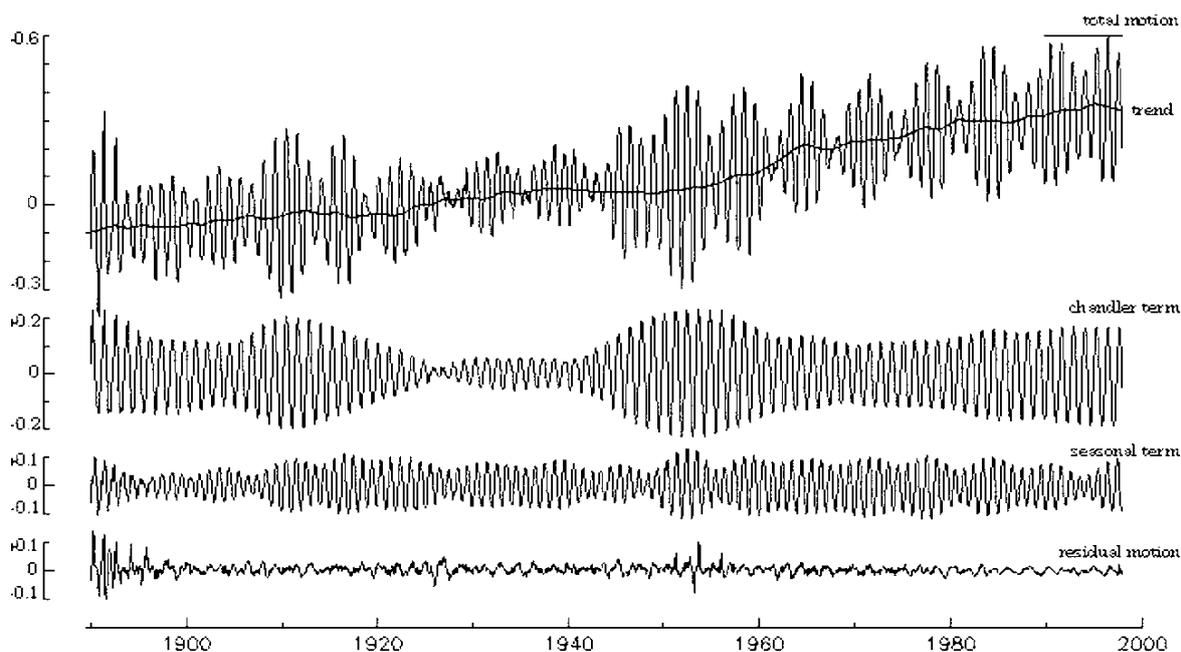


Рис. 1

Детерминированные модели для прогноза ПВЗ приведены, например, в работе (Акуленко и др., 2002). Модель строится на основе теоретического упрощенного представления о структуре Земли - двухслойный шар с абсолютно твердым ядром и вязкоупругой мантией. Существенное отличие теоретической модели авторов от общепринятой состоит в том, что годовое колебание полюса считается возбуждаемым не от сезонных геофизических процессов (атмосфера, океан и др.), а является результатом недоучтенного влияния суточных гравитационных приливов в деформируемой Земле. Несмотря на некоторую «революционность» этой модели, её теоретические аспекты никак не отразились на предложенной прогностической МНК модели. В работе стандартно использован линейный, годичный и чандлеровский компоненты и добавлен параметр, линейно меняющий амплитуду чандлеровского колебания со временем. Оценка параметров производится по предшествующим лагам в 6 и 12 лет. В частности, для 12-летнего интервала приводится следующая модель:

$$X(t) = -0.03935 + 0.000075 t + 0.030469 \cos 2\pi t + 0.06669 \sin 2\pi t + \\ + (0.03047 - 0.000496 t) \cos(2\pi\omega_c t) - (0.20456 - 0.0042036 t) \sin(2\pi\omega_c t)$$

$$Y(t) = 0.30798 + 0.002772 t - 0.06302 \cos 2\pi t + 0.02766 \sin 2\pi t + \\ + (0.19990 - 0.0038540 t) \cos(2\pi\omega_c t) + (0.02753 + 0.0001330 t) \sin(2\pi\omega_c t),$$

где $\omega_c = 0.85$ циклов/год – частота чандлеровского колебания, время t – в годах.

На рис.2 представлены колебания полюса на интервале 1988-2002 для Y координаты.

наты полюса (EOP(IERS)C04 – сплошная линия). Пунктирная кривая – вышеприведенное аналитическое представление и основанный на наблюдениях в интервале 1988-2000 гг. прогноз на 2001-2002 годы.

Заметим, что почти все методы прогнозирования дают сбой в моменты экстремумов прогнозируемого ряда ПВЗ или в моменты затухания процесса. Подобный сбой часто возникает также, когда начальная точка прогноза задаётся вблизи этих моментов.

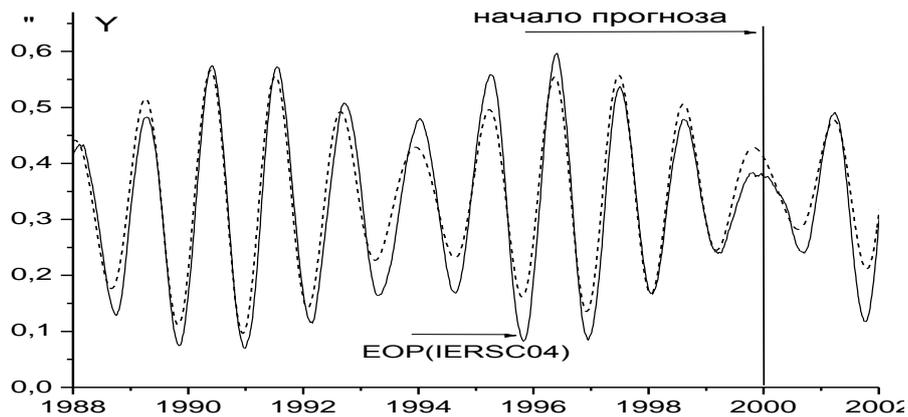


Рис.2

В работе (Малкин, Скурихина, 1996) также отмечается, что для длительного прогноза (более трех месяцев) действительно наилучшим в смысле ср. кв. отклонения прогнозируемых от наблюдаемых значений является именно детерминированное представление ряда полугодовой, годичной и чандлеровской составляющими движения полюса с учетом полиномиального тренда. Из этого следует, что для рядов координат полюса нормально распределенная случайная составляющая имеет ограниченную таким сроком область применения.

