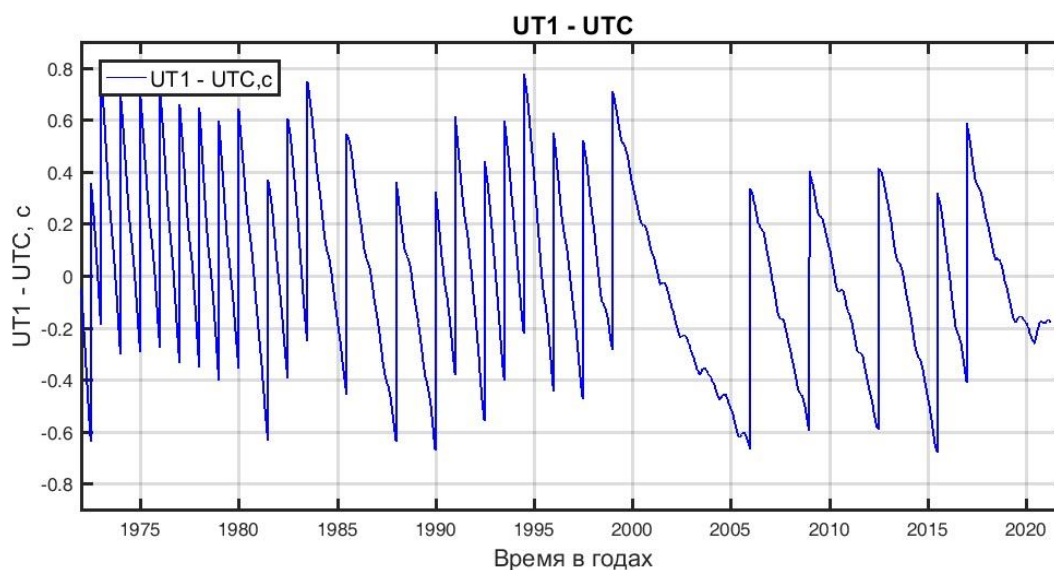


Параметры вращения Земли

В параметры вращения Земли (ПВЗ, EOP) входят: [UT1-UTC](#), [вариация продолжительности суток](#) (*Length of day, LOD*), [координаты земного полюса](#) и [поправки к теоретическим координатам небесного полюса](#) (они однозначно связаны с [поправками к теоретическим углам прецессии-нутации](#)). В оперативных [бюллетенях Q ГСВЧ](#) публикуются только значения *UT1-UTC* и координаты земного полюса x_p и y_p .

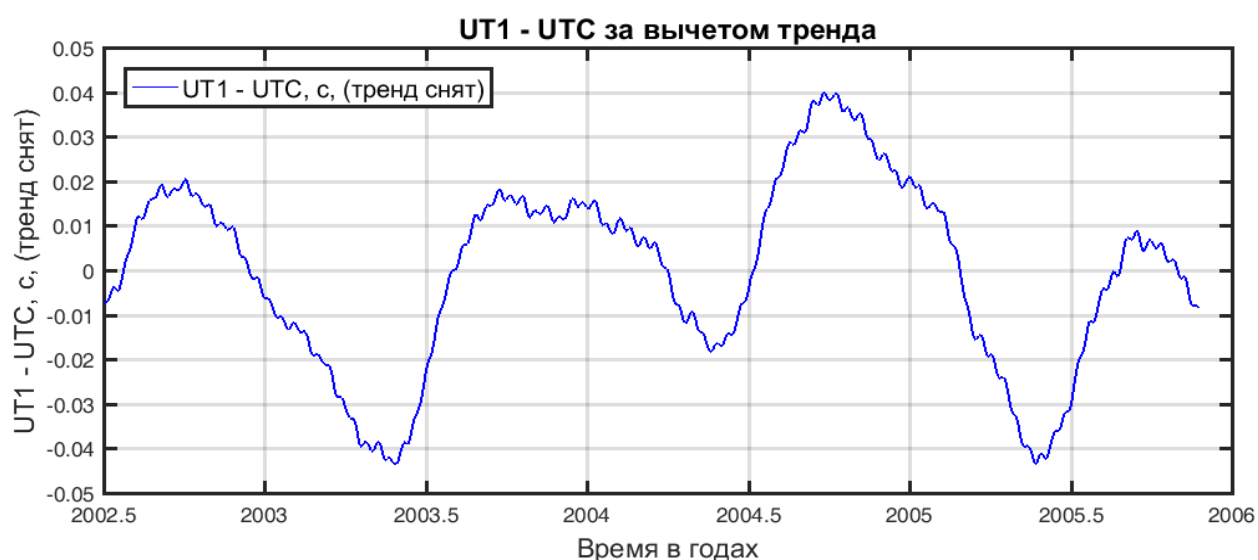
UT1-UTC, (с) – разность шкал всемирного времени *UT1* и всемирного координированного времени *UTC*. Этот параметр вращения Земли характеризует отличие величины осевого поворота Земли от величины поворота, осуществляемого Землей, вращающейся с частотой в один оборот (между двумя последовательными нижними кульминациями среднего Солнца) за одни атомные сутки (за 86400 секунд *SI*). В момент начала введения дополнительной секунды в шкалу *UTC*, *UT1-UTC* меняется скачком, поэтому график *UT1-UTC* на больших промежутках времени имеет характерный пилообразный вид:



