

УДК 551.2
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-30-42

Анализ влияния геодинимических факторов на релятивистское смещение частоты атомных стандартов

Е. Г. Гиенко^{1*}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: elenagienko@yandex.ru

Аннотация. Выполнен анализ влияния геодинимических факторов на релятивистское смещение частоты атомных стандартов. Представлены результаты расчетов смещений частоты, вызываемых различными геодинимическими явлениями, выполнена оценка значимости этих смещений для современных оптических стандартов частоты. По результатам оценки сделан вывод, что для релятивистского смещения частоты на уровне 10^{-18} самыми значимыми факторами являются приливы в твердой Земле и океанах, которые хорошо учитываются с помощью современных глобальных моделей приливов. Не-приливные явления в океанах, вызывающие изменение геопотенциала на уровне $0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (смещение частоты порядка $2 \cdot 10^{-18}$), не оказывают большого влияния на ход стационарных атомных стандартов, располагаемых на материках. Постледниковое поднятие имеет вековой характер и хорошо моделируется в настоящее время. Особое внимание рекомендуется уделить сложно моделируемым изменениям потенциала, вызываемым колебаниями уровня воды в водохранилищах (для станций, расположенных вблизи водохранилищ) и уровня грунтовых вод. Остальные рассмотренные геодинимические эффекты практически не влияют на ход оптических часов на уровне указанной точности.

Ключевые слова: релятивистское смещение частоты, геодинимические факторы, атомные стандарты частоты, гравитационный потенциал, приливы, гравиметрические измерения

Введение

Современные оптические стандарты частоты на холодных атомах имеют наивысшую относительную точность среди всех средств измерений. Так, еще в 2014 г. в [1] была представлена разработка прообраза атомных часов с уровнем нестабильности частоты 10^{-18} . В настоящее время в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени России включен оптический репер частоты на холодных атомах, имеющий нестабильность 10^{-17} [2].

Для обеспечения высокоточной синхронизации оптических атомных часов необходимо учитывать эффект релятивистского красного смещения тактовых частот $\Delta f/f$, вызванный изменением гравитационного потенциала ΔW [3], то есть

$$\Delta f/f = \Delta W/c^2, \quad (1)$$

где c – скорость света.

Согласно (1), релятивистскому смещению частоты порядка 10^{-18} соответствуют изменение потенциала силы тяжести около $0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$, и, следовательно, ускорение силы тяжести $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{с}^2$ (1,6 мкГал) и смещение по высоте 0,01 м.

С помощью современных гравиметров, имеющих погрешность 0,1 мкГал ($10^{-9} \text{ м}/\text{с}^2$), возможно отслеживать малейшие изменения силы тяжести в месте установки оптических атомных часов и отмечать изменение потенциала силы тяжести с точностью, достаточной для синхронизации современных оптических стандартов частоты.

Гравитационный потенциал $W(t)$ на момент времени t можно разделить на постоянную W_{t_0} и переменную от времени W_{t-t_0} компоненты:

$$W(t) = W_{t_0} + W_{t-t_0}. \quad (2)$$

Гравитационный потенциал изменяется в глобальном, региональном и локальном масштабах под влиянием геодинимических

факторов, имеющих приливную и неприливную природу [4]:

1) приливы в твердой Земле, океанические и атмосферные приливы, вызванные тяготением Луны, Солнца и планет;

2) полюсные приливы в океане и твердой Земле вследствие движения полюсов и неравномерности вращения Земли;

3) атмосферные приливы из-за суточного нагрева атмосферы;

4) неприливные эффекты, вызванные перераспределением масс в атмосфере, океанах, масс воды континентальных озер и водохранилищ, твердых осадков (снега);

5) изменения уровня моря;

6) процессы в твердой Земле, в том числе, вертикальные смещения станций.

Актуальной задачей является разделение влияния отдельных факторов, поскольку в большинстве случаев они коррелированы между собой.

В статье выполнен краткий обзор и анализ влияния геодинимических факторов на релятивистское смещение частоты атомных стандартов, представлены результаты расчетов, выполнена оценка значимости смещений частоты для современных оптических стандартов.

1. Приливные эффекты

Приливные эффекты, изменяющие гравитационный потенциал, вызываются несколькими причинами, в первую очередь, тяготением Луны и Солнца, далее – движением полюсов и неравномерностью вращения Земли

(полюсные приливы), и, наконец, нагревом атмосферы (атмосферные приливы).

Согласно [5], приливы в твердой Земле и океанические приливы вызывают релятивистское смещение тактовых частот на уровне 10^{-17} , остальные факторы – на уровне 10^{-18} и ниже.

В Соглашениях Международной службы вращения Земли и систем отсчета (МСВЗ) [6] приведена краткая теория, стандартные алгоритмы, постоянные, относящиеся к учету приливов в твердой Земле, океанических и полюсных приливов, а также преобразования между амплитудами приливных волн, опубликованных в разных соглашениях.

Приливы в твердой Земле. В настоящее время потенциал, генерирующий приливы, выражается в сферических гармониках и вычисляется с использованием каталога приливных потенциалов (таблицы амплитуд, фаз и частот для специфического набора приливных волн). Этот каталог состоит из зависящих от времени коэффициентов потенциала $C_i^{nm}(t)$, $S_i^{nm}(t)$ степени n порядка m для каждой приливной волны i , данных в единицах m^2/c^2 и зависящих от времени аргументов $\alpha_i(t)$.

