

УДК 528.422.1:528.375

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-13-22

К вопросу определения системы высот, реализуемой методом хронометрического нивелирования

Е. Г. Гиенко^{1✉}, И. Г. Ганагина¹

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

e-mail: elenagienko@yandex.ru

Аннотация. Приведена концепция международной системы отсчета высот IHRS, в которой вертикальные координаты точек определяются геопотенциальными числами. Этой концепции соответствует метод хронометрического нивелирования, где по измерению релятивистского смещения частоты атомных стандартов определяется разность гравитационных потенциалов. Представлены основные направления развития метода. Отмечены недостатки реализаций существующих систем высот, где основной из них – накопление ошибок с увеличением расстояния. Рассмотрены вопросы перехода от разностей гравитационных потенциалов, измеряемых методом хронометрического нивелирования, к разностям высот в гравитационном поле Земли: задание исходной высоты стационарного стандарта, неопределенности в формулах, разномасштабность высот, вызванная выбором знаменателя в основной формуле хронометрического нивелирования. При переходе хронометрического нивелирования на сантиметровый уровень точности неопределенность формул и выбор знаменателя будут иметь значение.

Ключевые слова: IHRS, IHRF, хронометрическое нивелирование, системы высот, нормальные высоты, ортометрические высоты, гравитационный потенциал

Для цитирования:

Гиенко Е. Г., Ганагина И. Г. К вопросу определения системы высот, реализуемой методом хронометрического нивелирования // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 13–22. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-13-22

Введение

В системах физических высот в гравитационном поле Земли вертикальные координаты точек на ее поверхности задаются расстояниями между некоторой опорной и текущей уровенными поверхностями поля силы тяжести. При реализации систем высот традиционно за опорную уровенную поверхность принимают средний уровень моря (в частных случаях – уровень водоемов), а высоты определяются методами геометрического нивелирования. Из-за различного выбора опорных уровенных поверхностей в разных странах и регионах в настоящее время существует около сотни местных и региональных систем высот с расхождениями друг относительно

друга до 2 м [1]. Множество опорных поверхностей относительно уровня моря осложняет объединение нивелирных сетей и реализацию мировой системы высот. Для решения этой проблемы необходимо приведение высот к единой уровенной поверхности, а также принятие другой концепции определения вертикальных координат точек на поверхности Земли, не зависящей от уровня моря.

В резолюции № 1 Международной ассоциации геодезии (International Association of Geodesy, IAG) [2] от 2015 г. излагаются основные соглашения по определению международной системы отсчета высот (International Height Reference System, IHRS). Определение IHRS в [2] дается в терминах потенциальных параметров: вертикальные координаты точки A ,

находящейся на поверхности с гравитационным потенциалом W_A , представляют собой геопотенциальные числа C_A

$$\Delta W_A = C_A = W_0 - W_A,$$

относящиеся к эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли, реализуемой стандартным значением $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$. Поскольку это значение принято в качестве соглашения, показатель точности может быть опущен, однако в статье [3] отмечается, что погрешность значения W_0 составляет величину $\pm 0,02 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$.

Пространственное положение точки A для потенциала $W_A = W(\mathbf{X})$ задается координатами \mathbf{X} в международной земной координатной основе ITRF. В резолюции [2] также отмечается, что параметры, наблюдения и данные должны быть связаны со средней приливной системой / средней земной корой.

В настоящее время основной проблемой является реализация IHRF – установление международной высотной основы, International Height Reference Frame (IHRF) [4, 5]. В начале 2024 г. был создан координационный центр IHRF под эгидой международной службы гравитационного поля IGFS [6].

Предполагается развитие глобальной высотной сети вместе с региональными и национальными сетями сгущения, на пунктах которых известны геопотенциальные числа [6]. Такая сеть будет включать:

- фундаментальные геодезические обсерватории (для обеспечения связи между вектором положения \mathbf{X} , гравитационным потенциалом W , международным атомным временем TAI и абсолютным значением силы тяжести g);

- опорные ГНСС-станции с известными координатами \mathbf{X} , с различными уровнями плотности сети, для обеспечения доступа к IHRF даже в отдаленных районах;

- приливные станции, эталонные датчики прилива;

- локальные нивелирные сети;

- гравиметрические сети, гравиметрические опорные пункты.

