



УДК 528.024.1/.6

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-169-178

Использование пунктов сети РСДБ для целей повышения точности хронометрического нивелирования

В. М. Тиссен¹, Г. В. Симонова²✉

¹ Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: simgal@list.ru

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены возможности нового перспективного метода создания глобальной системы ортометрических высот, основанного на использовании эффектов общей теории относительности. Выделены направления развития и совершенствования основных технических средств, без которых невозможно достижение требуемых метрологических характеристик результатов хронометрического нивелирования, цель которого заключается в определении высот точек рельефа над поверхностью геоида. Приведены необходимые теоретические сведения, поясняющие идею метода и методику проведения измерений с включением пунктов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) в высотную геодезическую сеть в качестве опорных футштоков. Выполнен подробный анализ источников погрешностей, возникающих в результатах хронометрических измерений от различных природных факторов. В частности, даны оценки величин релятивистских эффектов, вызванных дополнительными потенциалами в пунктах размещения квантовых часов на разных ортометрических высотах, а также обусловленных лунно-солнечными приливами, неравномерностями вращения Земли и движением ее полюсов. Показано, что при доведении характеристик относительной нестабильности квантовых генераторов частоты до уровня 10^{-19} и обеспечении соответствующей точности синхронизации удаленных квантовых часов результаты измерения значения силы тяжести методами хронометрического нивелирования будут выше по точности результатов, получаемых лучшими высокоточными средствами классических гравиметрических измерений. Приведены результаты эксперимента по измерению разности ортометрических высот с помощью водородного стандарта частоты ВГ 1-75А в ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ», показавшие полное соответствие полученных результатов расчетным характеристикам.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия, отсчетная система, ортометрическая высота, гравитационный потенциал, геоид, хронометрическое нивелирование, стандарты частоты, релятивистские эффекты, нестабильности квантовых часов, шкала времени

Введение

Одной из главных проблем современной геодезии является создание единой общемировой системы отсчета высот. В силу того, что в разных странах приняты разные отсчетные системы, начало отсчета в которых не

совпадает со средним уровнем Мирового океана, а направление отсчетной шкалы также различно, возникает проблема их согласования между собой. Общепринятое положение считать за начало отсчета высот уровень Мирового океана на современном уровне точности угловых и линейных измерений оказыва-

ется недостаточно корректным, так как его поверхность в различных частях Мирового океана отличается по высоте от нескольких сантиметров до 2 м [1]. В настоящее время принята концепция перехода от национальных систем к созданию общеземной главной высотной основы (ГВО), базирующейся на совместной обработке данных ГНСС и гравиметрических определений силы тяжести, независимо от уровня Мирового океана [2].

В последние годы обсуждается новый метод определений высот, основанный на релятивистском эффекте общей теории относительности (ОТО). Этот метод позволяет построить систему ортометрических высот путем измерения величины смещения шкал времени предварительно синхронизированных между собой высокостабильных стандартов частоты и времени, находящихся в разных гравитационных полях. В качестве опорной высотной системы квантовых футштоков рассматриваются пункты, совмещенные со службами времени, контрольно-измерительными станциями ГНСС и пунктами радио-интерферометрии со сверхдлинными базами. Метод РСДБ, опирающийся на неподвижные внегалактические объекты, позволяет получать данные наивысшей точности о параметрах вращения Земли, отслеживать перемещения литосферных плит и данные о многих других геофизических и геодинамических процессах [3]. В общей сложности мировая сеть пунктов РСДБ (IVS) насчитывает более 40 радиотелескопов, расположенных на различных континентах земного шара [3].

В России с 2011 г. действует трехэлементный комплекс «Квазар-КВО» с 32-метровыми антеннами: «Зеленчук» – «Бадары» – «Светлое». В 2015 г. в пунктах «Бадары» и «Зеленчукская» дополнительно были введены в эксплуатацию два радиотелескопа нового поколения РТ-13 с быстropоворотными 13-метровыми антеннами [4].