Твердая Земля реагирует на приливные силы как упругое тело с деформацией. Согласно фундаментальной теории о приливной реакции упругой Земли, деформации и изменения потенциала, вызванные приливами Земли, вычисляются с применением чисел Лява, k_{nm} и h_{nm} .

Приливной потенциал в конкретной точке с геоцентрическими сферическими координатами (ϕ, λ, r) на деформируемой (эластичной) Земле вычисляется по формуле [5]:

$$V^{elastic}(t) = \sum_{n=2}^{n=\max} \sum_{m=0}^n (1 + k_{nm} - h_{nm}) \left(\frac{r}{a}\right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \times \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left\{ C_i^{nm}(t) \cos[\alpha_i(t)] + S_i^{nm}(t) \sin[\alpha_i(t)] \right\}, \quad (3)$$

где a – большая полуось Земли (эллипсоид GRS80); t – время от референцной эпохи J2000.0 в юлианских столетиях; $\bar{P}_{nm}(\sin \phi)$ – полностью нормированные присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m .

Положительный приливный потенциал вызывает подъем земной поверхности, что приводит к соответствующему изменению гравитационного потенциала с противоположным знаком для станции на (деформируемой) поверхности Земли. Для вычисления приливного потенциала в [6] рекомендован

к использованию каталог приливов HW95, содержащий 12 935 приливных волн [7].

В отношении бюджета ошибок вычисления временных серий приливного потенциала, каталог HW95 обеспечивает наибольшую точность с СКП лучшей, чем $0,01 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$ в единицах приливного ускорения, что соответствует средней квадратической погрешности $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^2$ для приливного потенциала [5].

Числа Лява вычисляются по геофизической модели Земли PREM (Preliminary Earth Reference Model) [8], неопределенность решения которой на уровне $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$ в единицах приливного потенциала, в основном, из-за выбора модели эластичности Земли.

Для вычисления приливного потенциала (3) для станций на деформируемой поверхности Земли используется программа PREDICT из пакета обработки приливов Земли ETERNA 3.4 [9], она рекомендована для вычисления приливных поправок в измерения силы тяжести в Инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России [10]. В настоящее время программное обеспечение ETERNA3.4 доступно на сайте Службы международной геодинимики и земных приливов (International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS)) для скачивания по ссылке http://igets.u-strasbg.fr/soft_and_tool.php.

По данным [5], приливы в твердой Земле являются самым главным фактором, с максимальной амплитудой $4,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для потенциала в глобальном масштабе, что соответствует релятивистскому смещению частоты $4 \cdot 10^{-17}$ и является значимой величиной для синхронизации оптических стандартов.

Океанические приливы. Эффективный потенциал ОТЛ (Ocean Tidal Loading) – это суммарный эффект прямого притяжения движущихся водных масс, упругой деформации земной коры из-за нагрузки воды и дополнительного изменения гравитационного потенциала, вызванного деформацией.

Как показано в [5], амплитуды потенциала приливной нагрузки океана могут составлять до $1,25 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Распределение континентов и рельеф океанского дна препятствуют равномерной реакции океана на приливные силы океана, поэтому сигнал приливной нагрузки,

как правило, не совпадает по фазе с приливами твердой Земли. Эффекты нагрузки выражены в суточных и полусуточных волнах, а также вблизи побережья, сильно уменьшаются в направлении внутренней части континента.

Расчет эффектов ОТЛ выполняется на основании фундаментальной теории, разработанной в [11], которая описывает реакцию упругой модели Земли на точечную нагрузку на ее поверхность. Увеличение водных масс океана (прилив) вызывает положительный гравитационный потенциал ОТЛ и оседание земной поверхности из-за нагрузки дополнительных масс.

В Соглашениях IERS 2010 рекомендована альтиметрическая модель океанских приливов FES2004 [12], включающая в себя волны с длительным периодом, суточные и полусуточные волны, а также четвертьсуточную волну. Соглашения IERS содержат список астрономических амплитуд $H(m)$ для основных волн FES2004 и для некоторых вторичных волн. Подсчитано, что основные волны модели FES2004 обычно составляют 80 % приливного эффекта.

Параметры приливной нагрузки для конкретной станции можно получить с помощью программы (онлайн-калькулятора), разработанной в космической обсерватории Онсала (Onsala Space Observatory, OSO), Швеция, <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>. Результатом расчетов являются фазы и амплитуды основных приливных волн, а также их погрешности.

Если взять неопределенность вычисления потенциала океанских приливных волн, равную 1 % (из-за выбора модели приливных волн, [5]) то величина ошибки составит $0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (смещение частоты 10^{-18}), что вполне достаточно для обеспечения синхронизации оптических атомных часов.

Движение полюсов, неравномерность вращения Земли. Положение вектора вращения Земли в ее теле задается координатами полюса (x_p, y_p) относительно принятого соглашениями среднего полюса вращения (x'_p, y'_p) и углом вращения (поправкой часов (TAI – UT1) или продолжительностью суток, LOD), называемыми параметрами вращения Земли [13].

Движение полюса почти полностью описывается двумя гармоническими вариациями положения мгновенного полюса вращения относительно среднего полюса вращения Земли. Это эллиптическое движение с годовым периодом и круговое движение с периодом 14 месяцев (Чандлеров период свободных колебаний) с амплитудами, изменяющимися во времени.