Таким образом, реализация IHRF основана на сочетании геометрической составляющей, определяемой положением станций в ITRF, и физической составляющей, определяемой значениями гравитационных потенциалов W на этих станциях. Благодаря тесному международному сотрудничеству, осуществляемому в рамках IAG, в последние годы стало возможным наметить научные основы IHRF, рассчитать первое решение IHRF и определить ключевые вопросы для обеспечения его долгосрочной устойчивости [6].

В соответствии с установками глобальной системы геодезических наблюдений GGOS [7] целевая точность геопотенциальных чисел $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2\text{с}^2$. На практике точность реализации IHRF ограничена на несколько порядков до $10 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2\text{с}^2 - 100 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2\text{с}^2$ следующими факторами [8]:

- нет единых стандартов для определения W_A ;

- моделирование гравитационного поля и оценка векторов положения \mathbf{X} относятся к разным соглашениям;

- геодезическая инфраструктура распределена неравномерно по всему миру, и др.

Учет перечисленных факторов, определение основных принципов, необходимых для надежной и устойчивой реализации IHRF, – актуальная задача, решаемая в ближайшие годы.

Переход от геопотенциальных чисел к метрическим высотам в гравитационном поле производится делением на ускорение силы тяжести [9]. Ортометрическая высота точки A отсчитывается от поверхности геоида и вычисляется по формуле

$$H_A^g = \frac{W_0 - W_A}{g_A^{\text{cp}}} = \frac{\int g dh}{g_A^{\text{cp}}},$$

где g_A^{cp} – среднее интегральное значение силы тяжести на отрезке силовой линии от геоида до точки A .

Нормальная высота отсчитывается от поверхности квазигеоида и вычисляется по формуле

$$H_A^\gamma = \frac{W_0 - W_A}{\gamma_A^{cp}} = \frac{\int g dh}{\gamma_A^{cp}},$$

где γ_A^{cp} – среднее интегральное значение нормальной силы тяжести на отрезке нормали к эллипсоиду, от эллипсоида до телурида (определяемого по измеренным высотам из геометрического нивелирования). Это значение можно точно вычислить по формуле $\gamma_A^{cp} = \gamma_A^0 + \frac{\partial \gamma}{\partial H} \cdot \frac{H_A}{2}$, где γ_A^0 – значение нормальной силы тяжести на поверхности эллипсоида, H_A – геодезическая высота точки A .

Динамическая высота вычисляется по формуле

$$H_A^d = \frac{W_0 - W_A}{g_0^{cp}} = \frac{\int g dh}{g_0^{cp}},$$

где $g_0^{cp} = \text{const}$ – среднее значение силы тяжести, принятое для рассматриваемой территории.

Для вычисления ортометрической высоты нужно знать действительное ускорение силы тяжести во всех точках силовой линии поля силы тяжести, что теоретически невозможно. Нормальные высоты могут быть получены по измерениям на поверхности Земли, без знания распределения масс внутри Земли [9].

Перечисленные системы высот реализуются с помощью геометрического нивелирования. В геометрическое нивелирование высших классов вводятся поправки за непараллельность уровней поверхностей нормального поля силы тяжести и за отличия

$$W_1 - W_2 = \left(\frac{\partial W}{\partial h} \right)_2 h_2 - \left(\frac{\partial W}{\partial h} \right)_1 h_1 + \frac{1}{2} h_2^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial h^2} \right)_2 - \frac{1}{2} h_1^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial h^2} \right)_1, \quad (2)$$

где h_1, g_1 и h_2, g_2 – ортометрические высоты и ускорения силы тяжести в точках 1 и 2 соответственно.

По определению потенциала,

$$\left(\frac{\partial W}{\partial h} \right)_1 h_1 = g_1 h_1, \quad \left(\frac{\partial W}{\partial h} \right)_2 h_2 = g_2 h_2, \quad \left(\frac{\partial^2 W}{\partial h^2} \right)_1 = \left(\frac{\partial g}{\partial h} \right)_1, \quad \left(\frac{\partial^2 W}{\partial h^2} \right)_2 = \left(\frac{\partial g}{\partial h} \right)_2.$$

действительного поля силы тяжести от нормального [10].

