

# УЗКОНАПРАВЛЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ ИСТОЧНИК В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ УСТРОЙСТВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СВЕРХСТАБИЛЬНОЙ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ГЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

М.Г. Гуров<sup>1</sup>, Е.Г. Гурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: goorovmg@mail.ru  
<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Рассмотрены особенности процесса, включающего этапы миниатюризации и компактизации устройства частотного репера, потенциально применимого в процессе проектировки устройств нанесения проектной разбивки, а также в системах слежения за положением горной и карьерной техники. Представлены основные принципы получения рабочих веществ в фазе, которая необходима для функционирования систем получения оптических частот в устройствах воспроизведения сверхстабильной тактовой частоты на основе щелочноземельных металлов. Описывается компактизированный источник атомов щелочноземельных металлов, разработанный в ходе эксперимента по лазерному охлаждению атомов в источнике сверхстабильной частоты. Данный источник позволяет обеспечить получение непрерывного стабильного по интенсивности потока атомов в течение 10 лет с одной заправки в 10 г металла, что в свою очередь снижает эксплуатационные затраты на обслуживание и перезаправку. Для обеспечения вакуумной чистоты корпус источника выполнен из нержавеющей стали. Отсутствуют внутривакуумные нагреватели. Верхний предел рабочей температуры для возгонки атомов ограничивается по абсолютной величине 600–650 °С, а в качественной реализации – физическим разрушением материалов нагревателя. В ходе эксперимента узконаправленность данного источника оценивалась на уровне не более 32 мрад. И достаточным для получения сигнал-шум потока атомов не хуже  $10^{15}$  [1/с·см<sup>2</sup>] при температуре 430 °С и расстоянии наблюдения 33 см. В качестве нагревательных элементов могут быть использованы миниатюрные трубчатые тэны от бытовой паяльной станции. Оригинальность идеи поддерживается реализацией воздушной изолированной прослойки между нагреваемым объемом и внешней частью устройства, предотвращая нагрев корпуса.

**Ключевые слова:** разметка местности, топографирование, геопозиционирование, горный ландшафт, частотный репер, тепловой источник, фильтр частиц, спутниковая геодезия.

**Для цитирования:** Гуров М. Г., Гурова Е. Г. Узконаправленный тепловой источник в вакуумных системах устройств воспроизведения сверхстабильной тактовой частоты для оборудования маркшейдерско-геодезического геопозиционирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 245–257. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_245.

---

# Narrow beam atomic oven in vacuum device systems for reproducing ultra-stable frequency standard for surveying and geodetic positioning equipment

M.G. Gurov<sup>1</sup>, E.G. Gurova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Russia, e-mail: goorovmg@mail.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

---

**Abstract:** In this paper the features of the process, which includes the stages of miniaturization or, more precisely, compactization of the frequency reference device. This device is potentially applicable in the design process and for drawing design layouts, as well as in systems for tracking the position of mining and quarry equipment. The basic principles for obtaining operation substances in the required phase, which is necessary for the functioning of optical frequency systems in devices for reproducing ultra-stable clock frequencies based on alkaline earth metals, are presented. We describe a compacted source of atoms of alkaline earth metals, developed during an experiment on laser cooling of atoms in a source of ultrastable frequency. This source makes it possible to obtain a continuous flow of atoms, stable in intensity, for 10 years from one refill of 10 g of metal, which in turn reduces operating costs for maintenance and refilling. The source body is made of stainless steel to ensure vacuum cleanliness. There are no intra-vacuum heaters. The upper limit of the operating temperature for the sublimation of atoms is limited in absolute value to 600–650 °C, and in a high-quality implementation by the physical destruction of the heater materials. During the experiment, the narrow focus of this source was estimated at a level of less than 32 mrad. And sufficient to obtain a signal-to-noise flow of atoms no worse than  $10^{15}$  [1/sec·cm<sup>2</sup>] at a temperature of 430 °C and an observation distance of 33 cm. Tubular heating elements from a household soldering station can be used as heating elements. The originality of the idea is supported by the implementation of an insulated air layer between the heated volume and the outer part of the device, preventing heating of the housing.