Движение полюса изменяет центробежный потенциал Z и вызывает полюсные приливы как в твердой Земле, так и в океане и атмосфере.

Полюсные приливы в твердой Земле. Эффективный приливной центробежный потенциал в твердой Земле в точке с геоцентрическими координатами (φ, λ, r) , вызванный движением полюса и ограниченный степенью 2 [5], есть

$$Z_P = -(1 + k_2 - h_2)\omega^2 r^2 \sin \varphi \cos \varphi \Delta\theta;$$

$$\Delta\theta(t) = (x_p - x'_p) \cos \lambda - (y_p - y'_p) \sin \lambda,$$

где ω – средняя угловая скорость вращения Земли.

Эффективный центробежный потенциал прилива LOD, обусловленный изменениями угловой скорости ω Земли [5], есть

$$Z_{LOD} = -(1 + k_2 - h_2)\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi \Delta\omega;$$

$$\Delta\omega(t) = \omega \frac{(TAI - UT1)}{86\,400}.$$

Координаты полюса и поправка часов $((TAI - UT1)$ или LOD), суточные значения, публикуются в Бюллетенях Государственной службы времени и частоты России, а также доступны на сайте IERS, например, в долгосрочной серии EOP (Earth Orientation Parameters) с высокой точностью 10^{-10} рад ($1,6 \cdot 10^{-4}$ м).

Для вычисления полюсных приливов используется соответствующее расширение программы PREDICT.

Как показано в [5], эффективный приливной потенциал в твердой Земле, вызванный движением полюса, изменяется для отдельных станций с годовым и Чандлеровским периодами на значения от 0,04 до 0,07 $\text{м}^2/\text{с}^2$. Макси-

мальные расхождения значений потенциала между станциями, удаленными по долготе на 180° , достигают величины 0,12 $\text{м}^2/\text{с}^2$, что соответствует релятивистскому смещению частоты на $1,3 \cdot 10^{-18}$ и является значимым для оптических стандартов на холодных атомах.

Эффективный приливной потенциал, вызванный неравномерностью вращения Земли (LOD), имеет максимальную амплитуду на экваторе 0,004 $\text{м}^2/\text{с}^2$, соответствующую частотному смещению $4 \cdot 10^{-20}$, что пренебрежимо мало.

Океанические полюсные приливы. В Соглашениях IERS [6] представлена самосоглашенная равновесная модель океанских полюсных приливов [14]. Эта модель учитывает континентальные границы, сохранение массы над океанами, нагрузку на дно океана. Кроме того, полюсные приливы в океане вызывают деформации в любой точке поверхности Земли. Вклады общего потенциала и дополнительного потенциала, обусловленные вертикальными перемещениями, имеют одинаковый знак и, следовательно, складываются для эффективного потенциала.

Как показано в [5], с координатами полюса с 2014 г., эффективный потенциал полюсного океанического прилива до степени и порядка 2 показывает максимальные амплитуды 0,01 $\text{м}^2/\text{с}^2$, происходящие на широтах $\pm 45^\circ$, что соответствует смещению частоты на порядок 10^{-19} и может не учитываться при синхронизации оптических стандартов.

Атмосферные приливы. Атмосфера подвергается приливным воздействиям из-за солнечного нагрева, вызывающего нагрузку атмосферного давления на поверхность Земли с суточным и полусуточным периодами.

Эффекты атмосферных приливов могут быть рассчитаны на основе модели приливов, например по [15], применяемой GFZ, или по [16], являющейся моделью по Соглашениям IERS. Обе модели получены из глобальных полей поверхностного давления Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Эффекты регулярно учитываются в продуктах сглаживания атмосферы и океана гравиметрических миссий GRACE и GRACE-FO.

Амплитуды суточной и полусуточной солнечной приливной волны находятся на уровне 0,0015 м и наиболее выражены в тропиках вокруг экватора [5]. В средних широтах вертикальные смещения снижаются до уровня около $5 \cdot 10^{-4}$ м, что приводит к изменениям потенциала с амплитудами около

$0,005 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ($5 \cdot 10^{-20}$), что совершенно незначительно для синхронизации оптических часов.

В табл. 1 представлена оценка влияния рассмотренных приливных эффектов на геопотенциал и релятивистское смещение частоты.