Поскольку пункты РСДБ оснащены высокостабильными квантовыми часами и расстояние между ними измерено с сантиметровыми точностями, то их использование в качестве опорной системы квантовых футштоков является актуальным и перспективным. С появлением в последнее десятилетие опти-

ческих линий связи существенно возросли возможности в повышении точности синхронизации разнесенных часов. Так, по данным [5] разность временных задержек распространения двух лазерных импульсов в экспериментальной катушке оптического волокна длиной 47,5 км составила 0,3 нс со стабильностью по нескольким измерениям, не превышающей 0,02 нс, что на два порядка выше возможностей других методов. Следует ожидать, что повышение точности синхронизации шкал удаленных часов до уровня 10^{-19} наряду с созданием стандартов частоты и времени аналогичной точности решит проблему прикладного использования нового метода хронометрического нивелирования в задачах релятивистской геодезии.

Методы и материалы

Для повышения точности результатов хронометрического нивелирования необходимо проводить сравнения расхождения шкал времени (ШВ), находящихся в разных гравитационных полях на длительных временных интервалах. Такие возможности в полной мере предоставляет метод РСДБ, при этом, по данным [6], временные разрывы между сличениями, внешние условия и расстояние между пунктами РСДБ незначительно влияют на точность и оперативность частотно-временных сравнений.

Групповая задержка времени распространения радиоволн τ_g между двумя пунктами РСДБ связана с вектором базы \vec{b} и направлением на радиисточник \vec{s} [3] выражением

$$\tau_g = \frac{1}{c} \vec{b} \cdot \vec{s} + \sum \Delta\tau_i, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_i$ – поправки за влияние среды и релятивистские эффекты.

Из-за вращения Земли взаимная ориентация векторов базы и направления на радиисточник все время изменяется. Для перехода от векторного выражения (1) в скалярную (координатную) форму необходимо иметь минимум три пространственно разнесенных радиотелескопа.

Стандарты частоты и времени (СЧВ), находящиеся на базовых станциях РСДБ во вращающейся земной международной координатной системе ITRS, движутся относительно небесной системы координат ICRS с линейными скоростями, зависящими от их геоцентрической широты. Текущее положение часов на двух пунктах РСДБ в системе координат ICRS определяется радиус-векторами R_1 и R_2 и векторами их скоростей V_1 и V_2 . Оценки релятивистского расхождения временных шкал $\Delta\tau$ и частот задающих генераторов Δf_p базовых часов на пунктах 1 и 2 в системе ITRS по аналогии, приведенной в [7] для системы «Земля – спутник», запишем в виде

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\frac{Q_2}{Q_1} - 1 \right) dt; \quad \frac{\Delta f_p}{f_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{Q_2}{Q_1} - 1, \quad (2)$$

где τ_1, τ_2 – моменты начала и окончания интервала интегрирования по шкале τ ; Q_2, Q_1 – коэффициенты преобразования шкал базовых часов на двух пунктах РСДБ к шкале координированного времени UTC = t , которые согласно [7] примут вид

$$Q_1 = 1 - \frac{\varphi_1}{c^2} - \frac{V_1^2}{c^2}, \quad Q_2 = 1 - \frac{\varphi_2}{c^2} - \frac{V_2^2}{c^2}, \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы в точках размещения базовых часов.

Потенциалы φ_1 и φ_2 в формуле (3) определяются неоднородностью гравитационного поля Земли и воздействием гравитационных полей от Луны и Солнца. Линейные скорости V_1 и V_2 учитывают неравномерности вращения Земли в небесной системе ICRS.

Дополнительный гравитационный потенциал, вносящий наибольший вклад в релятивистское смещение частоты, возникает вследствие отличия реальной физической поверхности Земли от поверхности геоида. Его величина пропорциональна ортометрической высоте в пункте установке наземных часов.

Теоретические оценки величины релятивистских эффектов, приведенные в работе [8], от нутации земной оси составляют порядка 16,4 пс, а движение полюсов – 8 пс в вариации шкалы времени наземных часов, что соответствует относительному смещению частоты генератора порядка 10^{-20} . Такое смещение частоты находится за пределами разрешающей способности существующих средств частотных измерений.

Релятивистское смещение частоты квантовых часов от лунно-солнечных приливов связано с упругими свойствами Земли, значение которых на ее поверхности оценивается с помощью чисел Лява [9] по формуле

$$q = 1 + k - h, \quad (4)$$

где $h = 0,5$; $k = 0,2$ – числа Лява.