Видно, что основной составляющей *UT1-UTC* между двумя последовательными введениями дополнительной секунды является ниспадающий «склон», обусловленный разницей между средними солнечными сутками за данный период и эфемеридными средними сутками на эпоху 1900 года. При их равенстве, «склон» сменился бы «равниной», а если бы Земля начала вращаться в среднем быстрее, чем в 1900 году, то был бы не «склон», а «подъём».

Следующая по значимости составляющая – **сезонная**. Она является суперпозицией годовой и полугодовой гармонических волн. Главным образом, именно из-за нее «склон» имеет «ухабистый» вид.

Чтобы заметить сезонную волну нужно вычесть тренд на участке между введениями дополнительной секунды в шкалу *UTC*. Результат показан на нижеследующем рисунке. Там же видны главные из приливных гармоник в виде «гребешков» на сезонной волне.

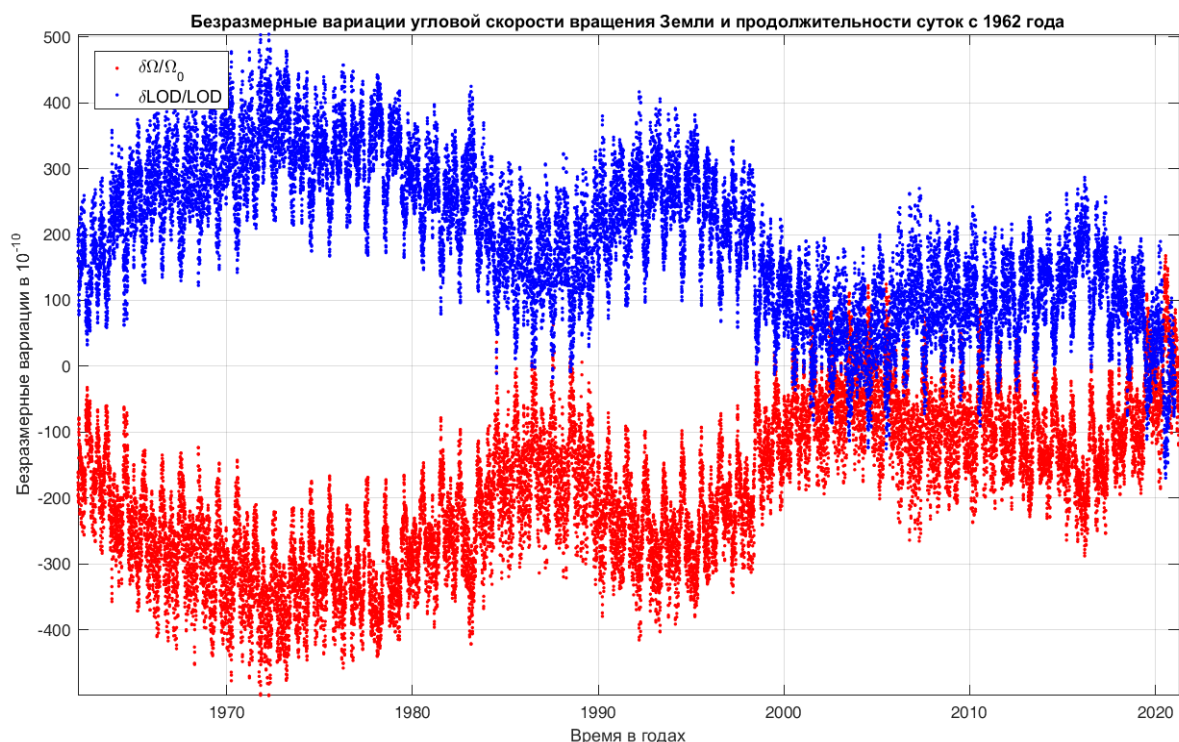


Вариация продолжительности суток, (с) – разность продолжительности суток *UT1* и суток длительностью 86400 секунд *SI*. Если Земля вращается медленнее, чем один оборот за сутки *SI*, то вариация продолжительности суток положительна, если быстрее – отрицательна, а если они совпадают – то равна нулю.