**Key words:** terrain marking, topography, geopositioning, mountain landscape, frequency reference, atomic source, particle filter, satellite geodesy.

**For citation:** Gurov M. G., Gurova E. G. Narrow beam atomic oven in vacuum device systems for reproducing ultra-stable frequency standard for surveying and geodetic positioning equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):245-257. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_245.

---

## Введение

Применение спутниковых систем позволяет точнее определять местоположение карьерной добывающей и транспортирующей техники [1, 2]. Использование данных систем позволяет составлять карты местности и перемещений тяжелой техники с заданной точностью [3–5] даже в реальном времени. Точное слежение дает положительный экономический результат за счет предупреждения

изменения дорожной колеи, предсказания поведения и перемещения самосвалов, грейдеров и т.д.

Процесс определения местоположения контрольной точки зависит не только от спутниковых систем, транслирующих свои орбитальные координаты, но и от устройств, размещаемых на наземных станциях с использованием ретрансляторов радиочастоты на подвижные системы для их контроля. Поскольку

определение расстояния до спутников описывается пространственно-временными функциями, то для расчета пространственных координат необходимо иметь источник частоты, позволяющий точно дискредитировать моменты измерения, и на их основе определять координаты контрольной точки. Различные аналогичные принципы реализованы в спутниковых навигационных системах. Основой для работы данной системы в различные периоды времени были водородные генераторы, миниатюрные устройства на основе резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) или, в перспективе, миниатюризированные генераторы частоты на основе запрещенных оптических переходов или оптические стандарты частоты (ОСЧ) [6, 7]. Возможности частотных реперов определяют детальность или степень дискретизации составляемых карт и маршрутов слежения путем повышения выходной частоты с одновременным повышением стабильности.

Современные атомные стандарты частоты, какими являются ОСЧ, активно подвергаются процессу миниатюризации и созданию транспортируемых ОСЧ. Они, как и стационарные, обеспечивают лучшую, чем у радиоволновых реперов, типа атомных фонтанов и водородных генераторов, погрешность [7–9].

Отправной точкой функционирования всех ОСЧ является источник атомов, хранящий в себе запас щелочноземельного металла с возможностью его возгонки по направлению в рабочую область. Для уменьшения габаритов, упрощения изготовления, отказа от использования дорогостоящих вакуумных электрических вводов, повышения надежности составляющих элементов, уменьшения стоимости, увеличения периодов непрерывной работы, стабильности количества атомов в ходе работы (интегрирования данных) было предложено

использовать специальный вакуумный источник направленных атомов (ИНА) с воздушным зазором.

На данный момент в мире существует несколько законченных коммерческих разработок источников атомов [10, 11]. Обладая достаточно хорошими угловой расходимостью (37–40 мрад) и потоком  $10^{13}$  [1/с·см<sup>2</sup>], данные источники атомных пучков являются достаточно сложными в технологии изготовления, сборке, заправке и обслуживании, доставке и, как следствие, не рекомендуются к применению в отечественных ОСЧ.

В ходе эксперимента предложена и реализована отечественная конструкция оптимального с точки зрения изготовления источника направленного пучка атомов для конструкции оптической вакуумной системы стронциевого ОСЧ, при общем уровне вакуума в вакуумной системе  $10^{-10}$ – $10^{-9}$  мбар [12, 13]. При этом обеспечивается достаточная ремонтпригодность и одновременно удовлетворительная тепловая изоляция нагреваемых элементов, с расположением нагреваемого микрорезервуара с рабочим веществом и коллимирующим устройством внутри зоны высокого вакуума. Это позволит осуществлять замену нагревателя с сохранением целостности вакуумной системы, повысит ремонтпригодность ОСЧ в целом, устранил необходимость полной разгерметизации вакуумной системы и предотвратит потери дорогостоящих заправок рабочих веществ. Путь выбранных конструктивных решений соответствует принципу универсальности в комбинации с принципом «матрешки», описанным в [14]. В качестве источника направленных атомных пучков предлагается схема с расположением нагревателя вне вакуумного объема с простой системой тепловой изоляции и расположением нагреваемого микрорезервуара с заправкой активного вещества и коллимирующим уст-