Таблица 1

Приливы, изменяющие эффективное значение геопотенциала

Геодинамический фактор	Величина изменения геопотенциала, соответствующее смещение частоты	Главные (доминирующие) временные периоды	Способ учета	Погрешность вычисления изменения геопотенциала
Приливы в твердой Земле	Максимальная амплитуда $4,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $4 \cdot 10^{-17}$	От четырех часов до нескольких лет, с преобладающим вкладом суточного и полусуточного периодов	Исходные данные: Каталог приливов HW95, геофизическая модель PREM. Программное обеспечение: PREDICT из пакета обработки приливов Земли ETERNA3.4	HW95 $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^2$ PREM $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$
Океанические приливы	Максимальная амплитуда $1,25 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $1,2 \cdot 10^{-17}$	Суточный, полусуточный, четвертьсуточный, длительный	Модели океанских приливов: FES2004, EOT11A ПО SPOTL онлайн-калькулятор Onsala Space Observatory	$0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Полюсные приливы в твердой Земле	От $0,04 \text{ м}^2/\text{с}^2$ до $0,07 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на отдельных станциях. От $4 \cdot 10^{-19}$ до $7 \cdot 10^{-19}$	Годовой и 433 сут (Чандлеров)	Параметры вращения Земли – ГСВЧ, IERS Расширение ПО PREDICT	Пренебрежимо мала
Приливы в твердой Земле из-за неравномерности вращения Земли	Максимальная амплитуда на экваторе $0,004 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $4 \cdot 10^{-20}$	Вековой (основное влияние) и годовой	Параметры вращения Земли – сайт IERS или ГСВЧ, Расширение ПО PREDICT	Пренебрежимо мала
Полюсные приливы в океане	Максимальные амплитуды $0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$, происходящие на широтах $\pm 45^\circ$ 10^{-19}	Годовой и 433 сут (Чандлеров)	Модель океанских полюсных приливов, Соглашения IERS	Пренебрежимо мала
Атмосферные полюсные приливы	$0,005 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $5 \cdot 10^{-20}$	Суточный и полусуточный	Исходные данные: глобальные поля поверхностного давления ECMWF, Модель приливов, Соглашения IERS	Пренебрежимо мала

2. Неприливные изменения потенциала в атмосфере и гидросфере

Неприливные изменения потенциала вызываются перераспределением масс в атмосфере, гидросфере, континентальных водо-

хранилищах. Для оценки гравитационного потенциала неприливно перераспределения масс в атмосфере, гидросфере, континентальных водохранилищах используются сферические гармонические коэффициенты геофизических моделей (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для оценки гравитационного потенциала неприливно перераспределения масс

Параметры	Модели	Представление	Ссылки на источник, комментарии
Вклад атмосферы и океанов	AOD1B ATM and OCN,	Сферические гармонические коэффициенты $nm_{\max}=100$ со временной выборкой 6 ч	Центр обработки данных (ISDC) GFZ (http://isdc.gfz-potsdam.de/), с задержкой в несколько дней Продукт миссии GRACE https://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/grace-documentation
Континентальные запасы воды	GRACE+ GRACE-FO	Сферические гармонические коэффициенты $nm_{\max}=90$, ежемесячные решения	Международный центр глобальных моделей Земли (ICGEM), http://icgem.gfz-potsdam.de/home
Глобальная гидрологическая модель	GLDAS (Глобальная ассимиляция земных данных)	Ежемесячные коэффициенты сферической гармоники GLDAS для степеней и порядков от 2 до 100	GGFC (IERS Глобальный Центр Геофизических флюидов; http://geophy.uni.lu/ggfc-hydrology.html) Сервис загрузки данных EOST (продукты GGFC) http://loading.u-strasbg.fr/

Сферические гармонические коэффициенты по результатам миссий GRACE и GRACE-FO хорошо подходят для оценки величины неприливно воздействий в атмосфере, океанах и континентальных хранилищах воды по всей Земле с пространственным разрешением 200 км ($n_{\max} = 100$). Максимальное влияние погрешностей модели атмосферы AOD1B на индуцированный гравитационный потенциал оценивается в $0,005 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Что касается моделей GLDAS, то их погрешность не превышает 0,001 м для вертикальных смещений, что соответствует потенциалу $0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Неприливные перераспределения масс в атмосфере. Неприливные перераспределения масс из-за изменений атмосферного давления вызывают изменения гравитационного потенциала, которые выражены в коротких временных масштабах (от часов до дней), но также происходят в сезонных масштабах. Сильные краткосрочные колебания связаны с циклонами от локальных до континентальных масштабов с амплитудами до $\pm 45 \text{ мм рт. ст.}$, в то время как сезонные колебания значительно меньше – с амплитудами до $\pm 7,5 \text{ мм рт. ст.}$ [5].

В настоящее время расчет атмосферных эффектов, не связанных с приливами, почти

исключительно основан на 3D-данных об атмосферном давлении, например, из ECMWF, <https://www.ecmwf.int/>.

Сотрудниками кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ были выполнены расчеты изменения глобального гравитационного поля Земли, обусловленного перераспределением воздушных масс [17]. По результатам вычислений построена картограмма изменений гравитационного поля Земли, обусловленных разностью атмосферного давления в июле и январе. Как показали расчеты, сезонное изменение ускорения силы тяжести, находится в пределах от $-4,4$ до $+4,4$ мкГал, что соответствует изменению потенциала $\pm 0,3$ м²/с². По данным [5], максимальные амплитуды на лабораторных площадках находятся на уровне $\pm 0,10$ м²/с². Эффективный потенциал меньше, поскольку общий потенциал и эффекты вертикальных перемещений в значительной степени компенсируются. Эффективный потенциал достигает амплитуд всего от $0,01$ до $0,05$ м²/с² (смещение частоты $5 \cdot 10^{-19}$), что не сказывается на современных оптических стандартах частоты.

Неприливные перераспределения масс в океанах. Неприливное перераспределение массы в океанах в основном вызвано колебаниями атмосферного давления и сильными ветрами. Эффективный гравитационный потенциал состоит из прямого притяжения водных масс и вертикального смещения поверхности Земли, а также дополнительного изменения потенциала, вызванного деформацией земной коры.