МОДЕЛИ АВТОРЕГРЕССИИ И СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО

Наблюдаемая в рядах ПВЗ некоторая неаддитивность составляющих (перераспределение энергии между гармониками, их амплитудные вариации) также может быть интерпретирована с физической точки зрения. Однако она в совокупности с другими нелинейностями процесса ставит предел предсказуемости детерминированных моделей. Можно заведомо сказать, что реальный геофизический процесс рано или поздно выйдет за рамки любой такой модели. Однако и стохастические модели не имеют больших преимуществ, хотя и позволяют заранее оценить доверительный интервал

прогноза. При этом, как правило, основные гармоники детерминированной модели предварительно исключаются из исследуемого ряда.

В большинстве случаев текущее значение ряда x_t может быть записано в зависимости от предыдущей его истории следующим образом:

$$x_t = \xi + \phi_1 x_{(t-1)} + \phi_2 x_{(t-2)} + \phi_3 x_{(t-3)} + \dots + \varepsilon,$$

где ξ – константа, а ϕ_i – регрессионные параметры модели (попросту весовые коэффициенты), $i = 1, 2, \dots, p$. Таким образом, каждое текущее наблюдение состоит из линейной комбинации предшествующих наблюдений и случайного компонента ε на момент t . При этом данное модельное (*авторегрессионное* - AR) представление процесса устойчиво только в том случае, когда его параметры (ϕ_i) удовлетворяют условию конечности их суммы квадратов. В этом случае веса ϕ_i должны уменьшаться достаточно быстро, чтобы ряд был стационарен. Так, для $i = 1$ ϕ_1 должно удовлетворять условию $|\phi_1| < 1$. Заметим, что при $i = 1$ вышеозначенное выражение определяет марковский процесс, каждое текущее состояния которого полностью определяется предыдущим. В этом случае при $\phi_1 \rightarrow 1$ ряд перегружен низкими частотами (трендует), а при $\phi_1 \rightarrow -1$, ряд сильно и быстро флуктуирует.

Помимо вышеописанного представления ряда, текущее его значение может зависеть также от ошибок каждого предшествующего элемента, что записывается в следующем виде:

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{(t-1)} - \theta_2 \varepsilon_{(t-2)} - \theta_3 \varepsilon_{(t-3)} - \dots,$$

где μ – константа, а θ_i – параметры модели *скользящего среднего* (СС), $i = 1, 2, \dots, q$. Таким образом каждое предшествующее наблюдение привносит некий случайный элемент в текущее значение ряда.

Согласно основополагающей работе по анализу и прогнозу временных рядов (Бокс, Дженкинс, 1974) между процессом авторегрессии и скользящего среднего существует обратимость, а именно: конечный процесс авторегрессии может быть записан как бесконечный процесс скользящего среднего, и наоборот. Поэтому при практическом моделировании ряда из соображений экономного его представления необходимо исследовать как AR, так и СС параметры модели. Однако искусство это не из простых, т.к. ошибки в выборе числа параметров AR и СС процессов приводят к быстрой расходимости прогностической модели. В случае стационарных процессов набор AR коэф-

фициентов ϕ_i полностью определяется автокорреляционными функциями с помощью алгоритма Уокера-Юла (Бокс, Дженкинс, 1974).

Для процессов со слабой нестационарностью, выражающейся в наличии трендов и сдвигов среднего, существует разновидность модели АРСС – авторегрессии и *проинтегрированного скользящего среднего* АРПСС (ARIMA в английской аббревиатуре). Суть этого метода состоит в том, что ряд, имеющий колебания среднего, после его трансформирования (дифференцирования один или несколько раз) становится стационарным и к нему может быть применена СС процедура. Однако для прогнозирования полученную СС модель необходимо, естественным образом, «вернуть на место» с помощью интегрирования, после чего прогнозный ряд может быть совмещен с рядом наблюдений.

В наиболее распространенных статистических пакетах (например, STATISTICA) почти всегда используется именно эта прогностическая модель. Это связано с тем, что заранее никогда не известно - имеет ряд смещения среднего или нет. Поэтому для «придания» ему стационарности предварительно исследуется продифференцированный ряд, например, на быстрое затухание автокорреляционной функции и другие критерии стационарности ряда. В случае прогноза движения полюса эта процедура практически эквивалентна удалению детерминированных гармонических составляющих, в то время как для прогноза скорости вращения Земли данная процедура уместна ввиду наличия долгосрочных полиномиальных трендов.

Некоторое усложнение прогностической модели для ПВЗ предложено в работе (Vondrak, 1989). В модель были включены возбуждающие функции атмосферного углового момента (ААМ в общеупотребительной английской аббревиатуре), регулярно вычисляемые несколькими метеорологическими центрами. Константы связи между ААМ и ПВЗ оцениваются при этом из наблюдений и используются совместно с ААМ функциями для экстраполирующего интегрирования движения полюса. Понятно желание свести прогноз фактически к детерминированному другими процессами поведению ПВЗ, в данном случае в зависимости от возбуждающих функций атмосферы, океана и, возможно, других глобальных геофизических процессов обмена моментами с твердой оболочкой Земли. Однако кажется сомнительным использование не менее трудно предсказуемого явления, каковым является динамика атмосферных процессов, океанические течения и т.д., для предсказания поведения ПВЗ. В работе (Kosek et al., 2001) исследуется, например, влияние течения Эль-Ниньо на прогностическую модель

ПВЗ. Обусловленность ПВЗ многими глобальными процессами массопереноса имеет и обратную сторону. Поведение вектора вращения Земли, в свою очередь, возбуждает многие геофизические процессы, как, например, полюсной прилив, дискутируемое возбуждение сейсмичности и др. С этой точки зрения ни детерминированные, ни стохастические модели прогнозирования не адекватны реальности сложного процесса «жизни» геосистемы.