В соответствии с (4) получим ослабление в $q \approx 0,7$ раза. Исследования, выполненные в работе [8], показали, что диапазон смещения частоты от лунно-солнечных приливов находится в интервале $(1,4 - 4,0) \cdot 10^{-17}$ и содержит составляющие с периодами полгода, полмесяца, сутки и 12 часов. При этом соответствующий набег релятивистского приливного смещения шкалы времени от Солнца на интервале около 40 суток (примерно четверть периода) превышает 40 пс, а для Луны на интервале в трое суток достигает 10 пс. Приведенные величины вариаций релятивистского смещения частоты от дополнительного потенциала незначительны и находятся за пределами разрешающей способности эталонных часов на пунктах ГСВЧ и РСДБ. Однако с переходом на новые стандарты частоты с относительной нестабильностью порядка 10^{-16} – 10^{-17} перечисленные эффекты необходимо будет учитывать.

Высокие требования к стабильности стандартов частоты и времени, а также к точности синхронизации шкал часов, обусловлены принципом измерений метода РСДБ, заключающимся в как можно более точном измерении групповой задержки сигнала с учетом

влияющих на результаты измерений факторов. В случае известных параметров вращения Земли (ПВЗ) задача синхронизации становится более определенной, так как уменьшается число неизвестных в уравнении (1). В настоящее время погрешность срочных данных ПВЗ, выставляемых на сайтах Международной службы вращения Земли (МСВЗ-IERS) после 19-00 часов Гринвичского времени, составляет порядка 20 мкс для всемирного времени и 0,01 дуги для координат полюса [10]. Соответственно, за время Δt перемещение Δl наземного пункта относительно инерциального пространства (ИП) составит

$$\Delta l \approx \frac{2\pi R}{T} \cos \varepsilon \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где R , T – радиус Земли и длительность суток соответственно.

Поскольку за время 20 мкс любой наземный пункт в зависимости от широты переместится на расстояние от 0 до 1 см, то это вызовет погрешность в измерении групповой задержки, а значит, и в синхронизации шкал часов на пунктах РСДБ порядка от 0,1 до 0,3 нс. Следует учитывать, что обсерватории МСВЗ выкладывают данные о ПВЗ с задержкой на одни сутки. Поэтому возникает потребность в предвычисленных значениях ПВЗ, погрешность которых на одни сутки в настоящее время больше погрешности срочных данных примерно в 3 раза. В частности, для всемирного времени, согласно результатам 5-летнего международного проекта ЕОРСРРР [11], она составляет 60–70 мкс. При такой величине неопределенности в положении точки на поверхности Земли в инерциальной системе ICRS составит порядка 2–3 см для средних широт, что равносильно погрешности синхронизации порядка 0,6–0,9 нс. Современные требования к погрешности измерений разности потенциалов ΔC_m находятся на уровне $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2$ [12].

Приведем выражения (2) и (3) к относительному виду, запишем формулы релятивистского смещения времени $\Delta \tau_{\text{гр}}$ и частоты $\Delta f_{\text{гр}}$ для случая с неподвижными наземными часами:

$$\frac{\Delta \tau_{\text{гр}}}{\tau} = \frac{\Delta f_{\text{гр}}}{f} = \frac{g_m \cdot \Delta H_{\text{ORT}}}{c^2}, \quad (6)$$

где g_m – ускорение силы тяжести в пункте размещения часов; ΔH_{ORT} – ортометрическая высота.

Из выражения (6) найдем величину относительной нестабильности частоты и времени, при которой часы будут чувствительны к перемещениям по высоте на 1 мм. Принимая погрешность измерения современными баллистическими гравиметрами разности потенциалов на уровне $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2$, получим ΔH_{ORT} примерно 1 мм. Подставляя это значение в формулу (6), получим относительные смещения частоты и времени, составляющие порядка 10^{-19} . Нестабильность СЧВ на пунктах РСДБ составляет от $1 \cdot 10^{-15}$ до $2 \cdot 10^{-15}$. В этом случае неопределенность в измерении высоты составит порядка 10 м, что на четыре порядка уступает точности измерения потенциала баллистическими гравиметрами. Так, например, релятивистское смещение частоты СЧВ между обсерваториями «Зеленчук» (2 070 м) и «Светлое» (37 м) по формуле (6) составит $2,2 \cdot 10^{-13}$. В данном случае релятивистское смещение будет на два порядка больше нестабильности частоты СЧВ и поэтому может быть уверенно измерено и оценено с погрешностью $\frac{\Delta f_{\text{гр}}}{f} \approx 1 \cdot 10^{-15}$, что приводит к неопределенности в измерении разности высот $\Delta H_{\text{ORT}} = 10 \text{ м}$.