Приливная нагрузка на океан наиболее значительна вблизи побережья, где колебания давления на дне океана велики. Вертикальные смещения от неприливной океанской нагрузки обычно находятся на уровне $0,002$ – $0,003$ м сезонно, но могут достигать $0,02$ м в течение нескольких часов и дней, например, из-за штормовых приливов [18], что соответствует изменению потенциала на $0,2$ м²/с² и смещению частоты $2 \cdot 10^{-18}$.

Неприливные перераспределения водных масс. Изменения запасов континентальной воды имеют сезонный и долгосрочный характер, их обнаружение на основе геодезических

измерений требует предварительных поправок за атмосферные и океанические воздействия, вызванные приливами.

Для определения крупно- и среднemasштабных изменений гравитационного поля, обусловленных сезонными и долгосрочными изменениями запасов континентальной воды могут использоваться ежемесячные решения миссии GRACE-FO или глобальные гидрологические модели.

По данным, приведенным в [5], в центральной Европе типичные сезонные колебания отражают максимумы гравитационного потенциала и минимумы вертикального смещения в период с зимы по весну (влажный, снежный период), и наоборот с лета по осень (в основном сухой период). По данным [5], сезонный диапазон общего потенциала остается в пределах $0,05$ м²/с², что соответствует вертикальным смещениям на уровне $0,005$ м и незначимо для современной точности атомных стандартов частоты.

Помимо сезонных колебаний, изменения гидрологической нагрузки могут быть связаны с крупными осадками, например, с сильными дождями. Для оценки сезонных эффектов, вызванных изменениями континентальных запасов воды, используются ежемесячные коэффициенты сферических гармоник до степени/порядка 100 на основе GLDAS.

В лаборатории физической геодезии СГГА (СГУГиТ) были вычислены изменения гравитационного поля, обусловленные среднегодовым изменением уровня водных масс крупных водохранилищ и озер (для 76 водоемов), на основании разработанных теории, методики и технологии определения детальных, локальных, региональных и планетарных вариаций гравитационного поля и его характеристик [19]. По результатам гармонического анализа было определено, что вариации аномалий высот и аномалий силы тяжести планетарного характера охватывают значительные территории континентов Европы, Азии и Америки, на которых расположено подавляющее большинство крупных водохранилищ и озер мира. Планетарные вариации аномалий силы тяжести достигают $12,16$ мкГал, что значимо для изменения гравитационного потенциала и релятивистского смещения частот.

Локальные гидрологические гравитационные эффекты могут отслеживаться по измерениям абсолютными высокоточными гравиметрами. В Инструкции по построению высокоточной гравиметрической сети [10] предусматривается поправка в гравиметрические измерения за изменение глубины грунтовых вод

$$\Delta g_g = \Gamma(h - h_{cp}) \text{ мкГал},$$

где Γ – эмпирический коэффициент в мкГал/м, получаемый измерением ускорения силы тяжести при разных уровнях грунтовых вод на пункте. Ориентировочно его значение в зависимости от грунтов лежит в пределах 8 – 17 мкГал/м;

h и h_{cp} – соответственно текущее и среднее многолетнее значение глубины уровня грунтовых вод от поверхности Земли.

Информацию об уровне грунтовых вод получают в специализированных службах для скважин, близко расположенных к пункту наблюдения. Если взять подъем грунтовых вод на 2 м (во время паводка) и максимальное значение эмпирического коэффициента 17 мкГал/м, то поправка в измеренную силу тяжести будет равна 34 мкГал. В [20] выполнена оценка влияния изменений уровня воды в скважинах на результаты гравиметрических измерений, подтверждающая предварительные расчеты. Можно сделать вывод, что изменение уровня грунтовых вод оказывает значимое влияние как на результаты высокоточных гравиметрических измерений, так и на релятивистское смещение частоты атомных стандартов.

Снежный покров. Перераспределение масс, обусловленное поочередным накоплением снега в северном и южном полушариях, вызывает сезонные изменения силы тяжести. В работе [21] рассмотрено влияние снежного покрова на сезонные изменения гравитационного поля Земли. Для количественных оценок этих изменений выполнено решение прямой гравиметрической задачи с применением методов численного интегрирования. По результатам вычислений построена картосхема сезонных изменений гравитационного поля Земли и показано, что наибольшие изменения

силы тяжести относятся к полярным областям, с максимальным значением 0,84 мкГал. На территориях с установленными оптическими часами влияние изменения снежного покрова пренебрежимо мало.

Изменения уровня мирового океана. Изменения уровня мирового океана имеют значение для определения нулевого уровня или опорной высотной поверхности (с потенциалом силы тяжести W_0 [6].

Среднегодовое повышение и понижение уровня моря на несколько миллиметров в год ($0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$) определяются на приливных станциях. Глобальные максимальные значения повышения уровня моря достигают уровня до 0,01 м в год ($0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$) в Тихом океане, например, в Филиппинском море [5].

Однако во многих случаях постоянные ГНСС-измерения не могут обеспечить статистически значимые результаты из-за существующей вертикальной точности ГНСС, которая должна быть улучшена за счет увеличения продолжительности измерений в будущем.