Основной недостаток реализации системы нормальных высот с помощью геометрического нивелирования – накопление ошибок с увеличением расстояния от опорного пункта. Кроме того, в разных странах приняты разные начала отсчета высот, а также существуют сложности с передачей высоты на острова и др. Все это осложняет реализацию единой мировой системы высот. Концепция международной системы отсчета высоты IHRС [2], основанная на геопотенциальных числах, как минимум снимает вопрос о начале отсчета и о передаче высот на большие расстояния.

Метод хронометрического нивелирования, основанный на измерениях релятивистского смещения частоты атомных стандартов, позволяет непосредственно получать разности гравитационных потенциалов в точках и, как следствие, разности геопотенциальных чисел этих точек [11–14].

Рабочие формулы хронометрического нивелирования

В основе хронометрического нивелирования лежит определение разностей гравитационных потенциалов двух точек по измерению релятивистского гравитационного смещения частоты атомных часов, расположенных в этих точках [15]

$$\left(\frac{f_1 - f_2}{f_1} \right) = \frac{W_2 - W_1}{c^2}. \quad (1)$$

С другой стороны [16], разность потенциалов определяется выражением

Для извлечения разности высот выполним простые арифметические преобразования, добавив в формулу (2) выражение

$$\frac{1}{2} \left(h_1 g_2 - h_1 g_2 + h_2 g_1 - h_2 g_1 + h_2^2 \left(\frac{\partial g}{\partial h} \right)_1 - h_2^2 \left(\frac{\partial g}{\partial h} \right)_1 \right) = 0.$$

После чего формула (2) преобразуется в

$$W_1 - W_2 = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - h_1) \cdot (g_1 + g_2) + \frac{1}{2} \cdot (h_2 + h_1) \cdot (g_2 - g_1) + \frac{h_2^2}{2} \cdot \left[\left(\frac{dg}{dh} \right)_2 - \left(\frac{dg}{dh} \right)_1 \right] + \frac{1}{2} \cdot (h_2^2 - h_1^2) \cdot \left(\frac{dg}{dh} \right)_1. \quad (3)$$

При выполнении экспериментальных исследований [16–19] разность высот выражалась через первое слагаемое формулы (3)

$$H_2 - H_1 \approx \frac{W_1 - W_2}{g_{\text{ср}}} = \left(\frac{f_1 - f_2}{f_1} \right) \frac{c^2}{g_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где $g_{\text{ср}}$ – среднее ускорение силы тяжести на поверхности Земли в двух точках.

На точность определения разности гравитационных потенциалов хронометрическим нивелированием влияют:

- стабильность стандартов частоты. Из формулы (4) следует, что для определения разности высот с сантиметровой точностью относительная неопределенность смещения частоты на суточном интервале должна быть на уровне 10^{-18} ;

- точность сличения частот двух стандартов. Технологии определения гравитационного смещения частоты должны обеспечивать точность сличения частот не хуже точности воспроизведения частоты мобильным стандартом;

- теория и применяемые алгоритмы обработки измерительных данных.

При повышении стабильности атомных стандартов частоты возрастает их чувствительность к изменениям гравитационного поля из-за различных геодинамических эффектов [20]. Наиболее значимые эффекты – приливы в твердой Земле и океанах – оказывают влияние на воспроизведение частоты с нестабильностью на суточном интервале порядка 10^{-17} – 10^{-18} . Эти эффекты могут быть учтены с достаточной точностью по современным моделям приливов. Кроме того, изменение частоты на суточном интервале порядка 10^{-18} вызывается полюсными прили-

вами [20]. Как отмечается в [21], особое внимание следует уделить сложно моделируемым изменениям потенциала, вызываемым колебаниями уровня воды в водохранилищах и уровня грунтовых вод (изменение частоты до $8 \cdot 10^{-18}$). Возникает задача разделения факторов, влияющих на измеряемое релятивистское смещение частоты [22].

В настоящее время ведутся научные исследования и активные разработки высокоточных стандартов частоты [23–25], в том числе мобильных, а также совершенствуются технологии сличения частот и алгоритмы обработки данных [26–29]. Проводятся экспериментальные исследования по измерению релятивистского смещения частоты и получению разности гравитационных потенциалов [16–18, 30, 31]. Основная часть исследований посвящена совершенствованию передачи частот от стационарного стандарта к мобильному и их сличению, а также измерениям разностей гравитационных потенциалов. При переходе к разностям метрических высот возникают вопросы, которые будут рассмотрены далее.