Относительная вариация продолжительности суток практически равна относительной вариации угловой скорости вращения Земли со знаком «минус». Из этого следует, что если Земля вращается медленнее, чем один оборот за сутки *SI*, то вариация угловой скорости вращения Земли меньше нуля, если быстрее – больше нуля, а если они совпадают – то равна нулю. При этом максимуму вариации продолжительности суток соответствует минимум вариации угловой скорости вращения Земли и наоборот. Если эти относительные вариации изобразить на одном графике, то они будут зеркальным отражением друг друга (см. нижеследующий [рисунок](#)).

Поскольку именно вариация угловой скорости вращения Земли связана с производной от *UT1-UTC*, а также потому, что поведение вариации продолжительности суток часто рассматривается в публикациях, рассмотрим здесь поведение не вариации продолжительности суток, а вариации угловой скорости вращения Земли.

Величина вариаций угловой скорости находится на уровне восьмого знака после запятой или, другими словами, составляет десятки миллиардных долей по абсолютной величине. Несмотря на столь малую величину, изменение кинетической энергии Земли соответствующее вариациям угловой скорости вращения значительно из-за огромных размеров планеты. Например, относительное изменение угловой скорости вращения Земли на одну миллиардную долю приводит к изменению кинетической энергии вращения примерно на 0,4 секстиллиона ($4 \cdot 10^{20}$) Дж, что сопоставимо с энергией выделяющейся ежегодно в результате землетрясений.



Относительные вариации угловой скорости вращения Земли имеют сложную структуру.

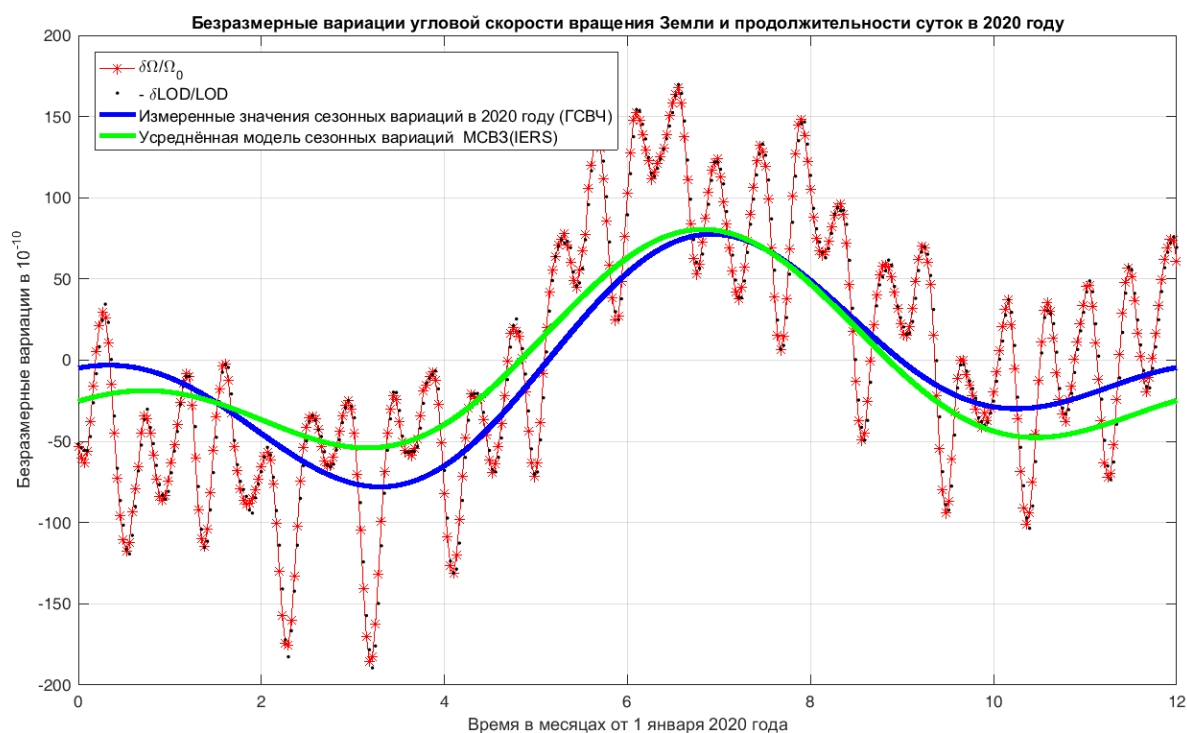
Они содержат:

- многолетние квазипериодические вариации с отклонением от среднего значения примерно на $4 \cdot 10^{-8}$, хорошо заметные на промежутках времени в сотню лет;
- сезонные вариации угловой скорости вращения Земли, полностью укладываемые в полосу ± 15 миллиардных относительно среднегодового значения;
- короткопериодические вариации с периодами в пределах квартала (где максимальная гармоника имеет период чуть меньше двух недель) и амплитудой около $5 \cdot 10^{-9}$;
- вековой тренд, связанный с вековым замедлением вращения Земли (угловая скорость уменьшается примерно на 20 миллиардных за сто лет).

Вековой тренд очень мал, он становится хорошо заметен только на длительных промежутках времени, сравнимых с несколькими сотнями и даже тысячами лет.

Причинами вариаций угловой скорости вращения Земли являются погодные и климатические явления, приливное влияние Луны, Солнца и планет, а также глобальные геодинамические процессы, происходящие внутри Земли.

Если рассмотреть поведение угловой скорости вращения Земли в течение года, можно заметить, что годовой промежуток времени охватывает слишком короткие части прямой векового тренда и кривой многолетних квазипериодических вариаций. Поэтому на годовом промежутке их вклад в неё небольшой. Главными на годовом интервале являются сезонная и короткопериодическая составляющие (см. следующий рисунок. На этом рисунке относительная вариация LOD изображена с обратным знаком).



Сезонная составляющая состоит из двух гармоник: годовой и полугодовой. Международной службой вращения Земли и опорных систем ($MCB3$, $IERS$) была построена эмпирическая модель сезонных вариаций путём усреднения амплитуд и фаз сезонных вариаций по многолетним измерениям. Однако, как это можно видеть на рисунке, определённая из измерений сезонная составляющая для отдельно взятого года несколько отличается от этой усреднённой модели.

Обычно угловая скорость вращения Земли достигает минимального за год значения в марте-апреле, а максимального за год значения в июле-августе. Такой разброс сроков связан с тем, что на сезонные составляющие (главные на годовом интервале) накладываются короткопериодические составляющие

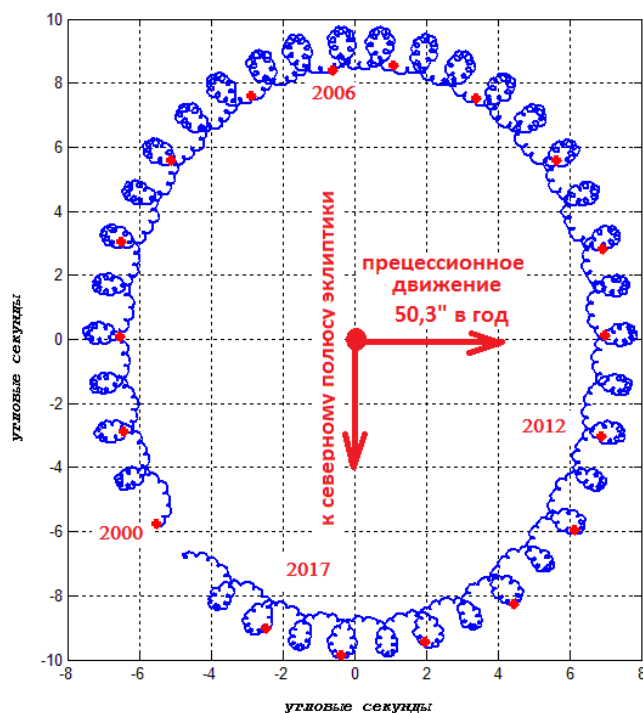
вариаций угловой скорости вращения Земли, а также небольшой тренд. Таким образом дата наступления максимума или минимума угловой скорости вращения Земли на годовом интервале зависит от результата их суперпозиции.

До сих пор речь шла об осевом вращении, но ось вращения Земли, кроме того, меняет свое направление в пространстве. С практической точки зрения удобно разбить общее изменение направления оси вращения Земли в пространстве на две части: медленную (с периодами более двух суток) в небесной системе координат и быструю (с периодами менее двух суток). Это достигается введением специальной промежуточной небесной системы координат. Её полюс называется небесным промежуточным полюсом (*НПП, CIP*).