Процессы в твердой Земле, в том числе, вертикальные смещения. Вертикальные смещения пунктов могут наблюдаться с помощью измерений ГНСС в постоянно действующих региональных или локальных сетях. ГНСС-измерения не чувствительны к перераспределению массы, и соответствующий эффект гравитационного поля должен определяться отдельно. Однако последний эффект обычно остается ниже 10 % от изменения высоты, и им часто можно пренебречь [5].

В обзоре [22] опубликованы основные результаты современных геодинимических исследований в России, в том числе, приведены данные о вертикальных смещениях станций ГНСС в геодинимически активных регионах.

Одним из основных факторов, вызывающих вертикальные смещения станций, является постледниковое поднятие. Его влияние хорошо выражено в полярных регионах, но может также в определенной степени влиять на регионы средних широт. Поправки для учета вертикальных смещений могут быть рассчитаны по глобальным моделям постледникового поднятия (Glacial Isostatic Adjustment, GIA), например ICE-6G (<http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~peltier/data.php>).

Общая тенденция постледникового поднятия для гравитационного потенциала увеличивается до $0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$ в год в Канаде и примерно вдвое меньше этого значения в Фенноскандии. Однако максимальная скорость подъема суши гораздо более выражена до $0,017 \text{ м}$ в год и $0,008 \text{ м}$ в год в Канаде и Фенноскандии, соответственно. Следовательно, показатели эффективного потенциала, обусловленного постледниковым поднятием, составляют $-0,15 \text{ м}^2/\text{с}^2$ в год в Канаде и половина этого значения в Фенноскандии [5].

Вертикальные смещения из-за кратковременных сопутствующих сейсмических воздействий могут достигать уровня в несколько метров вблизи эпицентра крупных землетрясений и несколько сантиметров на расстояниях $100\text{--}1\ 000 \text{ км}$ (в зависимости от магнитуды

землетрясений). На них накладываются долгосрочные постсейсмические эффекты с гораздо меньшими амплитудами. Вулканическая активность более выражена в местных масштабах, в вулканически активных регионах.

Антропогенные вертикальные движения земной коры, как правило, носят более локальный характер и связаны, в частности, с месторождениями природного газа, нефти и геотермальных источников, забором подземных вод, добычей полезных ископаемых и изменением нагрузки в водохранилищах. Однако, в целом, эти эффекты незначительны в отношении уровня точности 10^{-18} [5].

Величины влияния рассмотренных неприливных геодинамических факторов на эффективное значение потенциала и релятивистское смещение частоты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Неприливные геодинамические факторы, изменяющие эффективное значение геопотенциала

Геодинамический фактор	Величина изменения геопотенциала, соответствующее смещение частоты	Главные (доминирующие) временные периоды	Способ учета	Погрешность вычисления изменения геопотенциала
Нагрев и охлаждение атмосферы	Эффективный потенциал достигает амплитуд от $0,01$ до $0,05 \text{ м}^2/\text{с}^2$ в лабораториях $5 \cdot 10^{-19}$	Часы, сутки, годовой период	GRACE Модель AOD1B ATM, ПО кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ	$5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$
Неприливные явления в океанах	$0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $2 \cdot 10^{-18}$	Часы и сутки	GRACE Модель AOD1B OCN, глобальная гидрологическая модель GLDAS	$5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$ $0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$
Водоохранилища	Планетарные вариации $0,8 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $8 \cdot 10^{-18}$ Эффективный потенциал $0,05 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $5 \cdot 10^{-19}$	Сезонный	GRACE-FO, глобальные гидрологические модели, ПО кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ	Не оценивалась
Изменение уровня грунтовых вод	32 мкГал , $2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ $2 \cdot 10^{-17}$	Сезонный	GRACE-FO, глобальные гидрологические модели, гравиметрия, измерения уровня грунтовых вод	Не оценивалась

Геодинамический фактор	Величина изменения геопотенциала, соответствующее смещение частоты	Главные (доминирующие) временные периоды	Способ учета	Погрешность вычисления изменения геопотенциала
Изменения уровня моря	Среднегодовое – несколько мм в год ($0,01 \text{ м}^2/\text{с}^2$) $1 \cdot 10^{-19}$	Вековой	Измерения на приливных станциях, ГНСС-измерения	Пренебрежимо мала
Постледниковое поднятие	$0,15 \text{ м}^2/\text{с}^2$ в год в Канаде ($1,5 \cdot 10^{-18}$) и $0,08 \text{ м}^2/\text{с}^2$ в Фенноскандии ($8 \cdot 10^{-19}$)	Вековой	Глобальные модели постледникового поднятия Glacial Isostatic Adjustment, GIA	Не оценивалась
Твердые осадки (снег)	Максимальное значение $0,05 \text{ м}^2/\text{с}^2$ у полюсов $5 \cdot 10^{-19}$	Сезонный	ПО кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ	Пренебрежимо мала

Заключение

По результатам представленных в табл. 1 и 3 оценок влияния геодинамических факторов на релятивистское смещение частоты атомных стандартов, можно сделать вывод, что для оптических часов с нестабильностью 10^{-17} – 10^{-18} самыми значимыми факторами являются приливы в твердой Земле и океанах. Эти явления хорошо учитываются с помощью глобальных моделей приливов. Особое внимание следует уделить сложно моделируемым изменениям потенциала, вызываемым колебаниями уровня воды в водохранилищах