ройством внутри зоны высокого вакуума. При этом нагреваемая часть находится при температуре 410–500 °С для случая использования в эксперименте атомов стронция. Принятые меры позволили уменьшить часть бюджета неопределенности, касающегося теплового излучения от нагреваемой части до уровня менее  $10^{-18}$  без использования водяного охлаждения. Специфика конструкции и изготовление всех частей из нержавеющей стали позволяют использовать источник направленного пучка атомов и с другими щелочными и щелочноземельными металлами.

### Метод реализации конструкции источника

В процессе работы ОСЧ происходит образование потока испаряемого вещества путем нагрева в условиях высокого вакуума до температуры, при которой давление насыщенного пара вещества в несколько раз выше, чем давление остаточного пара.

При тепловой возгонке рабочего вещества, помещенного в микрорезервуар

внутри источника с определенной температурой (400–650 °С), давление паров атомов становится достаточным, чтобы преодолеть выходное коллимирующее устройство, т.е., по сути, атомы проходят фильтр, отделяющий атомы с нужной скоростью и направлением от всех остальных. Коллимирующее устройство представляет собой набор параллельно расположенных капилляров — металлических, керамических или кварцевых трубочек или отверстий диаметром 100–300 мкм и длиной 10–12 мм, проходя которые, пучок атомов приобретает направленность.

Наряду с коллимацией пучка одной из основных задач при конструировании источников атомов является улучшение тепловой изоляции внешней части, находящейся при комнатной температуре и нагреваемой до температур контейнера для возгонки или испарения активного вещества. В конструкции, показанной на рис. 1, а, металлический контейнер с атомами выполнен из нержавеющей стали в виде цилиндра с высотой 65 мм и диаметром 28 мм. Данный

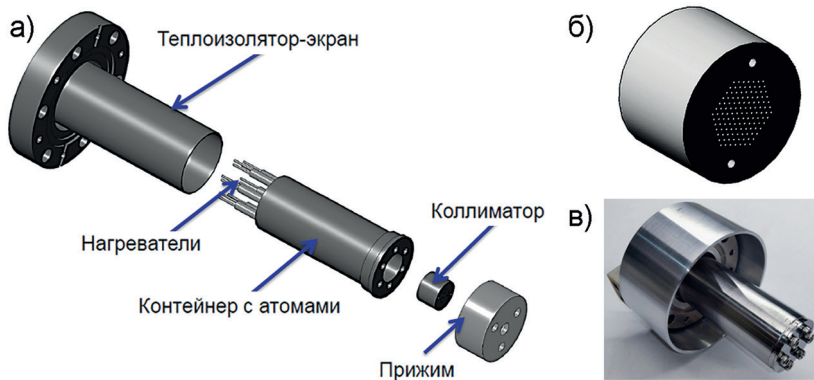


Рис. 1. Источник атомов с вневакуумными нагревателями и комбинированным теплоизолятором-экраном: сборочные единицы источника: фланец DN40CF, теплоизолятор-экран, контейнер с атомами, коллиматор-фильтр, прижим (а); внешний вид коллиматора-фильтра в увеличенном масштабе (б); внешний вид ИНА: детали соединены лазерной сваркой (вид со стороны вакуумной части), установлен коллиматор-фильтр с прижимом (в)

Fig. 1. Atomic source with non-vacuum heaters and combined heat screen-insulator: source assembly units: DN40CF flange, heat screen-insulator, container with atoms, collimator-filter, clamp (a); external view of the collimator-filter on an enlarged scale (b); external view of the atomic source: parts connected by laser welding (view from the vacuum part), collimator-filter with clamp installed (v)