Методология измерения превышений между закрепленными реперами на пунктах РСДБ состоит в измерении релятивистского смещения частоты квантовых часов при их перемещении от одного пункта РСДБ к другому. Мобильные часы предварительно синхронизируются с часами РСДБ на высоте пункта A , а затем перемещаются в пункт B другого РСДБ, часы которого синхронизированы с часами в пункте A по сигналам ГНСС. Поскольку пункты A и B находятся на разных высотах, то в перемещенных часах появится релятивистский сдвиг частоты, что приведет к уходу их шкалы относительно шкалы часов в пункте B . Накопленная за время τ величина

гравитационной разности шкал $\Delta\tau_{гр}$ будет пропорциональна разности ортометрических высот ΔH_{ORT} между пунктами A и B , величину которой можно найти из формулы (6), выразив ее в явном виде.

Приведенное выражение справедливо при отсутствии других факторов, влияющих на ход шкалы времени мобильных часов. В реальных условиях, кроме гравитационной составляющей, на результаты измерений будут влиять различные факторы релятивистской и физико-технической природы, главными из

которых являются колебания температуры и собственные дрейфы шкал часов:

$$\Delta H_{ORT} = \frac{\Delta\tau_{гр}}{\tau} \cdot \frac{c^2}{g_m}. \quad (7)$$

Учет этих факторов является важным условием для отработки метода хронометрического нивелирования. В общем случае выражение, связывающее измеренное значение разности шкал с влиянием других факторов, и для часов, находящихся на разных высотах, имеет вид

$$\tau_{изм} = \sum \tau_{\Delta f} + \sum \tau_t + \sum \tau_{гр} + \sum \tau_{\Omega} + \sum \tau_s + \sum \tau_v, \quad (8)$$

где $\sum \tau_{\Delta f}$ – накопленная разность шкалы мобильных часов (МСЧВ) относительно шкалы стационарных часов СЧВ из-за расхождения их частот; $\sum \tau_t$ – уход шкалы МСЧВ из-за нестабильности температуры за время их перемещения из пункта A в пункт B ; $\sum \tau_{гр}$ – уход шкалы МСЧВ, обусловленный гравитационным эффектом; $\sum \tau_{\Omega}$ – влияние центробежных сил; $\sum \tau_s + \sum \tau_v$ – влияние релятивистских эффектов, зависящих от пути и скорости перемещения МСЧВ.

Оценка величин, входящих в формулу (8), производится по моделям, приведенным в работе [8]. Согласно этим оценкам, наибольшую

погрешность в определение $\Delta\tau_{гр}$ вносят изменение температуры и собственные дрейфы шкал мобильных и стационарных часов. Влияние центробежных сил зависит от широты места нахождения МСЧВ и учитывается аналитически. Влияние кинематических параметров – пути и скорости перемещения МСЧВ – может быть сведено к минимуму путем учета релятивистского смещения частоты генератора МСЧВ за время его движения.

На рис. 1 приведена принципиальная схема релятивистского метода измерения разности ортометрических высот между двумя пунктами РСДБ.