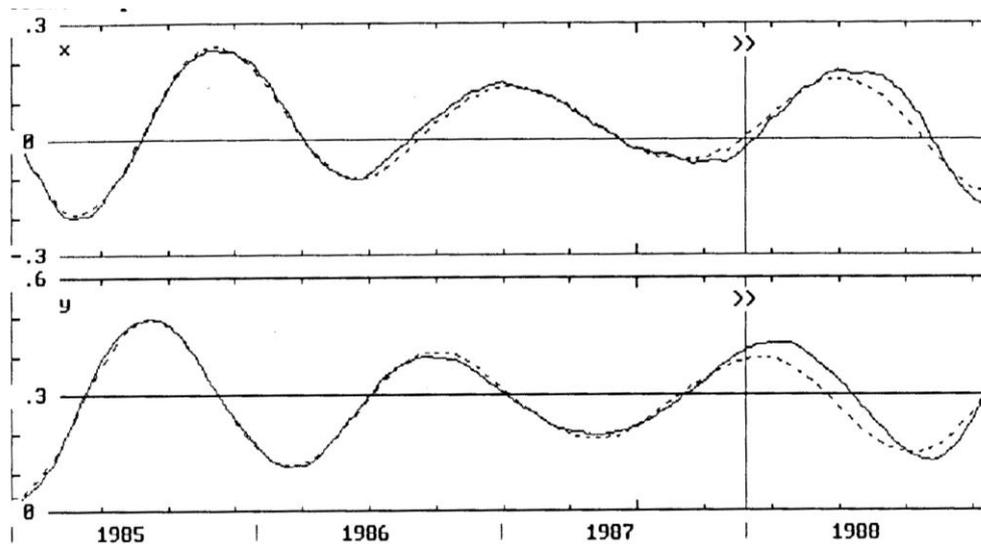


Рис. 3

На рис.3 из работы (Vondrak, 1989) приведён пример прогноза на год вперед части ряда движения полюса на основе предыдущей трёхлетней реализации самого ряда и ряда ААМ функций. В этой работе в детерминированную часть прогноза включены два дополнительных параметра, позволившие оценить с помощью МНК нестабильность и зависимость от амплитуды частоты свободной нутации Земли (чандлеровского движения полюса).

Вообще необходимо заметить, что прогнозирование даже с помощью очень развитых методов всегда требует помимо опыта работы с реализацией конкретного процесса в виде временного ряда, некоторого неформального, по сути, эмпирического подхода по выбору того или иного количества тех или иных параметров модели. Так, например, в прогностических моделях из работы (Малкин, Скурихина, 1996) метод АРСС используется с разным количеством параметров для прогноза разной продолжительности: на 30 дней - $AR(1)CC(5)$, до 90 дней - $AR(1)CC(2)$, а для более продолжительного прогноза, как уже упоминалось, экстраполируется детерминированная составляющая.

РЕКУРРЕНТНЫЙ ПРОГНОЗ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА И СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ КОЛЛОКАЦИИ

Состояние системы, непрерывно меняющейся во времени, в простейшем (линейном) случае описывается дифференциальным уравнением вида:

$$dx/dt = F_t x(t) + G_t \boldsymbol{\varepsilon}(t),$$

где $x(t)$ – m -вектор состояния системы, $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ – возмущающий систему случайный p -вектор (белый шум с нулевым средним значением). Матрицы F_t и G_t заданы и в общем случае зависят от времени. Обычно G – блочная единично-нулевая матрица. Общее решение этого уравнения, как следует из курса дифференциальных уравнений, распадается на два члена. Если не вдаваться в подробные выкладки, то первый из них описывает невозмущенное движение системы, исключительно зависящее от матрицы F_t (через переходную матрицу Φ_t), а второй обусловлен возмущающим воздействием и зависит от G_t и Φ_t . Решение такого уравнения, используемое для динамического моделирования подобного рода систем, фактически, аналогично АР представлению:

$$\boldsymbol{x}(t_{k+1}) = \boldsymbol{A}(t_k) \boldsymbol{x}(t_k) + \boldsymbol{B}(t_k) \boldsymbol{\varepsilon}(t_k),$$

где $\boldsymbol{x}(t_k)$ – вектор ($m \times 1$) состояния системы, $\boldsymbol{\varepsilon}(t_k)$ – вектор ($p \times 1$) возмущающего воздействия, $\boldsymbol{A}(t_k)$ – переходная матрица ($m \times m$) системы на шаге k , $\boldsymbol{B}(t_k)$ – переходная матрица ($m \times p$) способа воздействия на систему. Считается, что эти матрицы заданы. При этом для построения матрицы $\boldsymbol{A}(t_k)$, если из априорных соображений она не известна (т.е. не известна собственно динамическая модель состояния объекта), достаточно знание только такой статистической характеристики процесса $\boldsymbol{x}(t_k)$, как его ковариационная функция.

Существенное отличие вышеприведенного уравнения от АР представления состоит в том, что на момент t_{k+1} система зависит только от предыдущего состояния. То есть это приближение достаточно только для марковских процессов. Именно в этом приближении работает рекуррентный прогноз на основе фильтра Калмана. В общем виде рекурсивный вид алгоритма Калмана записывается следующим образом:

$$\boldsymbol{x}^c(t_j) = \Phi(t_j - t_k) \boldsymbol{x}^c(t_k),$$

где $j > k$, а верхний индекс отмечает оценочное (прогнозируемое) значение величины $\mathbf{x}(t_k)$. Переходя к полной модели предсказания имеем (Petrov et al., 1996):

$$\mathbf{x}^c(t_j) = \Phi(t_j - t_k) \mathbf{x}(t_k) \Phi^T(t_j - t_k) + C(1 - \exp(-C_1(t_j - t_k))) \mathbf{I}.$$

Здесь константы C и C_1 определяются самим процессом (для ПВЗ эти константы являются функциями частоты свободного колебания полюса (чандлеровской), добротностью системы и спектральной плотностью возбуждающего процесса), \mathbf{I} – единичная матрица. Отсюда обновленное состояние системы при априорном знании дисперсии процесса σ_n^2 запишется через так называемую калмановскую матрицу усиления $\mathbf{K}(t) = \mathbf{x}^c(t) (\mathbf{x}^c(t) + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1}$ следующим образом:

$$\mathbf{x}(t_j) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(t_j)) \mathbf{x}^c(t_j).$$

Применение более точного метода средней квадратической коллокации (СКК) для прогноза подробно описано в работе (Губанов, 1997а), а его использование в целях прогнозирования ПВЗ в работах (Губанов, Русинов, 1997б; Русинов, 1998). Основа метода – экстраполяция автоковариационной матрицы процесса, содержащей полную информацию о нем, в предположении стационарности самого процесса.