$d\psi$, $d\varepsilon$ – поправки к теоретическим углам прецессии-нутаии, (") Углы прецессии-нутаии ψ и ε – характеризуют положение небесного промежуточного полюса в небесной геоцентрической опорной системе координат. Они описывают ту часть вариаций направления оси вращения Земли в пространстве, которая обусловлена главным образом космическими факторами (приливным влиянием Луны, Солнца и больших планет Солнечной системы). Углы прецессии-нутаии выделяются из полной вариации направления оси вращения Земли в пространстве с помощью ограничения на периоды (или соответствующие частоты) составляющих их гармоник: они имеют периоды более 2 суток (частоты менее 0,5 оборота за одни звездные сутки по абсолютной величине) в небесной системе координат. На нижеследующем [рисунке](#) показано движение небесного промежуточного полюса так, как оно выглядит извне при взгляде из космоса в направлении на северный полюс.

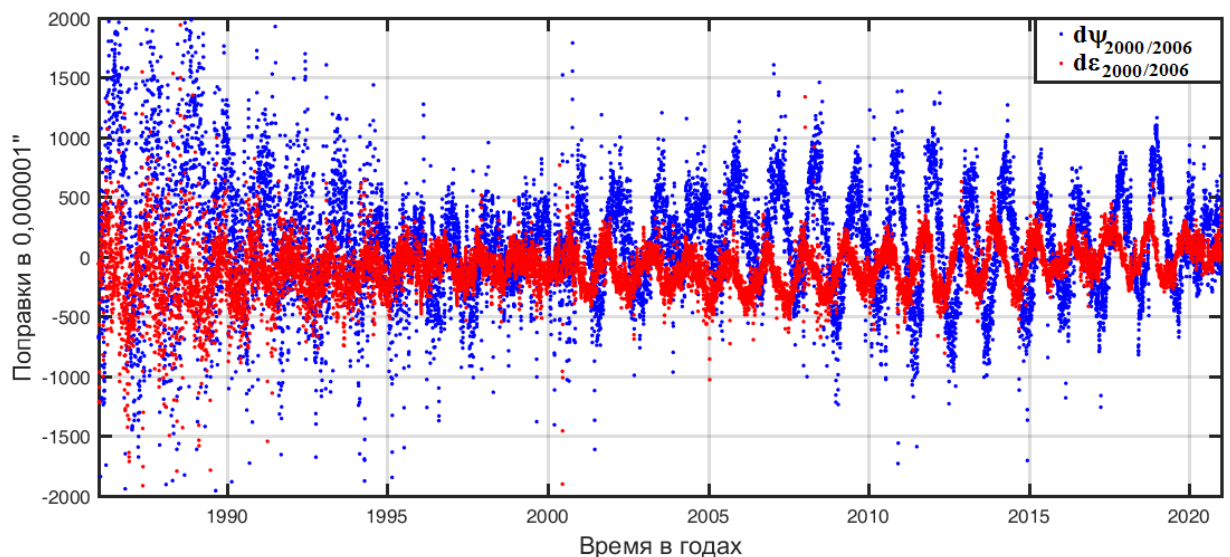
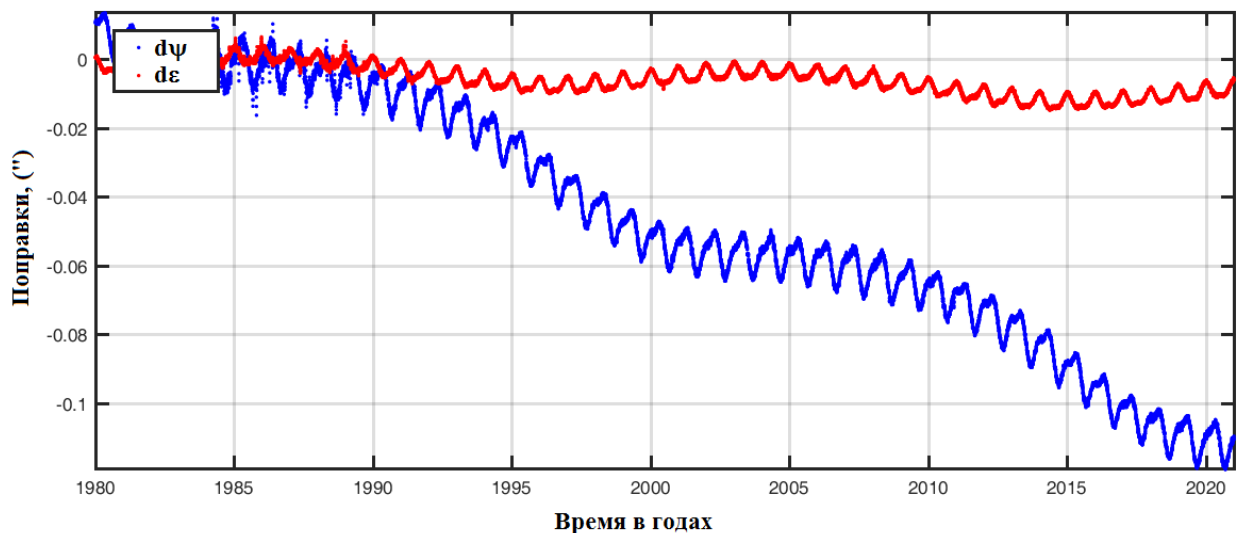
В первом приближении нутационное движение оси вращения представляет собою эллипс и полный оборот по нему совершается за 18,6 года. Полуоси нутационного «эллипса» составляют около 10" и 8". Более точное рассмотрение показывает, что полное нутационное движение состоит из более тысячи гармонических составляющих, которые выглядят на рисунке как петли. Главная из них – это эллиптическое движение с периодом 18,6 года и полуосями около 9" и 7", которая и придает полному нутационному движению эллиптическую форму. Вторая по величине – полугодовая гармоника, ответственная за формирование больших петель. Она тоже эллиптическая с полуосями около 0,6" и 0,5". А главная составляющая следующих по величине завитков образована почти круговым эллиптическим движением с периодом чуть меньше двух недель (13,6 суток) и полуосями около 0,01". Полугодовой и двухнедельной составляющим соответствуют смещения с амплитудами 15 м и 30 см на поверхности Земли соответственно. Три гармоники 19-ти летняя, годовая и двухнедельная определяют приближённую форму нутационного движения.