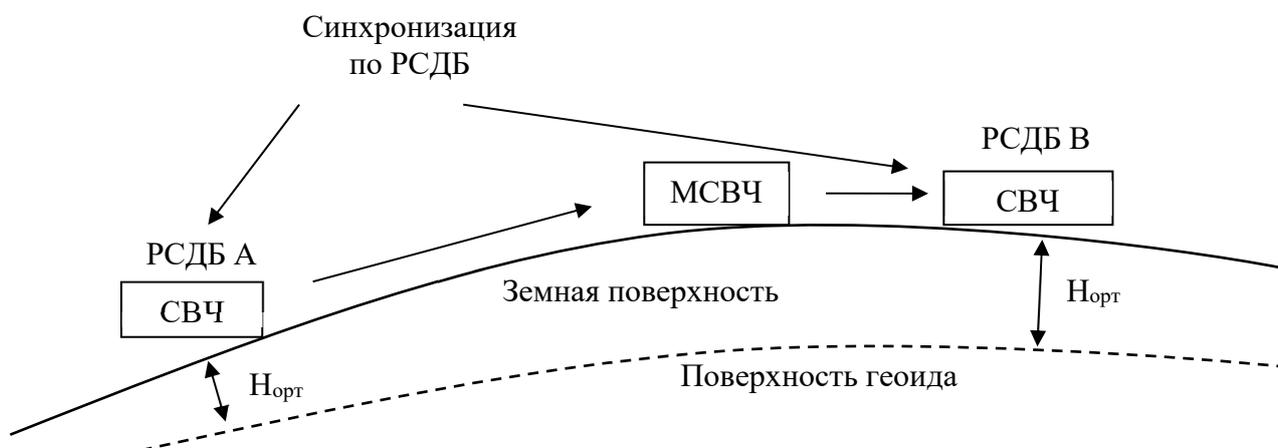


Рис. 1. Схема измерения разности ортометрических высот

Минимизировать влияние нестабильности шкалы МСЧВ от изменений температуры и собственного дрейфа возможно за счет проведения измерений на достаточно длительном интервале времени, а также путем выполнения дополнительного обратного перемещения МСЧВ из пункта *A* в пункт *B*. При этом собственные дрейфы шкал и кинематические параметры в большой степени компенсируются путем совместной обработки результатов, полученных в прямом и обратном ходе.

Результаты

Для оценки предельной разрешающей способности хронометрического нивелирования, выполняемого с использованием стандартов частоты и времени типа Ч1-75А и Ч1-1007, которыми оснащены большинство служб времени и частоты в России, с помощью разработанного ранее программного

имитатора нестабильности квантовых часов [13] были проведены модельные расчеты с задаваемыми параметрами случайного и систематического ухода часов от равномерного времени. Моделирование величины систематического расхождения шкал часов, возникающего из-за их нахождения на разных высотах и соответственно разных гравитационных потенциалах, выполнено для условий, приближенным к практическим экспериментам, которые приведены в работе [14]. Для моделирования случайного процесса ухода шкалы на программном имитаторе задавались характеристики нестабильности, близкие к характеристикам стандартов частоты и времени Ч1-75А, приводимые в технической документации. На рис. 2 показан результат ухода шкалы за 10 суток для модели часов с относительной нестабильностью порядка $1 \cdot 10^{-15}$ на сутках, находящихся на высоте 50 м от источника шкалы равномерного времени.

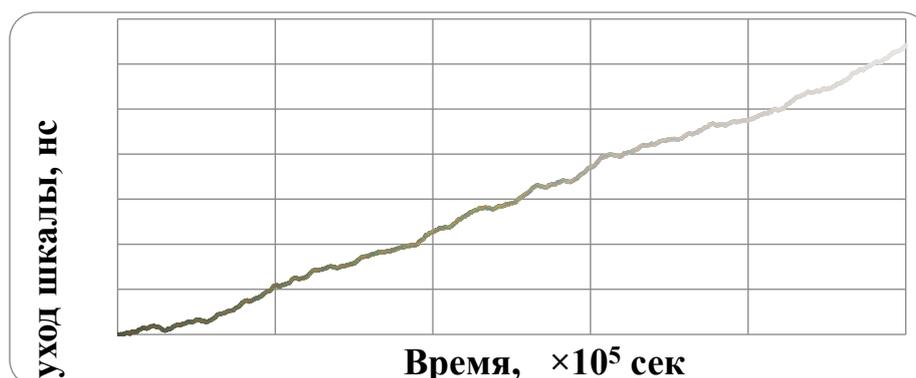


Рис. 2. Модель релятивистского ухода СЧВ Ч1-75А

Анализ графика на рис. 2 показывает уход шкалы за 10 суток на величину порядка 3,2 нс, что соответствует рассчитанной по формуле (6) разности высот около 29 м. При этом из-за наличия в ходе часов случайной компоненты возникает неопределенность, как это следует из данных графика на уровне 0,2–0,3 нс. Соответственно, неопределенность в оценке высоты на данном интервале по формуле (6) составит 2–3 м.

На практике в силу воздействия на ход часов различных факторов, наиболее значимым из которых является температура, погрешность оценивания высоты может возрасти более чем в два раза, что подтверждается

в частности, результатами, приведенными в [13].