Как показано в работе (Губанов, 1997а), если автоковариационная функция прогнозируемого процесса неизвестна, то единственным способом прогнозирования остается применение фильтра Калмана, дающего грубое приближение корреляционной функции процесса. Естественно, что прогнозирование на основе фильтра Калмана имеет малый горизонт прогноза и поэтому используется, в основном, для краткосрочного прогнозирования. Однако в применении к прогнозу ПВЗ авторы работы (Petrov et al., 1996) не обнаружили значимых отличий применения калмановской фильтрации и метода СКК. Отмечено, что чисто в вычислительном плане применение фильтра Калмана значительно быстрее работает (в N^2 раз, где N – длина реализации) и требует в N раз меньшей памяти, что, впрочем, естественно для рекурсивных методов.

В работе (Kosek, 2002) (рис.4) приведена ср.кв. ошибка прогноза для рекурсивного автоковариационного (сплошная линия) и рекурсивного Калмановского (пунктирная линия) методов. Видно, что для прогноза до 30-40 дней методы практически эквивалентны (с точностью до вышеупомянутого вычислительного преимущества фильтра Калмана), в то время как после этого периода точность фильтра Калмана значительно ухудшается.

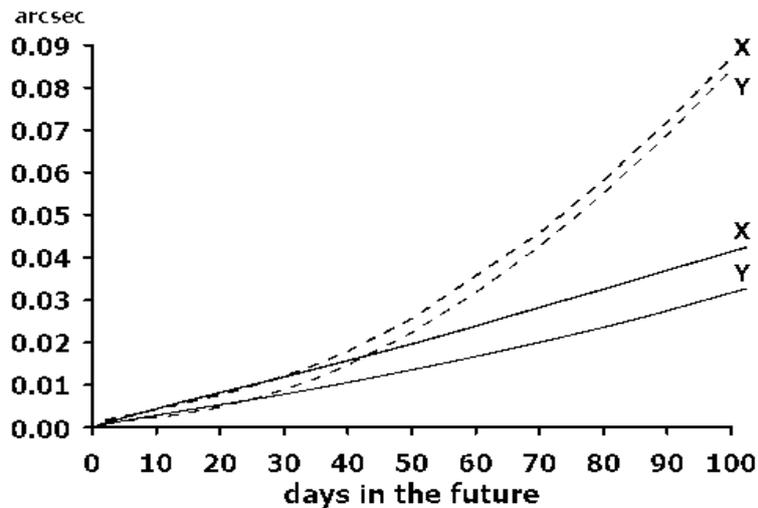


Рис. 4

МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Как уже отмечалось, все ряды параметров вращения Земли имеют нерегулярности, обусловленные климатическими глобальными явлениями, эндогенными процессами в недрах Земли и, вероятно, космическими причинами. Для исследования рядов такой нестационарной природы помимо динамического (оконного) спектрального и вэйвлет анализов используется также метод сингулярного спектрального анализа. Модификация этого метода на основе сингулярного спектрального разложения матрицы, заполняемой последовательными частями временного ряда выбранной длины (M) приведена в работе (Данилов и др., 1997; (<http://www.gistatgroup.com/gus/>)). Подробное исследование возможностей данного метода для геодинимических приложений приведено в работах (Горшков и др., 2000; Воротков и др., 2002).

Данный метод позволяет по выбранным компонентам создавать продолжение ряда на L точек. При этом совершенно необязательно предварительно отделять стохастическую часть процесса от детерминированной. Однако длина лага (окна) M должна быть выбрана достаточной, чтобы приближенно обеспечить это разделение, т.е. разделение шумовой и информативной компонент. Этот момент в прогнозировании с помощью данного метода также надо отнести к полуэмпирическим. После этого по выбранному набору главных компонент с помощью диагонального усреднения получается восстановленный ряд, к последним $M+L-1$ точкам которого затем применяется рекуррентная формула, сходная по виду с формулой AP процесса, но имеющая точную размерность

M-1. Таким образом характеристический полином для прогнозирования в точности равен базису разложения.

В зависимости от того, делается ли диагональное усреднение до или после продолжения ряда, различают рекуррентный и векторный прогноз. Близость этих прогнозов должна свидетельствовать об устойчивости полученного прогноза. Свойства диагонального усреднения таковы, что первые и последние члены ряда восстанавливаются с меньшей точностью (краевой эффект). Поскольку в рекуррентном прогнозе используются в качестве начальных данных последние *M-1* членов ряда, это может вызвать увеличение ошибок прогноза. В этом смысле векторный прогноз более консервативен, но менее адаптивен к меняющейся к концу ряда тенденции его поведения.

Вычислительный ресурс времени ССА, как и в СКК, пропорционален M^2 . Однако это не единственный недостаток большого лага *M*. Чем больше *M*, тем одновременно больше размер характеристического полинома в рекуррентной формуле при прогнозировании, что может привести к появлению побочных корней полинома. Поэтому в этом методе выбор оптимального лага для конкретного ряда при его прогнозировании более существенен, чем при анализе. Строго говоря, то, что касалось конечности суммы квадратов коэффициентов ϕ_i АР-процесса, в не меньшей степени относится и к методу СКК при продолжении автокорреляционной функции и к параметрам в рекуррентной формуле данного ССА метода. Чудес не бывает, дело только в операционном удобстве. Для ССА прогноза можно, например, заранее не беспокоиться о стационарности ряда, по виду и значимости главных компонент разложения можно оценить необходимое их количество для прогноза.