Поскольку существуют высокоточные теории движения больших планет Солнечной системы и Луны, то существуют модели нутации, которые позволяют предвычислять углы прецессии-нутации с высокой точностью, да и главная их часть меняется медленно. Поэтому, хотя углы прецессии-нутации и велики, их определение представляет меньшую проблему для оперативной службы ПВЗ, чем определение координат земного полюса.



Поправки $d\psi$, $d\varepsilon$ – это величины, которые нужно прибавить к углам ψ_{1980} , ε_{1980} , вычисленным по модели прецессии-нутации *MAC1980*, чтобы получить наблюдаемые величины ψ , ε . Следует заметить, что использование старой модели *MAC1980* не влияет на точность результирующих величин, поскольку неточности модели компенсируются соответствующими величинами поправок и в сумме они дают наблюдаемые величины ψ и ε с той точностью, с которой они могут быть определены из измерений. На [первом](#) из нижеследующей пары рисунков изображены эти поправки, вычисленные вычитанием углов ψ_{1980} и ε_{1980} модели *MAC1980* из углов ψ и ε , определенных из измерений.

Основную часть поправок составляет линейная часть и гармоники с главными периодами нутации (18,6 года, полугодовой, двухнедельный и т.д.), необходимые для компенсации отличия величин прецессии и главных гармоник в модели *MAC1980* от наблюдаемых. Эти неточности модели (и ряд других) исключены в новой модели *MAC2000/2006*. Поправки к ее углам прецессии-нутации ($d\psi_{2000/2006}$ и $d\varepsilon_{2000/2006}$) изображены на [втором](#) из нижеследующей пары рисунков.



Основную часть оставшихся отклонений составляют колебания на так называемой частоте свободной нутации ядра (*FCN*) с периодом около 430 суток относительно небесной системы координат. Поскольку соответствующее вращение не является стабильным во времени, оно не входит в современную теорию прецессии-нутации *MAC2000/2006*.

Поправки $d\psi$, $d\varepsilon$ связаны известной зависимостью с поправками к координатам небесного полюса dX_C , dY_C .