Неопределенности формулы хронометрического нивелирования при проведении экспериментов

Как правило, при вычислении разности высот по данным хронометрического нивелирования используют рабочую формулу

(4), выведенную из первого слагаемого формулы (3), пренебрегая остальными членами выражения. Выполним оценку величины пренебрегаемых слагаемых для двух пунктов с высотами $H_1 = 100$ м и $H_2 = 2\ 100$ м. Для оценки примем значение силы тяжести в первой точке $g_1 = 9,800$ м/с². Будем считать, что основное влияние на изменение силы тяжести оказывает вертикальный градиент, равный примерно $-3 \cdot 10^{-6}$ с⁻². В таком случае сила тяжести во второй точке будет $g_2 = 9,794$ м/с². Второе и четвертое слагаемые в формуле (3) в нашем случае оказались равны $6,6$ м²/с², что соответствует примерно $0,67$ м по высоте. Третье слагаемое в этой формуле пренебрежимо мало.

Рабочую формулу (4) можно использовать при небольших расстояниях и перепадах высоты, а также при имеющейся точности воспроизведения частоты, но в общем случае рекомендуется измерение вертикального градиента силы тяжести и итерации для уточнения разности высот.

Задание исходной высоты в методе хронометрического нивелирования

Стационарные стандарты частоты, первичный и вторичные эталоны, генерируют секунду атомного времени (АТ) в системе земного времени Terrestrial Time (ТТ) на поверхности геоида. В резолюции [32] отмечается, что основным источником неопределенности в реализации ТТ с помощью атомных часов являются сложность и временные изменения, присущие определению и реализации геоида. При установлении ТТ используется определяющая константа L_G , вычисляемая через гравитационный потенциал на геоиде W_0

$$L_G = W_0 / c^2 = 6,969290134 \cdot 10^{-10}.$$

Поскольку стационарные стандарты генерируют частоту, отнесенную к уровенной поверхности W_0 , то сличение частоты стационарного и мобильного стандарта, расположенного в некоторой точке, позволит определить геопотенциальное число этой точки. Таким об-

разом, метод хронометрического нивелирования полностью соответствует концепции IHRs.

Для определения же абсолютных высот точек размещения мобильных стандартов надо знать высоту стационарных стандартов частоты. При их нивелировании возникают систематические и случайные ошибки [10]. Кроме этого, в задачу определения высот хронометрическим нивелированием входит передача высоты в помещение, где располагаются стандарты частоты, а также определение точки относимости, к которой относятся частотные измерения, как стационарного, так и мобильного стандартов. В измеряемых точках и в местах размещения стационарных стандартов частоты необходимы измерения силы тяжести и ее вертикального градиента.

Переход от разности потенциалов к разности высот

На практике для внешнего контроля результатов хронометрического нивелирования, как правило, используются непосредственно измеренные разности высот. Для перехода от разности гравитационных потенциалов к разностям высот в гравитационном поле необходимо определить знаменатель в формуле хронометрического нивелирования (4). Выбор знаменателя определяет переход к метрической высоте, необходимой для практических приложений. Этот выбор становится значимым при повышении точности хронометрического нивелирования, при увеличении расстояния между точками или большой разности высот точек (в горах), при согласовании (уравнивании) высот. При переходе от геопотенциальных чисел к метрическим высотам выбор знаменателя в формуле (4) будет определять поверхность, откуда отсчитываются высоты.

В экспериментах по реализации метода хронометрического нивелирования [16–19, 29] при вычислении разностей высот использовалось некоторое среднее ускорение силы тяжести g^{cp} , в результате чего, по определению, вычислялись динамические высоты H^d .

Возьмем отношение динамической высоты к нормальной

$$H^d / H^\gamma = \gamma^{cp} / g^{cp}$$

и получим разность высот в двух системах

$$H^\gamma - H^d = H^d (g^{cp} / \gamma^{cp} - 1) = H^d \Delta g / \gamma^{cp}.$$

При аномалии силы тяжести $\Delta g = 50$ мГал и высоте $H = 100$ м разность высот составит величину около 5 см, а если высота на порядок больше, 1 000 м, то 50 см, что не превышает погрешность выполненных экспериментов, но в будущем при использовании более стабильных стандартов частоты определение знаменателя в рабочей формуле хронометрического нивелирования должно быть единым и обоснованным.