Таким образом, результаты модельных экспериментов показывают предельно достижимую точность хронометрического нивелирования при использовании квантовых часов с нестабильностями, определяемыми чисто случайными квантовыми процессами.

Заключение

Приведенные оценки показывают, что при существующем уровне нестабильности СЧВ использование пунктов РСДБ в качестве, например, геодезической основы для создания си-

стемы ортометрических высот на современном этапе технического развития нецелесообразно. Тем не менее в связи с идущими в нашей стране и за рубежом новыми разработками высокостабильных СЧВ создание такой системы станет востребованным. Обоснованность таких прогнозов обусловлена активными разработками новых СЧВ как в России, так и за рубежом [15]. К настоящему времени опытный образец СЧВ, суточная нестабильность которого находится в пределах $10^{-16} \div 10^{-17}$ [16], уже вошел в состав первичного стандарта частоты ГСЧВ. В национальном исследовательском ядерном университете МИФИ и Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН проводятся исследования и эксперименты по созданию ядерного СЧВ на ядрах изотопа тория-229 с уровнем нестабильности порядка 10^{-20} [17], поэтому следует ожидать востребованности рассматриваемого в данной работе метода в недалеком будущем.

Поскольку инструментальная (внутренняя) погрешность синхронизации, определяемая разрешаемой способностью корреляторов, оценивается в пределах 10–15 пс, то теоретически это позволяет при проведении одновременных измерений определить превышение между пунктами РСДБ с погрешностью не более 0,5 мм, однако влияние различных и технических факторов на процесс измерений неизбежно приведет к расширению границ теоретически оцениваемой погрешности. Поэтому отработка методики проведения измерений хронометрического нивелирования, наряду с разработкой адекватных алгоритмов их обработки с целью минимизации суммарной погрешности в результатах измерений, является важной и актуальной задачей, от успешного решения которой будет зависеть дальнейший научно-технический прогресс ряда направлений фундаментальных и прикладных наук.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьянов Г. В., Майоров А. В., Бровар Б. В. и др. Об установлении единой общеземной системы нормальных высот // Гравиметрия и геодезия / под ред. Б. В. Бровара. – М. : Научный мир, 2010. – С. 301–305.
2. Побединский Г. Г., Столяров И. А. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития // Геодезия, картография и навигация – современные подходы к формированию и использованию геопространственных данных : Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 апр. 2017 г. / Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь. – 2017. – С. 14–27.
3. Ипатов А. В., Варганов М. Е. Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО» как основа координатно-временного обеспечения и фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС // Тр. ИПА РАН. – СПб. : Наука, 2013. – № 14. – С. 3–23.
4. Царук А. А., Жуков Е. Т., Иванов Д. В., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф., Мельников А. Е., Носов Е. В., Безруков И. А., Хвостов Е. Ю. Оценка возможностей сравнения шкал времени и частот с использованием РСДБ-системы нового поколения // Метрология времени и пространства : материалы VIII Международного симпозиума. – Менделеево : ВНИИФТРИ, 2016. – С. 80–84.
5. Малимон А. Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной метрологии. – 2016. – № 8. – С. 198–268.
6. Пасынок С. Л. Методы и средства определения параметров вращения Земли // ФГУП «ВНИИФТРИ» Альманах современной метрологии. – 2016. – № 8. – С. 269–323.
7. Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени : монография. – Менделеево : ВНИИФТРИ, 2017. – 439 с.
8. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Высокоточное определение релятивистских эффектов смещения частоты и времени в системе атомных часов «Земля – спутник» // Тр. ИПА РАН. – 2017. – Вып. 43. – С. 14–26.
9. Бровар Б. В., Юркина М. И., Тулин В. А., Спиридонов А. И., Демьянов Г. В., Галаганов О. Н., Родкин М. В., Таранов В. А., Кафтан В. И., Жаров В. Е., Авсюк Ю. Н. Гравиметрия и геодезия. – М. : Научный мир, 2010. – 560 с.

10. IERS Annual Report 2013–2014 / Edited by Wolfgang R. Dick and Bernd Richter. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2018. – P. 203–204.

11. Тиссен В. М. СНИИМ – СГГА в Международном проекте ЕОРСРРР (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project) // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 97–104.