dX_C , dY_C – поправки к теоретическим координатам небесного полюса, (")¹

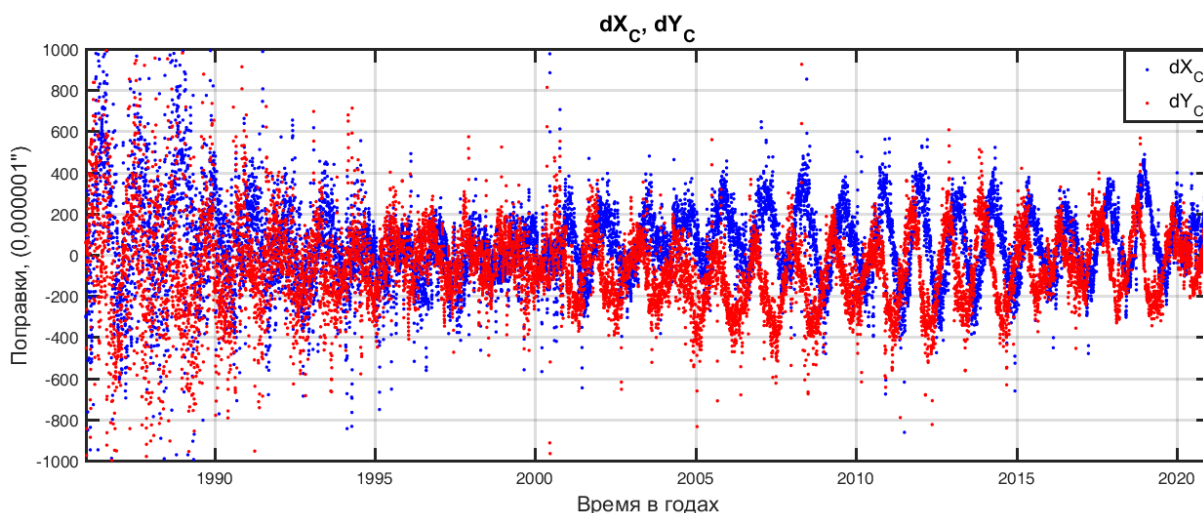
Координаты небесного полюса X_C , Y_C – координаты промежуточного полюса в небесной геоцентрической опорной системе координат. Они связаны известными формулами с углами прецессии-нутации ψ и ε .

1 – Иногда координаты полюсов выражают в особых единицах: в метрах (или миллиметрах) на поверхности Земли. В этих единицах 1" соответствует приблизительно 30 метрам на поверхности Земли, 0,001" – 3 см на поверхности Земли, 0,0001" – 3 мм на поверхности Земли.

Координаты небесного полюса так же характеризуют ту часть вариаций направления оси вращения Земли в пространстве, которая обусловлена главным образом космическими факторами (приливным влиянием Луны, Солнца и больших планет Солнечной системы).

Координаты небесного полюса выделяются из полной вариации направления оси вращения Земли в пространстве с помощью ограничения на периоды (или соответствующие частоты) составляющих их гармоник: они имеют периоды более 2 суток (частоты менее 0,5 оборота за одни звездные сутки по абсолютной величине) в небесной системе координат. Поправки dX_C , dY_C – это величины, которые нужно прибавить к углам $X_{C2000/2006}$, $Y_{C2000/2006}$, вычисленным по модели прецессии-нутаии $MAC2000/2006$, чтобы получить наблюдаемые величины X_C , Y_C . Поправки dX_C и dY_C , определенные из измерений изображены на нижеследующем [рисунке](#).

Основную часть отличий составляют колебания на так называемой частоте свободной нутаии ядра (FCN) с периодом около 430 суток относительно небесной системы координат. Поскольку это вращение не является стабильным во времени, оно не входит в современную теорию прецессии-нутаии $MAC2000/2006$. Его амплитуды колеблются в пределах от 0,0001" до 0,0003".



Поправки dX_C , dY_C связаны известной зависимостью с поправками к координатам небесного полюса $d\psi$, $d\varepsilon$.

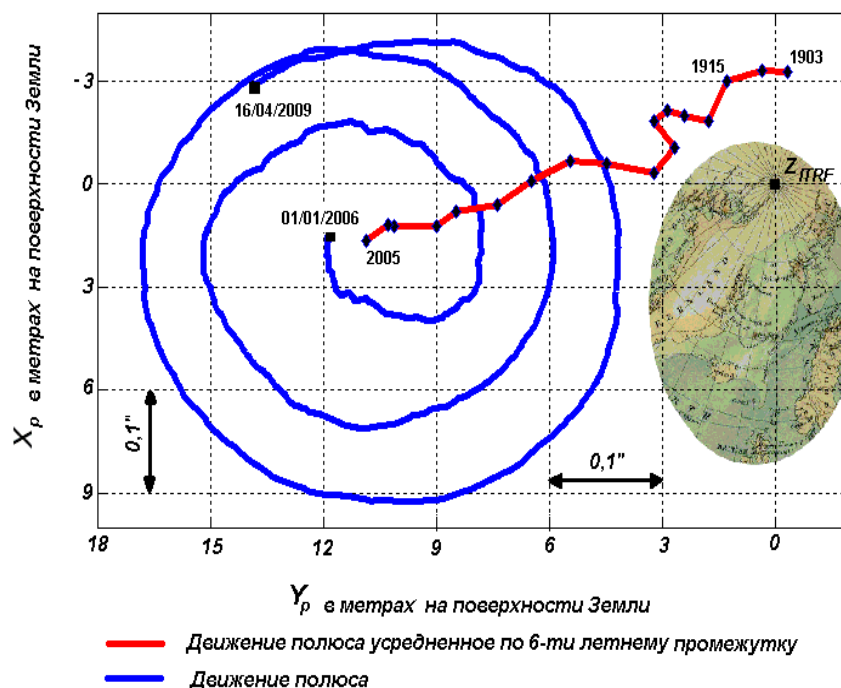
X_p , Y_p – координаты земного полюса, (")¹ – координаты небесного промежуточного полюса в земной опорной системе координат.