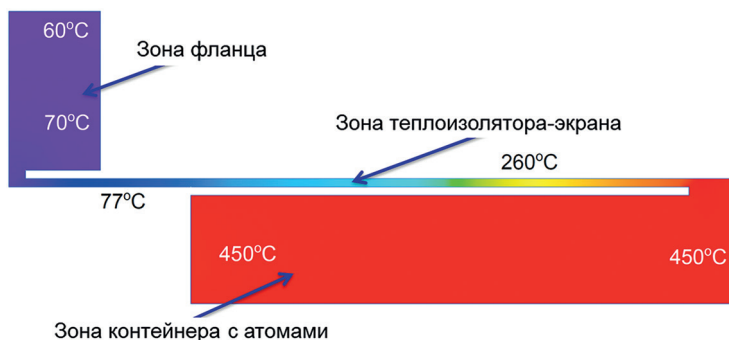


Рис. 2. Моделирование температурных полей в сечении источника атомов методом конечных элементов в стационарном режиме. Начальная температура контейнера с атомами 450 °С

Fig. 2. Modeling of temperature distribution in the cross-section of the atomic source by the finite element method in the steady state. The initial temperature of the container with atoms is 450 °С

элемент является границей-разделителем вакуумной части источника и части источника с элементами, которые расположены со стороны атмосферы — нагревателями, и внутренней стороны теплоизолятора-экрана. Со стороны вакуумной части расположены объем с металлическим стронцием и шайба с набором капилляров — коллиматор-фильтр (см. рис. 1, б). С обратной «атмосферной» стороны в специальных отверстиях располагаются керамические нагреватели со встроенными термопарами. Данные нагреватели осуществляют нагрев металлического цилиндра с атомами до температур 400 — 650 °С.

Для решения задачи тепловой изоляции контейнера с атомами от внешней конструкции была применена тонкостенная труба из нержавеющей стали диаметром 32 мм и длиной 75 мм с толщиной стенки 0,5 — 0,7 мм (см. рис. 1, а). С одной стороны данной трубы — теплоизолятора-экрана — в крайнем сечении при помощи вакуумной сварки присоединяется контейнер с атомами, другая сторона присоединяется к основному фланцу DN40CF с центральным отверстием для керамических нагревателей (см. рис. 1, в).

Вследствие низкой теплопроводности нержавеющей стали  $\sim 15$  Вт/(м·К)

градиент температуры на участке между местом крепления контейнера с атомами и креплением к фланцу DN40CF в первом приближении составил  $\sim 50^\circ/\text{см}$  (рис. 2). Электрические контакты нагревателей параллельно присоединяются к контактам блока питания. Рабочее потребление питания сборки нагревателей в стационарном режиме с установившейся температурой 410 °С составляет по напряжению 9,4 В и по току 2,5 А.

### Результаты физического исследования

Для определения параметров нового источника атомов была собрана экспериментальная вакуумная тестовая конструкция, состоящая из самого источника атомов, удлинительного патрубка и вакуумной шестилучевой крестовины со смотровыми окнами и выводом к вакуумному откачному посту. На рис. 3 представлено структурное изображение эксперимента по характеристике угловой расходимости источника атомов. Диаметр отверстия источника атомов, через которое происходило испускание потока, составлял 6 мм. Расстояние  $L$  до зоны, в которой происходил подсвет, составляло 33 см. Давление вакуумной части обеспечивалось вакуумным насосом со скоростью откачки турбомоле-