Поскольку прогноз на основе ССА до сих пор не применялся в геодинимической практике, продемонстрируем его возможности на ряде EOP(IERS)C04.

Был сделан прогноз X-координаты полюса на полгода (рис.5, слева) и на год (рис.5, справа) ряда EOP(IERS)C04, предварительно приведенного на интервал 0,01 года. Использовался лаг в 6 лет. Восстановление ряда было осуществлено по 46 первым главным компонентам (все компоненты до 0.002%). Прогноз осуществлялся по известным на начало февраля (на год) и на начало июня 2004 года (на полгода) данным. Таким образом, моделировались реальные условия прогноза. Данные для сравнения выбраны на начало октября 2004 года.

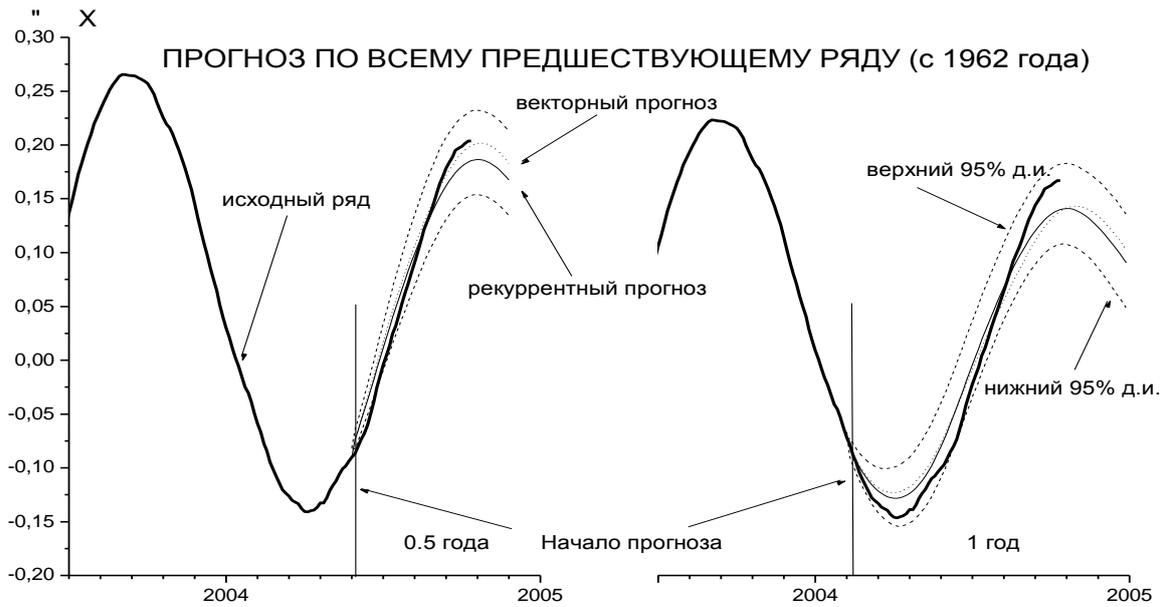


Рис. 5

Видно, что абсолютное максимальное отклонение прогноза достигается для моментов экстремумов кривой. Этот результат следует признать не очень хорошим, тем более что эта величина достигается именно на экстремуме ряда в ближайшие 40-50 дней прогноза. Аналогичный прогноз был сделан по 6-летней предшествующей части ряда с лагом в 3 года (рис.6). Качество прогноза в такой же степени удовлетворительное и не хуже приведенных выше прогнозов, как видно из рис.7.