(для станций, расположенных вблизи водохранилищ) и уровня грунтовых вод, (изменение частоты до $8 \cdot 10^{-18}$). Неприливные явления в океанах, вызывающие изменение геопотенциала на уровне $0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (смещение частоты порядка $2 \cdot 10^{-18}$), не оказывают большого влияния на ход стационарных атомных стандартов, располагаемых на материках. Постледниковое поднятие имеет вековой характер и хорошо моделируется в настоящее время. Остальные рассмотренные геодинамические эффекты приводят к изменению геопотенциала, соответствующего смещению частоты порядка 10^{-19} и менее.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант». Рег. № 121111600209-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level [Electronic resource] // Nature. – 2014. – Vol. 506, No. 7486. – P. 71–75. – Mode of access: <https://doi.org/10.1038/nature12941>.
2. Грибов А. Ю., Бердасов О. И., Белотелов Г. С. и др. Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция [Электронный ресурс] // Измерительная техника. – 2020. – № 12. – С. 22–27. – Режим доступа: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-12-22-27>.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с.
4. Мазуров Б. Т., Дорогова И. Е. Геодинамика и геодезические методы ее изучения : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 175 с.
5. Voigt C., Denker H., Timmen L. Time-variable gravity potential components for optical clock comparisons and the definition of international time scales // Metrologia. – 2016. – Vol. 53, No. 6. – P. 1365–1383. – DOI 10.1088/0026-1394/53/6/1365.

6. Petit G., Luzum B. IERS Conventions. – Frankfurt am Main: IERS Conventions Centre, 2010. – 179 p.
7. Hartmann T., Wenzel H.-G. The HW95 tidal potential catalogue // Geophysical Research Letters. – 1995. – Vol. 22. – P. 3553–3556. – DOI 10.1029/95GL03324.
8. Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1981. – Vol. 25, No. 4. – P. 297–356. – DOI 10.1016/0031-9201(81)90046-7.
9. Wenzel H. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.eas.slu.edu/GGP/ETERNA34/MANUAL/ETERNA33.HTM>.
10. ГКИНП ГНТА-04-122-03. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 110 с.
11. Farrell W. Deformation of the Earth by surface load // Reviews of Geophysics. – 1972. – Vol. 10, No. 3. – P. 761–779. – DOI 10.1029/RG010i003p00761.
12. Lyard F., Lefevre F., Letellier T. et al. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004 // Ocean Dynamics. – 2006. – Vol. 56, No. 5–6. – P. 394–415. – DOI 10.1007/s10236-006-0086-x.
13. Гиенко Е. Г. Астрометрия и геодезическая астрономия : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 168 с.
14. Desai S. D. Observing the pole tide with satellite altimetry // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2002. – Vol. 107, No. C11. – P. 7-1-7–13. – DOI 10.1029/2001JC001224.
15. Biancale R., Bode A. Mean annual and seasonal atmospheric tide models based on 3-hourly and 6-hourly ECMWF surface pressure data // Geo Forschungs Zentrum Potsdam. Scientific Technical Report STR06/01. – 2006. – 37 p. – DOI 10.2312/GFZ.b103-06011.
16. Ray R. D., Ponte R.M. Barometric tides from ECMWF operational analyses // Annales Geophysicae. – 2003. – Vol. 21, No. 8. – P. 1897–1910. – DOI 10.5194/angeo-21-1897-2003.
17. Ganagina I. G., Kanushin V. F., Goldobin D. N. et al. The impact of the nonuniform distribution of atmospheric pressure to changes in the Earth's global gravity field // 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2019. – P. 1914–1917. – DOI 10.1117/12.2540688
18. Dam T. van, Collilieux X., Wuite J. et al. Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series // Journal of Geodesy. – 2012. – Vol. 86, No. 11. – P. 1043–1057. – DOI 10.1007/s00190-012-0564-5.
19. Бузук В. В., Ганагина И. Г., Тришин С. М. Вариации гравитационного потенциала и его характеристик в районах крупных водоемов, обусловленные среднегодовым изменением их уровней // Вестник СГГА. – 1999. – № 4. – С. 31–39.
20. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В. и др. Вариации объемной деформации и уровня воды в скважинах, их влияния на результаты гравиметрических измерений // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 40–51. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-40-51.
21. Ganagina I. G., Kanushin V. F., Goldobin D. N. et al. Seasonal changes of Earth's gravitational field due to solid precipitation // 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2019. – P. 1847–1850. – DOI 10.1117/12.2540317.
22. Gerasimenko M., Gorshkov V., Kaftan V. et al. Geodynamics // National report for the International Association of Geodesy of the International Union of Geodesy and Geophysics 2015–2018. Technical Report July 2019. – P. 36–70. – DOI 10.2205/2019IUGG-RU-IAG.

Об авторах

Елена Геннадьевна Гиенко – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Получено 23.09.2022

© Е. Г. Гиенко, 2022

Analysis of the geodynamic factors impact on the relativistic frequency shift of atomic standards

E. G. Gienko^{1*}

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: elenagienko@yandex.ru

Abstract. The impact of geodynamic factors on the relativistic frequency shift of atomic standards is analyzed. The results of frequency shift calculations caused by various geodynamic phenomena are presented, and the significance of these shifts for modern optical frequency standards is estimated. Based on the results of the assessment, it was concluded that for the relativistic frequency shift at the level of 10^{-18} , the most significant factors are tides in the solid Earth and oceans, which are well taken into account using modern global tidal models. Non-tidal phenomena in the oceans, which cause a change in the geopotential at the level of $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (frequency shift of the order of $2 \cdot 10^{-18}$), do not have much effect on the course of stationary atomic standards located on the continents. The postglacial uplift has a secular character and is well modeled at the present time. It is recommended to pay special attention to the complexly modeled potential changes caused by fluctuations in the water level in reservoirs (for stations located near reservoirs) and the groundwater level. The rest of the considered geodynamic effects have practically no effect on the course of the optical clock.