Подобное рассогласование высот также происходит, если знаменатель в формуле при выполнении экспериментов выбирается по-разному (например, среднее g в двух точках размещения стандартов или g в точке посередине расстояния между стандартами).

Выводы и предложения

Таким образом, метод хронометрического нивелирования, обеспечивающий измерение разности гравитационных потенциалов по релятивистскому смещению частоты, соответствует концепции мировой системы высот IHRF. В силу технологических ограничений этот метод не является основным для реализации IHRF, однако он дает дополнительную

непосредственно измеренную и независимую информацию о гравитационном поле Земли.

Основные направления исследований в области хронометрического нивелирования:

- разработка высокостабильных стандартов частоты, в том числе в мобильном исполнении;
- разработка высокоточных методов сличения частот, моделирование и учет поправок в измерения, идентификация и разделение факторов, влияющих на результаты хронометрического нивелирования;
- изучение гравитационного поля Земли и уточнение его моделей;
- разработка методики получения высот хронометрическим нивелированием, их уравнивания для включения в мировую высотную основу IHRF.

Поскольку для практического применения нужны не геопотенциальные числа, а высоты в гравитационном поле Земли, то при переходе от разности гравитационных потенциалов к разностям высот возникают вопросы, отмеченные в данной статье: задание исходной высоты стационарного стандарта, неопределенность в формуле связи разности потенциалов и разности высот, отсчетные поверхности для определения высот, вызванные выбором знаменателя в основной формуле хронометрического нивелирования.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «Геотех-Квант-2».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Height Reference Frame [Electronic resource]. – URL: <https://ggos.org/item/height-reference-frame/> (дата обращения: 08.07.2024).
2. IAG Resolutions Adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, June 22 – July 2, 2015 [Electronic resource]. – URL: <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fd9d31dc.pdf>.
3. Sánchez L., Cunderlík R. et al. (2016). A conventional value for the geoid reference potential W0. *J Geod* (2016) 90. – P. 815–835. – DOI 10.1007/s00190-016-0913-x.
4. Sánchez L., Ágren J., et al. (2021) Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRF) // *Journal of Geodesy*, 2021. – 95:3. – DOI 10.1007/s00190-021-01481-0.
5. Sánchez L., Wziontek H., Wang YM, Vergos GS, Timmen L. Towards an integrated global geodetic reference frame: preface to the special issue on reference systems in physical geodesy // *Journal of Geodesy*, 2023. – 97:59. – DOI: 10.1007/s00190-023-01758-6.
6. International Height Reference Frame Coordination Center (IHRF CC) [Electronic resource]. – URL: http://igfs.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/01/IHRF_CoordinationCenter_v4.pdf.
7. Global Geodetic Observing System (GGOS) [Electronic resource]. – URL: <https://ggos.org/>.