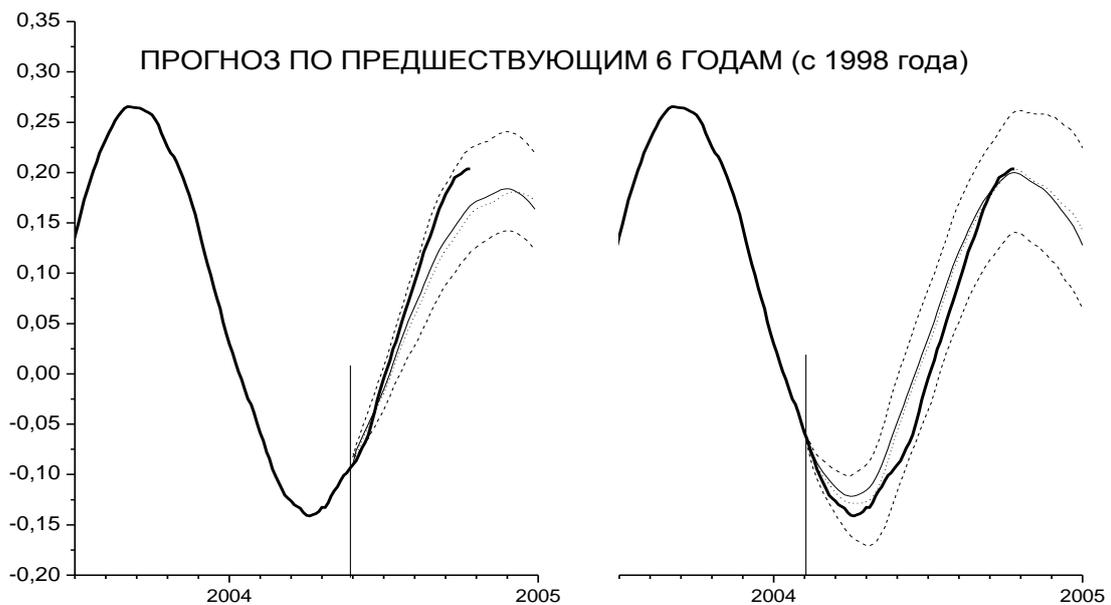


Рис.6

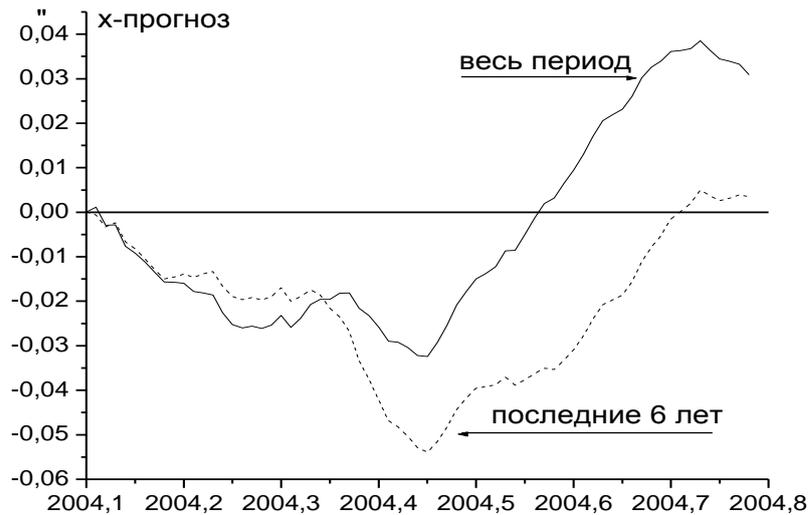


Рис. 7

В качестве более «трудного» прогноза приведем прогноз ряда продолжительности суток LOD этим же методом. Предварительно из рядов LOD были исключены все приливные члены, т.е. исследовался и прогнозировался ряд LODS. Помимо чётко выделяемых декадных и сезонных вариаций (99.5% мощности ряда) ряд имеет непрерывный спектр «шумовых» составляющих. Есть, однако, одна особенность в шумовых компонентах рядов ПВЗ, позволяющая «на глаз» определить порог между информационными компонентами и чисто наблюдательным (нормально распределённым) шумом. В 1987 году резко изменился состав наблюдательных средств ПВЗ, сопровождавшийся таким же резким, почти на порядок, повышением точности определения ПВЗ. В ССА компонентах с шумовым содержанием это разделение отчетливо заметно, что позволяет эмпирически отделять «зёрна от плевел».

На рис. 8 слева дан прогноз ряда LODS на полгода вперед от начала октября 2004 года, а на рис. 8 справа - сопоставление ряда, спрогнозированного с начала года до октября, с реальным рядом. Обозначения аналогичны рисункам 5-7. Ряд LODS также был предварительно интерполирован на каждые 0,01 года, лаг равен 6 годам ($M=600$), выбрана первая треть от общего числа компонент для прогноза.

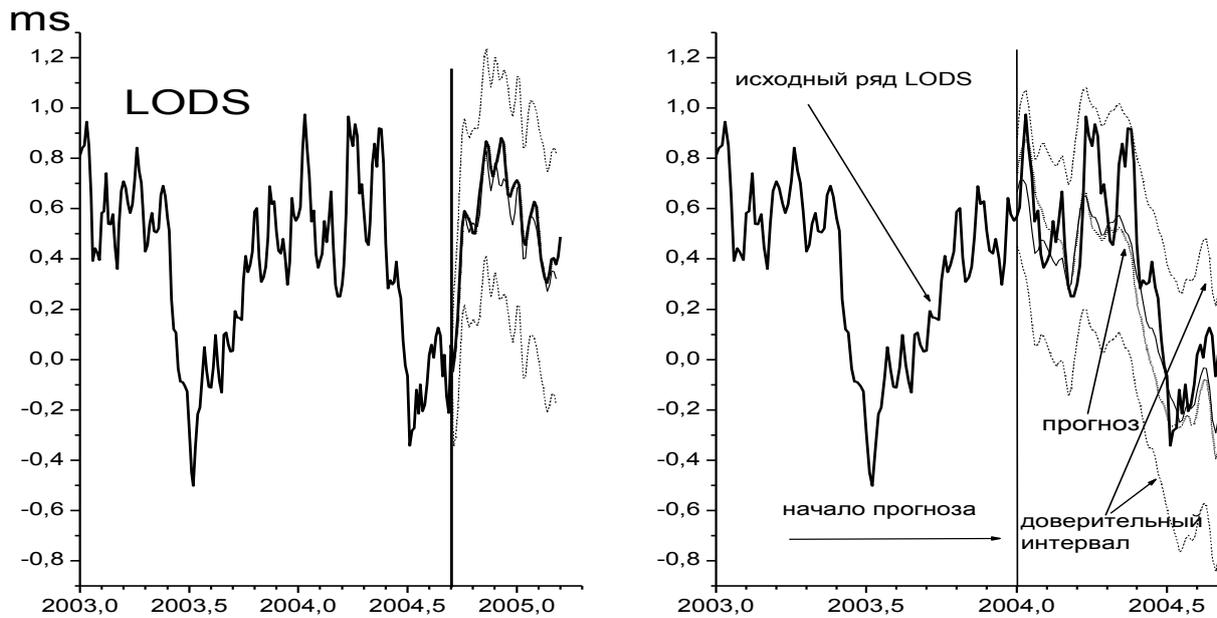


Рис. 8

Для сопоставления с IERS прогнозом были использованы данные из окончательного (finals2000A.all) решения (<http://maia.usno.navy.mil/bulletin-a.html>). Прогноз для LOD в этом решении отсутствует, поэтому был взят прогноз для ряда UT1-UTC, производная от которого и есть продолжительность суток. На рис. 9 представлен прогноз на год вперед ряда UT1-UTC на основе всех данных наблюдений с 1.01.1999 по 21.10.2004. На этом интервале не вводилось дополнительной секунды, поэтому ряд не имеет скачков. Видно, что на полгода прогноз IERS и наш прогноз с помощью ССА близки, а в точке предполагаемого изгиба кривой резко расходятся.