12. Фатеев В. Ф., Игнатенко И. Ю. О возможности измерения параметров гравитационного поля Земли с помощью квантово-оптических систем // Альманах современной метрологии. – 2022. – Вып. 29(1). – С. 106.

13. Тиссен В. М. Имитационная модель нестабильности атомных часов // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 107–112.

14. Фатеев В. Ф., Смирнов Ф. Р., Карауш А. А. Эксперимент по повышению точности квантового нивелира на основе водородных квантовых часов с использованием фазовых измерений ГЛОНАСС/GPS // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, вып. 8. – С. 1181–1187.

15. Беляев А. А., Демидов Н. А., Поляков В. А., Тимофеев Ю. В. Оценка возможного уменьшения нестабильности частоты водородного генератора при использовании пучка атомов в одном квантовом состоянии // Измерительная техника. – 2018. – Вып. 8. – С. 28–31.

16. Бердасов О. И., Хабарова К. Ю., Стрелкин С. А., Белотелов Г. С., Костин А. С., Грибов А. Ю., Пальчиков В. Г., Колачевский Н. Н., Слюсарев С. Н. Оптические стандарты частоты на холодных атомах стронция // Альманах-современной-метрологии. – 2020. – № 1. – С. 13–36.

17. Донченко С. И., Денисенко О. В., Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Квантовый футшток: проблемы создания и возможности // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение», 14–15 февраля, п. Менделеево. – 2021. – С. 115–119.

Об авторах

Виктор Мартынович Тиссен – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник.

Галина Вячеславна Симонова – кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии.

Получено 07.11.2023

© В. М. Тиссен, Г. В. Симонова, 2024

Using VLBI network points to improve the accuracy of chronometric leveling

V. M. Tissen¹, G. V. Simonova²

¹ West-Siberian branch of Federal State Unitary Enterprise "Russian Scientific Research Institute Physico-technical and Radio Measurements", Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: simgal@list.ru

Abstract. This article examines the possibilities of a new promising method for creating a global system of orthometric heights, based on the use of the effects of general relativity. Directions for the development and improvement of basic technical means identified, without which it is impossible to achieve the required metrological characteristics of the results of chronometric leveling, the purpose of which is to determine the heights of relief points above the geoid surface. The necessary theoretical information provided to explain the idea of the method and the methodology for carrying out measurements with the inclusion of VLBI points in the high-altitude geodetic network as reference footing rods. A detailed analysis of the sources of errors arising in the results of chronometric measurements from various natural factors was carried out. In particular, estimates were given to the magnitude of relativistic effects caused by additional potentials at the

points where quantum clocks are placed at different orthometric heights, as well as those caused by moon-solar tides, irregularities in the rotation of the Earth and the movement of its poles. It is shown when the characteristics the relative instability of quantum frequency generators are brought to the level 10^{-19} and the corresponding accuracy of synchronization of remote quantum clocks is ensured, the results of measuring the gravity value by chronometric leveling methods will be higher in accuracy than the results obtained by the best high-precision means of classical gravimetric measurements. The results of an experiment on measuring the difference in orthometric heights using a mobile hydrogen frequency standard VG 1-75A at the West Siberian branch FSUE VNIIFTRI presented, which showed full compliance of the results obtained with the calculated characteristics.

Keywords: radio interferometry, reference system, orthometric height, gravitational potential, geoid, chronometric leveling, frequency standards, relativistic effects, quantum clock instabilities, time scale