8. Ihde J., Sánchez L., Barzaghi R., et al. (2017) Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR5) // *Surv Geophys* (2017) 38. – P. 549–570 – DOI 10.1007/s10712-017-9409-3.
9. Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Теория высот в гравитационном поле Земли // *Труды ЦНИИГАиК*. – 1972. – Вып. 191. – 144 с.
10. ГКИНП (ГНТА) – 03-010-03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 231 с.
11. Müller J., Dirkx D., Kopeikin S. M., et al. (2017). High Performance Clocks and Gravity Field Determination // *Space Science Reviews, Topical Collection*, 2017. – Vol. 214. – No. 1. – Art. 5 – DOI 10.1007/s11214-017-0431-z.
12. Kopeikin S. M., Yu I., Vlasov I. & Han W.B. (2018) Normal gravity field in relativistic geodesy. *Phys. Rev. D* 97, ID: 045020. – DOI 10.1103/PhysRevD.97.045020.
13. Wu H., Müller J., Lämmerzahl C. Clock networks for height system unification: a simulation study, *Geophysical Journal International*, Vol. 216, Issue 3, March 2019, Pages 1594–1607. – URL <https://doi.org/10.1093/gji/ggy508>.
14. Wu H., Müller J. Towards an International Height Reference Frame Using Clock Networks (2020) *International Association of Geodesy Symposia*. – URL: https://doi.org/10.1007/1345_2020_97.
15. Mai E. Time, atomic clocks, and relativistic geodesy/Verlag d. Bayerische Akad. d. Wiss., 2013. – 126 p.
16. Канушин В. Ф., Карпик А. П. и др. Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений // *Вестник СГУГиТ*. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 53–69.
17. Kopeikin S. M., Kanushin V. F., Karpik A. P., Tolstikov A. S., Gienko E. G., Goldobin D. N., Kosarev N. S., Ganagina I. G., Mazurova E. M., Karaush A. A., Hanikova E. A. Chronometric levelling in Siberia // *Gravitation and Cosmology*, 22, 234 (2016). – DOI 10.1134/S0202289316030099.
18. 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. – DOI 10.21883/JTF.2023.08.55981.32-23.
19. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // *Доклады Академии наук. Физика, технические науки*. – 2021. – Т. 1(496). – С. 21–44. – DOI 10.31857/S2686740020060097.
20. 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.
21. Гиенко Е. Г. Анализ влияния геодинамических факторов на релятивистское смещение частоты атомных стандартов // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 30–42. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-30-42.
22. Гиенко Е. Г., Ганагина И. Г. Методы разделения и идентификации различных факторов, влияющих на изменение частоты атомного стандарта // *Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сборник материалов VII Национальной научно-практической конференции, 21–24 ноября 2023 г., Новосибирск. В 3 ч. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. Ч. 1. – С. 139–148. – DOI 10.33764/2687-041X-2023-1-139-148.*
23. Фатеев В. Ф., Лопатин В. П., Пальчиков В. Г., Сысоев В. П. Обзор состояния разработок мобильных стандартов частоты и времени для решения задачи квантового нивелирования // *Альманах современной метрологии*. – 2022. – № 1 (29) – С. 43–62.
24. Сысоев В. П., Самохвалов Ю. С., Овчинников С. Н., Нестеров Н. И., Грачев Н. М., Алексеев М. И., Нагирный В. П., Шаталов А. А. Разработка перевозимых квантовых часов водородного поколения // *Альманах современной метрологии*. – 2020. – № 1 (21). – С. 116–125.

25. Ritter S. et al. Opticlock: Transportable and easy-to-operate optical single ion clock // EFTF 2021 I. – DOI 10.1364/QUANTUM.2020.QTh5B.6.
26. Riedel F., Al-Masoudi A., Benkler E., Dörscher S., Gerginov V., Grebing C., Häfner S., Huntemann N., Lipphardt B., Lisdat C., et al. Direct comparisons of European primary and secondary frequency standards via satellite techniques // Metrologia. – 2020. – V. 57. – № 04. – DOI 10.1088/1681-7575/ab6745.
27. Pizzocaro M., et al. Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry // Nature Physics. – 2021. – 17. – P. 223–227. – DOI 10.1038/s41567-020-01038-6.
28. Dan X., Lee W., Stefani F., Lopez O., Amy-Klein A., Pottie P. Studying the fundamental limit of optical fiber links to the 10^{-21} level // Opt. Express. – 2018. – V. 26. – P. 9515–9527. – DOI 10.1364/OE.26.009515.
29. Алексейцев С. А., Гусар Д. Ф., Рачков В. Д., Толстикова А. С., Шмидт Л. В. Оценивание гравитационных изменений частоты в задачах хронометрического нивелирования на основе применения спутниковых навигационных технологий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 8 : Национальная конф. с междунар. участием «СибОптика-2022. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. № 2. – С. 107–112. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-8-2-107-112.
30. Huang Y, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca⁺ optical clock // Phys. Rev. A 2020, 102, 050802(R). – DOI 10.1103/PhysRevA.102.050802.
31. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nat. Photonics. – 2020. – 14. – P. 411–415. – DOI 10.1038/s41566-020-0619-8.
32. IAU resolutions adopted at the 24th general assembly (Manchester, august 2000) [Electronic resource]. – URL: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2000_French.pdf.