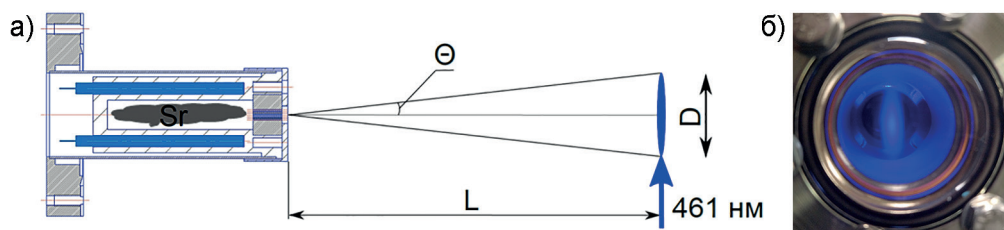


Рис. 3. Структурное изображение эксперимента: источник атомов показан в виде поперечного сечения с установленными нагревателями; угол расходимости в эксперименте определялся, как и в работе [10], по половине раствора угла направленного атомного пучка (а); внешний вид подсвеченного атомного пучка (б). Для оценки расходимости и потока атомов использовалось перпендикулярно направленное пучку линейно-поляризованное лазерное излучение, резонансное переходу  $5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^1P_1$ , с поправкой на эффект Доплера длиной волны 461 нм

Fig. 3. Sketch of the experiment: atomic source is shown as a cross-section with installed heaters; the divergence angle in the experiment was determined, as in [10], by half the angle of the directed atomic beam (a); appearance of the illuminated atomic beam (b). To estimate the divergence and the flow of atoms, linearly polarized laser radiation perpendicular to the beam was used, resonant to the  $5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^1P_1$  transition with the Doppler correction with the wavelength of 461 nm

кулярного насоса 40 л/с. При этом давление, создаваемое в системе, не превышало  $5 \cdot 10^{-6}$  мбар.

Электрические параметры, при которых осуществлялся эксперимент, показаны в табл. 1.

Пролетная зона атомного пучка в вакууме подсвечивалась коллимированным лазерным излучением перпендикулярно оси на расстоянии  $L$  (рис. 4, а). Картина флуоресценции, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с атомами со стороны перпендикулярной оси

пролета и подсвета, детектировалась камерой с программным обеспечением, позволяющим анализировать свойство и структуру кадра по заданной линии (рис. 4, б).

Из анализа полученных данных программного обеспечения видеокамеры была получена кривая распределения интенсивности флуоресценции подсвеченных атомов (см. рис. 4, б). Данную зависимость, в первом приближении, можно рассматривать как гауссову кривую. В качестве опорной точки/длины



Рис. 4. Способ получения данных о геометрической расходимости атомного пучка в зоне подсвета: изображение подсвеченных атомов стронция, полученное при помощи видеокамеры через вакуумное окно во фланце DN40CF (а); распределение интенсивности подсветки атомов резонансным излучением (б)

Fig. 4. Method of the data obtaining on the geometric divergence of an atomic beam in the vacuum illuminated zone: image of the illuminated strontium atoms obtained using a video camera through a vacuum window in DN40CF flange (a); distribution of the intensity of illumination of atoms by the resonance radiation (b)



Таблица 1

**Экспериментальные параметры стационарного режима для источника направленных атомов****Experimental parameters of the steady state mode of the atomic source**

Температура рабочего объема печи $T$ , °C (при комнатной температуре снаружи)	418
Температура внешней поверхности печи (края фланца) $T$ , °C	66,3
Давление при откачке вакуумным постом $P$ , мбар	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Напряжение нагревателя в установившемся режиме $U$ , В	9,5
Ток нагревателя в установившемся режиме $I$ , А	2,54
Итоговая потребляемая мощность $N_{рез}$ , Вт	24,1

для пропорционального нахождения коэффициента масштабирования выбиралось расстояние между бликами на поверхности фланца с окном. Реальный размер между бликами составил 3,5 см. Принимая во внимание указанный в работе [10] критерий определения ширины гауссова контура —  $1/e$ , можно легко найти, что реальная ширина контура, а следовательно, и ширина пучка составляет 2,1 см.

$$\Theta = \arctan\left(\frac{D}{2L}\right), \quad (1)$$

где  $D$  — размер луча атомов по уровню  $1/e$ , см;  $L$  — расстояние от источника атомов до зоны наблюдения, см;  $\Theta$  — половина полного угла расходимости луча атомов.

Используя формулу (1), получаем, что на расстоянии 33 см от края источника атомов угловая расходимость составляет величину  $1,82^\circ$  или 31 мрад.