REFERENCES

1. Demyanov, G. V., Mayorov, A. V., & Brovar, B. V. (2010). On the establishment of a unified earth-wide system of normal heights. In *Gravimetriya i geodeziya [Gravimetry and geodesy]* (pp. 301–305). B. V. Brovar (Ed.). Moscow: Nauchnyy mir Publ. [in Russian].
2. Pobedinsky, G. G., & Stolyarov, I. A. (2017). The current state of the state system of geodetic support of the Russian Federation and the main directions of its development. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Geodeziya, kartografiya i navigatsiya – sovremennye podkhody k formirovaniyu i ispol'zovaniyu geoprostranstvennykh dannykh [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Geodesy, Cartography and Navigation – Modern Approaches to the Formation and Use of Geospatial Data]* (pp. 14–27). Minsk [in Russian].
3. Ipatov, A. V., & Varganov, M. E. (2013). Radio interferometric complex "Kvazar-KVO" as the basis for coordinate-time support and fundamental support of the GLONASS system". *Trudy IPA RAN [Proceedings of the IPA RAS]*, 14, 3–23 [in Russian].
4. Tsaruk, A. A., Zhukov, E. T., Ivanov, D. V., Kurdubov, S. L., Surkis, I. F., Melnikov, A. E., Nosov, E. V., Bezrukov, I. A., & Khvostov, E. Yu. (2016). Assessment of the possibilities of comparing time and frequency scales using a new generation VLBI system. In *Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma: Metrologiya vremeni i prostranstva [Proceedings of the VIII International Symposium: Metrology of time and space]* (pp. 80–84). Mendeleevo: FSUE "VNIIFTRI" Publ. [in Russian].
5. Malimon, A. N. (2016). Transmission of reference time and frequency signals via fiber-optic lines. *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology]*, 8, 198–268 [in Russian].
6. Pasyuk, S. L. (2016). Methods and means for determining the parameters of the Earth's rotation. *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology]*, 8, 269–323 [in Russian].
7. Fateev, V. F. (2017). *Relyativistskaya metrologiya okolozemnogo prostranstva-vremeni [Relativistic metrology of near-Earth space-time]*. Mendeleevo: FSUE "VNIIFTRI" Publ., 439 p. [in Russian].
8. Fateev, V. F., Rybakov, E. A. (2017). High-precision determination relativistic effects of frequency and time shifts in the Earth-satellite atomic clock system. *Trudy IPA RAN [Proceedings of the IPA RAS]*, 43, 14–26 [in Russian]. Brovar, B. V., Yurkina, M. I., Tulin, V. A., Spiridonov, A. I., Demyanov, G. V., Galaganov, O. N., Rodkin, M. V., Taranov, V. A., Kaftan, V. I., Zharov, V. E., & Avsyuk, Yu. N. (2010). *Gravimetriya i geodeziya [Gravimetry and geodesy]*. Moscow: Nauchnyy mir Publ., 560 p. [in Russian].
9. Wolfgang R. Dick, & Bernd Richter. (Eds.). (2018). IERS Annual Report 2013–2014 (pp. 203–204). Edited by International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.

10. Thiessen, V. M. (2011). SNIIM-SSGA in the International project EORSRRR (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project). *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 1(14), 97–104 [in Russian].
11. Fateev V. F., & Ignatenko I. Yu. (2022). On the possibility of measuring the parameters of the Earth's gravitational field using quantum-optical systems. *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology]*, 29(1), P. 106 [in Russian].
12. Thiessen, V. M. (2011). Simulation model of atomic clock instability. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(16), 107–112 [in Russian].
13. Fateev V. F., Smirnov F. R., & Karaush A. A. (2023). An experiment to improve the accuracy of a quantum level based on a hydrogen quantum clock using GLONASS/GPS phase measurements. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]*, 93(8), 1181–1187 [in Russian].
14. Belyaev A. A., Demidov N. A., Polyakov V. A., & Timofeev Yu. V. (2018). Evaluation of the possible reduction in the instability of the frequency of a hydrogen generator when using a beam of atoms in one quantum state. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Technology]*, 8, 28–31 [in Russian].
15. Berdasov, O. I., Khabarova, K. Yu., Strelkin, S. A., Belotelov, G. S., Kostin, A. S., Gribov, A. Yu., Palchikov, V. G., Kolachevsky, N. N., & Slyusarev, S. N. (2020). Optical frequency standards on cold strontium atoms. *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology]*, 1, 13–36 [in Russian].
16. Donchenko, S. I., Denisenko, O. V., Fateev, V. F., & Rybakov, E. A. (2021). Quantum footstock: problems of creation and possibilities. In *Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespechenie [Proceedings of the Scientific and Technical Conference: Navigation along the Earth's Gravitational Field and its Metrological Support]* (pp. 115–119). Mendeleev [in Russian].

Author details

Viktor M. Tissen – Ph. D., Researcher.

Galina V. Simonova – Ph. D., Associate Professor, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology.

Received 07.11.2024

© V. M. Tissen, G. V. Simonova, 2024