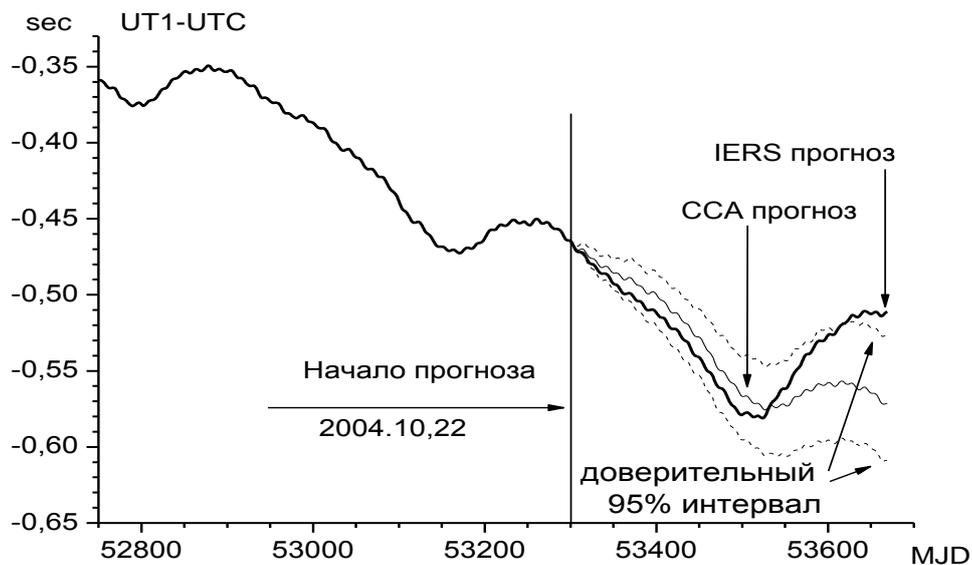


Рис. 9

ПРОГНОЗ СРЕДНЕГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

В области предсказания ПВЗ особняком стоит работа основоположника фрактальных исследований Мандельброта (Mandelbrot, McCany, 1970), посвященная исследованию векового и чандлеровского движения полюса. Работа касается в основном исследования движения среднего полюса и возможности его прогноза. Из трех возможных предположений о характере движения среднего полюса: 1) полюс движется детерминировано, 2) движения полюса есть стационарный процесс случайного колебания около фиксированного положения (спектр не зависит от частоты), 3) полюс свободно блуждает в результате суммарного воздействия последовательных толчков, т.е. совершает броуновское движение (спектр обратно пропорционален квадрату частоты), Мандельброт, на основе предложенной им методики (анализ кумулятивного ранга), делает вывод о промежуточном между белым шумом (2) и броуновским движением (3) характере движения полюса.

Таким образом спектр движения среднего полюса обратно пропорционален первой степени частоты. Это означает, что такой процесс не стационарен, практически не усредняем и богат низкочастотными компонентами. В нашей работе (Горшков и др, 1998), охватывающей существенно больший интервал наблюдений, движение среднего полюса получилось всё же ближе к броуновскому. Для оценок использовался метод нормированного размаха. В прогностическом аспекте в любом случае это означает, что движение среднего полюса не прогнозируется. Следует отметить, что метод кумулятивного размаха не может быть отнесен к мощным методам исследования временных рядов ввиду качества достигаемых с его помощью выводов.

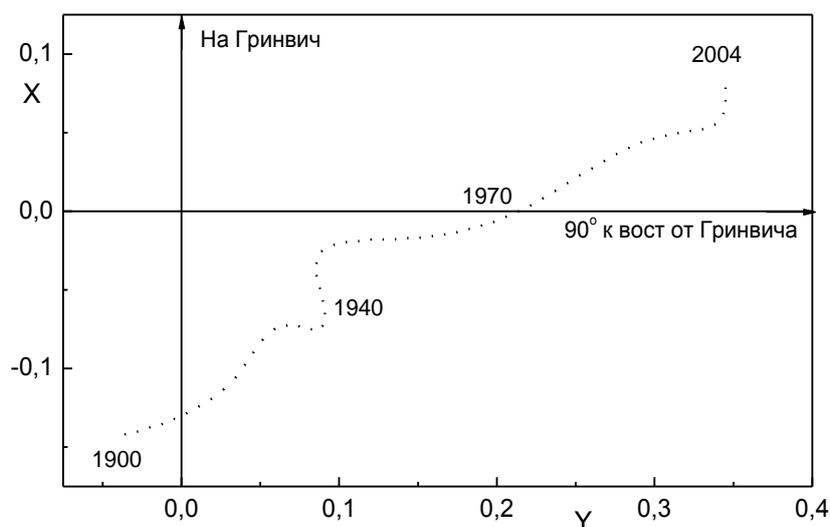


Рис. 10.

На рис. 10 приведено движение среднего полюса по данным EOP(IERS)C01, выделенное методом ССА по наиболее значимым компонентам. В заметном нелинейном движении среднего полюса неоднократно пытались обнаружить гармоники, так называемые волны Марковица с периодом около 30 лет (одна из последних работ на эту тему – Schuh et al., 2001).

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Помимо вышеперечисленных существует бурно развивающийся метод прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей. В основе искусственных нейронных сетей лежит математическая модель функционирования разных типов нейронов. Помимо этого сами нейронные сети бывают разного вида и структуры. Нейронные сети необходимо настраивать, т.е. обучать на примерах выборочных рядов из того же процесса. Но существуют и самоорганизующиеся сети также разного типа. Под каждую задачу необходимо проектировать адекватную структуру сети – количество слоев сети, количество нейронов в каждом слое и связи между слоями.

Будучи спроектированной, нейронная сеть способна к обобщению полученной информации (знаний). Это означает, что сеть способна генерировать результаты при подаче на вход данных, относящихся к тому же процессу, но пока не участвовавших в процессе обучения. Эта способность возникает вследствие возможности сети кодировать различные комбинации ранее полученных входных данных. Способность сохранять информацию по прецедентам и при схожем проявлении ее прогнозировать – замечательное и многообещающее свойство нейронных сетей.