Keywords: relativistic frequency shift, geodynamic factors, atomic frequency standards, gravitational potential, tides, gravimetric measurements

REFERENCES

1. Bloom, B. J., Nicholson, T. L., Williams, J. R., & at al. (2014). An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level. *Nature*, 506(7486), 71–75. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nature12941>.
2. Gribov, A. Yu., Berdasov, O. I., Belotelov, G. S., & at al. (2020). *The optical frequency standard based on strontium cold atoms. Izmeritel'naya tekhnika [Measurement Techniques]*, 12, 22–27 [in Russian]. Retrieved from <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-12-22-27>.
3. Landau, L. D., & Lifshic, E. M. (1988) *Teoreticheskaya fizika. Teoriya polya [Theoretical physics. Field theory]*. Moscow: Nauka Publ., 512 p. [in Russian].
4. Mazurov, B. T., & Dorogova, I. E. (2014) *Geodinamika i geodezicheskie metody ee izucheniya [Geodynamics and geodesic methods of its study]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 175 p. [in Russian].
5. Voigt, C., Denker, H., & Timmen, L. (2016). Time-variable gravity potential components for optical clock comparisons and the definition of international time scales. *Metrologia*, 53(6), 1365–1383. doi: 10.1088/0026-1394/53/6/1365.
6. Petit, G., & Luzum, B. (2010). *IERS Conventions*. Frankfurt am Main: IERS Conventions Centre, 179 p.
7. Hartmann, T., & Wenzel, H.-G. (1995). The HW95 tidal potential catalogue. *Geophysical Research Letters*, 22, 3553–3556. doi: 10.1029/95GL03324.
8. Dziewonski, A. M., & Anderson, D. L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297–356. doi: 10.1016/0031-9201(81)90046-7.
9. Wenzel, H. (n. d.). The nanogal software : Earth tide data processing package ETERNA 3.30. retrieved from <https://www.eas.slu.edu/ggp/eterna34/manual/eterna33.htm>.
10. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (2004). GKNP GNTA-04-122-03. Instructions for the development of the high-precision state gravimetric network of Russia. Moscow: CNIIGAiK Publ., 110 p. [in Russian].
11. Farrell, W. (1972). Deformation of the Earth by surface load. *Reviews of Geophysics*, 10(3), 761–779. doi: 10.1029/RG010i003p00761.
12. Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & at al. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5–6), 394–415. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x.
13. Gienko, E. G. (2011) *Astrometriya i geodezicheskaya astronomiya [Astrometry and geodetic astronomy]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 168 p. [in Russian].
14. Desai, S. D. (2002). Observing the pole tide with satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C11), 7-1-7–13. doi: 10.1029/2001JC001224.

15. Biancale, R., & Bode, A. (2006). Mean annual and seasonal atmospheric tide models based on 3-hourly and 6-hourly ECMWF surface pressure data. *Geo Forschungs Zentrum Potsdam. Scientific Technical Report STR06/01*, 37 p. doi: 10.2312/GFZ.b103-06011.
16. Ray, R. D., & Ponte, R. M. (2003). Barometric tides from ECMWF operational analyses. *Annales Geophysicae*, 21(8), 1897–1910. doi: 10.5194/angeo-21-1897-2003.
17. Ganagina, I. G., Kanushin, V. F., Goldobin, D. N., & at al. (2019). The impact of the nonuniform distribution of atmospheric pressure to changes in the Earth's global gravity field. *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, SPIE* (pp. 1914–1917). doi: 10.1117/12.2540688.
18. Dam, T. van, Collilieux, X., Wuite, J., & at al. (2012) Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series. *Journal of Geodesy*, 86(11), 1043–1057. doi: 10.1007/s00190-012-0564-5.
19. Buzuk, V. V., Ganagina, I. G., & Trishin, S. M. (1999). Variations of the gravitational potential and its characteristics in areas of large reservoirs due to the average annual change in their levels. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 4, 31–39 [in Russian].
20. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., & at al. (2021). Volume deformation variations and well-aquifer response, its connection with gravity measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(5), 40–51. doi: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-40-51 [in Russian].
21. Ganagina, I. G., Kanushin, V. F., Goldobin, D. N., & at al. (2019). Seasonal changes of Earth's gravitational field due to solid precipitation. *25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, SPIE* (pp. 1847–1850). doi: 10.1117/12.2540317.
22. Gerasimenko, M., Gorshkov, V., Kaftan, V., & at al. (2019). Geodynamics. National report for the International Association of Geodesy of the International Union of Geodesy and Geophysics 2015–2018. Technical Report, July 2019 (pp. 36–70). doi: 10.2205/2019IUGG-RU-IAG.

Author details

Elena G. Gienko – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Received 23.09.2022

© *E. G. Gienko*, 2022