1 – Иногда координаты полюсов выражают в особых единицах: в метрах (или миллиметрах) на поверхности Земли. В этих единицах 1" соответствует приблизительно 30 метрам на поверхности Земли, 0,001" – 3 см на поверхности Земли, 0,0001" – 3 мм на поверхности Земли.

Координаты земного полюса характеризуют ту часть вариаций направления оси вращения Земли в пространстве, которая обусловлена главным образом вариациями распределения земных масс и их скоростей (океаны, атмосфера, движения в мантии, грунтовые воды и т.д.).

Они выделяются из полной вариации направления оси вращения Земли в пространстве с помощью ограничения на периоды (или соответствующие частоты) составляющих их гармоник: они имеют периоды менее 2 суток (частоты более 0,5 оборота за одни звездные сутки по абсолютной величине) в небесной системе координат. Поскольку движение полюса рассматривают в земной системе координат, то и периоды также выражают относительно этой системы координат. В ней коротким периодам, близким к суткам в небесной системе координат для части гармоник, соответствуют длинные периоды (например: 6,5 лет; 430 суток и 1 год, упомянутые ниже).

Визуально движение полюса представляет собою, то закручивающуюся, то раскручивающуюся спираль (см. нижеследующий рисунок), центр которой смещается вековым образом в направлении моря Баффина (оно лежит между северо-восточной частью Северной Америки и Гренландией).



Период закрутки-раскрутки спирали составляет около 6,5 лет относительно земной системы координат. Наибольшее удаление от центра спирали составляет приблизительно около 0,25'', что соответствует приблизительно 7,5 метрам на поверхности Земли. Сам же центр спирали удалился от его положения в 1903 году на приблизительно на 13 метров.

Частотный анализ выявляет две основных гармонических составляющих движения полюса относительно центра спирали «раскрутки-закрутки»: это гармоника с годовым периодом и гармоника с периодом около 430 суток (в земной системе координат), которая называется Чандлеровым движением полюса (*CW* от *Chandler wobble*, ЧДП).

Хотя амплитуды движения полюса невелики в сравнении с прецессией и нутацией, высокоточное их определение (также, как и *UT1-UTC*) является основной задачей службы определения параметров вращения Земли. Причина этого состоит в том, что в формирование этих неравномерностей значительный вклад вносят, так называемые, флюиды¹ – подвижные части Земли (атмосферные и океанические массы, грунтовые воды, ледяная фракция, осадки, течения в ядре и мантии Земли и т.д.). Их движение не поддается предвычислению (на требуемом уровне точности), в результате чего высокоточное определение этих *ПВЗ* нуждается в проведении непрерывных астрономо-геодезических измерений и их математической обработки.

Примечание. В этом материале *ПВЗ* описаны в свободном стиле, немного отвлекаясь от точных определений. Тем, кто желает ознакомиться с нормативными документами и точными определениями рекомендуется ознакомиться с дополнительными источниками.

При построении рисунков использовались опорные данные о *ПВЗ МСВЗ* (*IERS*) – серия *EOPc04.62-now* и серия *EOPc01.1900-now* для координат полюса ранее 1962 года, а также данные *ГСВЧ* (вторых частей бюллетеней «А» *ГСВЧ*). В тексте использованы фрагменты сообщения *ГМЦ ГСВЧ* от 15.07.2016, опубликованного на нашем сайте.

Список дополнительных источников

[1] ГОСТ 8.567–2014, Государственная система обеспечения единства измерений, «Измерения времени и частоты. Термины и определения», Москва, Стандартинформ, 2019.

[2] [Transformation between the International Terrestrial Reference System and the Geocentric Celestial Reference System. IERS Conventions 2010](#) (англ.).

[Переводной вариант на русском языке](#) доступен на нашем сайте в разделе «Теория».

1 – не следует путать с понятием флюидов, принятым в геологии, где под флюидами понимаются вещества в надкритическом состоянии, при котором исчезает различие между паром и жидкостью.