Этот способ прогнозирования может привести к значительным успехам в тех неформализуемых случаях, какой отмечался в примере со сбоями при прогнозе ПВЗ в периоды замирания сезонно-чандлеровских биений полюса. Однако работ в этой области прогнозирования для целей геодинамики пока единицы, а полученный результат практически эквивалентен IERS прогнозу (<http://www.cbk.waw.pl/~kosek/>).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре методы прогнозирования рассматривались на наиболее простом, с точки зрения построения модели, примере. Для других геофизических процессов такие простые, практически детерминированные модели находятся редко. В том случае,

когда они обнаруживаются, исследователь вправе искать закономерность физического свойства. Однако случайность всегда проявляется в реальных процессах. За вычетом детерминированной составляющей в наблюдениях остается еще целый мир случайностей. В этом мире также существуют свои закономерности, выражающиеся в специфике функций распределения, в характерных особенностях спектров и т. д. Есть надежда, что поиск «закономерностей» в стохастическом мире когда-нибудь вернет первоначальный смысл слову стохастический – умеющий угадывать.

Идеи детерминизма неистребимы на каком-то глубоком, интуитивном уровне, подсказывающем, что в мире все взаимосвязано и даже то, что кажется случайным, имеет ряд скрытых от недостаточно просвещенного ума причин и следствий, строго ведущих к этому событию. Фактически это некое почти религиозное чувство, предполагающее наличие цели или плана, по которому складывается цепь событий. Придание единства, не случайности, скрытого смысла окружающему нас миру, делает его человеческим и приемлемым для проживания. Человек в этом случае находится не сбоку, сверху или снизу, а является частью мироздания, которое в этом случае не может быть ему враждебным и, что более важно, ждёт такого же отношения от него. Наделяя изучаемый объект элементами субъекта, мы ставим *нравственный принцип* в науке на своё законное место.

Этот элемент чувства недооценивается наукой, обычно отстраняющейся от субъективности при «препарировании» объективной реальности. Тем самым искажается и сам исследуемый объект, т.к. при этом его связи, встроенность в систему частично усекаются и, в частности, искажается его прогнозируемая динамика. Это стало очевидным, например, при исследовании землетрясений, где роль антропогенного фактора давно ощутима (Кпорoff L., Gardner J., 1972). В научную аксиоматику должно быть включено единство мира, как некий сходящийся процесс, как некий план, имеющий цель. С этой антропной точки зрения человек становится включенным в процесс и поэтому должен соотносить свои «эксперименты» с планом строительства общего дома. Осознание того, что мы не вне, а внутри, вовсе не ограничивает нашу свободу, но делает её более ответственной. Не всё нами осуществляемое разумно и не всё разумное с нашей точки зрения должно быть осуществлено без нравственной экспертизы. В этой связи задачи прогнозирования в широком плане должны иметь приоритет в науке.

ЛИТЕРАТУРА:

- Акуленко Л.Д., Кумакшев С.А., Марков Ю.Г., Рыхлова Л.В., *Прогноз движения полюса деформируемой Земли*, 2002, АЖ, т.79, № 10, с 952-960.
- Бокс Дж., Дженкинс Г., *Анализ временных рядов*, «Мир», 1974, т.1, с. 407.
- Владимиров В.А. и др., *Управление риском*, «Наука», 2000, отв. Ред. Макаров И.М., с.432.
- Воротков М.В., Горшков В.Л., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я., *Исследование основных составляющих в движении полюса земли*, 2002, Изв. ГАО, №216, с. 406-409.
- Горшков В.Л., Миллер Н.О., Воротков М.В., Баушев А.Н., *О персистентности параметров ориентации Земли*, 1998, Изв. ГАО, № 213, с.269--272.
- Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я., *Исследование геодинимических рядов методом главных компонент*, 2000, Изв. ГАО, №214, с. 173-180.
- Губанов В.С., *Обобщенный метод наименьших квадратов*, 1997а, СПб «Наука», с. 320.
- Губанов В.С., Русинов Ю.Л., *Прогнозирование движения полюса методом СКК*, 1997б, Сообщения ИПА РАН, СПб, № 109.
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.), *Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»*, 1997, СПбГУ, с. 308.
- Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я., *Флуктуации геофизических полей и прогноз землетрясений*, 2003, Физика Земли, №4, с. 3 - 20.
- Малкин З.М., Скурихина Е., *On prediction of EOP*, 1996, Communications of IAA, СПб, № 93.
- Русинов Ю.Л., *Прогнозирование ПВЗ методом СКК*, 1998, Сообщения ИПА РАН, СПб, № 116..
- Knopff L., Gardner J., *Higher seismic activity during local night on the raw worldwide earthquake catalogue*, 1972, Geophys. J. R. astr. Soc., 28, 311-313.
- Kosek W., McCarty D.D., Luzum B.J., *Possible improvement of Earth orientation forecast using autocovariance prediction procedures*, 1998, Journal of Geodesy, v. 72, No 4..
- Kosek W., McCarty D.D., Luzum B.J., *El Nino impact on polar motion prediction errors*, 2001, Studia Geophysica et Geodaetica, v. 45, p. 347-361.
- Mandelbrot B.B., K. McCany, *On secular and chandlerian pole wobbles*, Geophys. J.R. astr.Soc., 1970, v.21, p. 217-232.
- McCarty D.D., Luzum B.J., *Prediction of Earth Orientation*, 1991, Bull. Geod., V.65, p. 18-21.
- Petrov S., Brzezinski A., Gubanov V., *A stochastic model for polar motion with application to smoothing, prediction and combining*, 1996, Artificial Satellites, Planetary Geodesy, No 26, v. 31, pp. 51 – 70.
- Schuh, H.; Nagel, S.; Seitz T., *Linear drift and periodic variations observed in long time series of polar motion*, 2001, Journal of Geodesy, v.74, pp. 701-710.
- Vondrak J., *Prediction of polar motion from air and water excitations*, 1989, Rep No 402 Dep. of Geodetic Science and Surveying the Ohio State Univ., p.60.

ON FORECASTING METHODS IN GEODYNAMICS

V. Gorshkov

SUMMARY

A short description of the methods for prediction of Earth parameter orientation is given. Some comparative analysis of the various forecasting tools is demonstrated with an example of IERS data.