Об авторах

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

Ирина Геннадьевна Ганагина – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой космической и физической геодезии.

Получено 20.06.2024

© Е. Г. Гиенко, И. Г. Ганагина, 2024

On the issue of determining the height system implemented by the chronometric leveling method

E. G. Gienko¹, I. G. Ganagina¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: elenagienko@yandex.ru

Abstract. The article presents the concept of the International Height Reference System IHRS, in which geopotential numbers determines the vertical coordinates of points. The method of chronometric leveling, where the difference of gravitational potentials is determined by measuring the relativistic frequency shift of atomic standards, corresponds to this concept. The main directions of the method development are presented. The disadvantages of the implementation of existing Height systems are noted, where the main one is the accumulation of errors with increasing distance. The issues of transition from the difference of gravitational potentials measured by the method of chronometric

leveling to the height differences in the gravitational field of the Earth are considered. These issues include setting the initial height of the stationary standard, uncertainties in formulas, and the different scales of heights caused by the choice of the denominator in the basic formula of chronometric leveling. When the chronometric leveling reaches the centimeter level of accuracy, the uncertainties of the formulas and the choice of the denominator will be significant values

Keywords: IHRS, IHRF, chronometric leveling, Height systems, normal heights, orthometric heights, gravitational potential

REFERENCES

1. Height Reference Frame. Retrieved from <https://ggos.org/item/height-reference-frame/>.
2. IAG Resolutions Adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly (2015). Retrieved from <https://office.iag-aig.org/doc/5d7b8fd9d31dc.pdf>.
3. Sánchez, L., Cunderlík, R. & et al. (2016). A conventional value for the geoid reference potential W_0 . *Journal of Geodesy*. – 90:815–835., DOI 10.1007/s00190-016-0913-x.
4. Sánchez, L., Ågren, J., & et al. (2021) Strategy for the realization of the International Height Reference System (IHRS). *Journal of Geodesy*. – 95:3., DOI 10.1007/s00190-021-01481-0.
5. Sánchez, L., Wziontek, H., & et al. (2023) Towards an integrated global geodetic reference frame: preface to the special issue on reference systems in physical geodesy. *Journal of Geodesy*. – 97:59., DOI 10.1007/s00190-023-01758-6.
6. International Height Reference Frame Coordination Center (IHRF CC). Retrieved from http://igfs.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/01/IHRF_CoordinationCenter_v4.pdf.
7. Global Geodetic Observing System (GGOS). Retrieved from <https://ggos.org/>.
8. Ihde, J., Sánchez, L., Barzaghi, R., & et al. (2017) Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRS). *Surv Geophys*. – 38:549–570., DOI 10.1007/s10712-017-9409-3.
9. Eremeev, V. F., & Yurkina, M. I. (1972) The theory of heights in the gravitational field of the Earth. *Trudy TsNIIGAiK [Proceedings of TsNIIGAiK]*, I.191, 144 p. [in Russian].
10. Geodetic, cartographic instructions, norms and rules – 03-010-03 (2004). *Instruktsiya po niveirovaniyu I, II, III i IV klassov [Instructions for leveling classes I, II, III and IV]*. Moscow: TsNII-GAiK. – 231 p. [in Russian].
11. Müller, J., Dirkx, D., Kopeikin, S. M., & et al. (2017). High Performance Clocks and Gravity Field Determination. *Space Science Reviews, Topical Collection*. Vol. 214, No. 1, Art. 5, DOI 10.1007/s11214-017-0431-z.
12. Kopeikin, S. M., Yu, I., Vlasov, I. & Han, W.B. (2018) Normal gravity field in relativistic geodesy. *Phys. Rev. D* 97, id: 045020, DOI 10.1103/PhysRevD.97.045020.
13. Wu, H., Müller, J., & Lämmerzahl, C. (2019) Clock networks for height system unification: a simulation study, *Geophysical Journal International*, Vol. 216, I. 3, March 2019, Pages 1594–1607. DOI 10.1093/gji/ggy508.
14. Wu, H., & Müller, J. (2020) Towards an International Height Reference Frame Using Clock Networks. *International Association of Geodesy Symposia*. DOI 10.1007/1345_2020_97.
15. Mai, E. (2013) Time, atomic clocks, and relativistic geodesy/Verlag d. Bayerische Akad. d. Wiss. – 126 p.
16. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., & et al. (2015). The definition of gravity potential and heights differences in geodesy by gravimetric and satellite measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, I.3 (31), 53–69 [in Russian].
17. Kopeikin, S. M., & Kanushin, V. F., et al. (2016). Chronometric levelling in Siberia. *Gravitation and Cosmology*, 22, 234. DOI 10.1134/S0202289316030099.
18. Fateev, V. F., Smirnov, F. R. & Karaush, A. A. (2023). An experiment to improve the accuracy of a quantum level based on hydrogen quantum clocks using GLONASS/GPS phase measurements.

Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics] Vol. 93. I.8., 1181 – 1187., DOI 10.21883/JTF.2023.08.55981.32-23 [in Russian].

19. Fateev, V. F., & Rybakov, E. A. (2021). Experimental verification of the quantum level on a mobile quantum clock. *Doklady Akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki [Reports of the Academy of Sciences. Physics, technical sciences.] Vol.1 (496), 21–44., DOI 10.31857/S2686740020060097 [in Russian].*

20. Voigt, C., Denker, H., & Timmen, L. (2016). Time-variable gravity potential components for optical clock comparisons and the definition of international time scales. *Metrologia., Vol.53, No.6. – P.1365-1383., DOI 10.1088/0026-1394/53/6/1365.*

21. Gienko, E. G. (2022). Analysis of the geodynamic factors impact on the relativistic frequency shift of atomic standards. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], I. 5 (27), 30–42 DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-30-42 [in Russian].*

22. Gienko, E. G., Ganagina, I. G. (2024) Methods of separation and identification of various factors affecting the change in the frequency of the atomic standard. In *Sbornik materialov VII Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya [Proceedings of the 7th National Scientific and Practical Conference: Regulation of land and property relations in Russia: legal and geospatial support, real estate valuation, ecology, technological solutions], Vol.2, 148–157. DOI 10.33764/2687-041X-2024-1-139-148 [in Russian].*

23. Fateev, V. F., Lopatin, V. P., & et al. (2022). Review of the state of development of mobile frequency and time standards for solving the problem of quantum leveling. *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology] No 1 (29), 43–62. [in Russian].*

24. Sysoev, V. P., Samokhvalov, Yu. S. & et al. (2020). Development of a new generation portable hydrogen quantum clock *Al'manakh sovremennoy metrologii [Almanac of Modern Metrology] No 1 (21), 116–125. [in Russian].*

25. Ritter, S. & et al. (2021) Optic lock: Transportable and easy-to-operate optical single ion clock// EFTF I. DOI 10.1364/QUANTUM.2020.QTh5B.6.

26. Riedel, F., Al-Masoudi, A., & et al. (2020). Direct comparisons of European primary and secondary frequency standards via satellite techniques. *Metrologia. 57(04) DOI 10.1088/1681-7575/ab6745.*

27. Pizzocaro, M., & et al. (2021) Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry. *Nature Physics. No 17., P. 223–227 DOI 10.1038/s41567-020-01038-6.*

28. Dan, X., Lee, W., & et al. (2018). Studying the fundamental limit of optical fiber links to the 10⁻²¹ level. *Opt. Express., Vol.26., P. 9515–9527. DOI 10.1364/OE.26.009515.*

29. Alekseytsev, S. A., & et al. (2022) The estimation of frequency shift when solving the problem of chronometric leveling by using satellite navigation technologies. *Interjekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia], Vol.2, 107–112. DOI 10.33764/2618-981X-2022-8-2-107-112 [in Russian].*

30. Huang, Y., & et al. (2020). Geopotential measurement with a robust, transportable Ca⁺ optical clock. *Phys. Rev. A, 102, 050802(R), DOI 10.1103/PhysRevA.102.050802.*

31. Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N. & et al. (2020) Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat. Photonics. 14., P. 411–415. DOI 10.1038/s41566-020-0619-8.*

32. IAU resolutions adopted at the 24th general assembly (2000). Retrieved from https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2000_French.pdf.

Author details

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

Irina G. Ganagina – Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Space and Physical Geodesy.

Received 20.06.2024.

© E. G. Gienko, I. G. Ganagina, 2024