Для оценки количества атомов в атомном пучке от ИНА проводилась элементарная спектроскопия перехода  $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^1P_1$  на длине волны 461 нм. Подсвет пучка проводился лазерным линейно-поляризованным пучком диаметром около  $\varphi = 0,5$  см и оптической мощностью 1 мВт в перпендикулярном направлении.

Поток атомов оценивался по сигналу флуоресценции специальным фотоприемником с собирающей линзой с фокусным расстоянием 50 мм. Полученная мощность в стационарном режиме фотоприемника составила  $P = 8$  мкВт. Исходя из положений, описанных в [10], оценка потока атомов в выходящем пучке проводилась по следующей формуле:

$$F = \rho v_{пучка} = \left[ \frac{1}{V_{взаим}} \cdot P \cdot \frac{\Omega_{дип}}{\Omega_{ф/п}} \cdot \left( \frac{\hbar \omega_0 \Gamma_S}{2\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-v_t / \sqrt{2}\sigma_t)^2}{1 + 4 \left( \frac{|k|v_t}{\Gamma} \right)^2} dv_t \right)^{-1} \right] \sqrt{\frac{3k_B T}{M}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность атомов в пучке;  $v_{пучка}$  — скорость атомного пучка;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $M$  — масса атома стронция;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $P$  — мощность сигнала флуоресценции от атомов;  $V_{взаим}$  — объем взаимодействия,  $V_{взаим} = \pi(\varphi/2)22r$ ;  $\Omega_{дип}$  — полный телесный угол излучения атомов в терминах дипольной диаграммы ( $\Omega_{дип} = 8\pi/3$ );  $\Omega_{ф/п}$  — телесный угол видимости фотоприемника,  $\Omega_{ф/п} = 2\pi(1 - \cos(\varphi/2r))$ ;  $\Gamma$  — скорость распада по переходу  $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^1P_1$  (для стронция  $\Gamma = 2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ );  $\omega_0$  — частота перехода.

В нашем эксперименте по определению параметров ИНА излучение собиралось специальной линзой с фокусным расстоянием 50 мм на фотоприемник. При температуре ИНА от 410 до 450 °С расчетное значение скорости атомов стронция находится в пределах 440–450 м/с. При этом поток атомов  $F \approx (0,8 - 1,2) \cdot 10^{13}$  [1/с·см<sup>2</sup>].

Также в процессе эксперимента было оценено влияние теплового излучения источника на характеристики атомных переходов. Погрешность оптических реперов имеет много составляющих, зависящих преимущественно от конструктивных особенностей установок и их стабильности. Использование тепловых источников вносит свой вклад в два наибольших сдвига часового резонанса оптических реперов — столкновительный сдвиг, связанный со стабильностью и равномерностью атомного пучка, выходящего из источника атомов, и тепловой сдвиг, возникающий от восприимчивости атомов [15], например стронция или иттербия, к воздействию теплового потока от нагретых поверхностей.

Согласно [16–18], сдвиг резонанса от части теплового излучения, которая соответствует влиянию нагретого источника атомов, может быть оценен в терминах телесного угла от всей окружающей поверхности,  $\Theta = 2\pi(1 - \cos(\alpha))$ , где  $\Theta$  — телесный угол;  $\alpha$  — линейный угол видимости телесного угла.

Конструкция источника атомов в установке по охлаждению и спектроскопии атомов стронция обращена к атомам прижимом коллиматора. Диаметр данного прижима 3 см. Расстояние от нагретого края источника атомов до центра камеры и облака атомов ~80 см. Таким образом, телесный угол, в котором виден нагретый источник из центра атомного облака, составляет 0,001 Ср.

Для стронция сдвиг часового перехода от действия теплового потока на ато-

мы около комнатной температуры имеет значение  $\Delta\nu = -2,27783$  Гц [16, 17]. Это значение при 300 °К представляет собой сумму двух частей: «статической» = -2,13023 Гц и «динамической» = -0,1476 Гц [16, 17]. Температурное изменение статической части пропорционально четвертой степени температуры, а изменение динамической части этого выражения пропорционально шестой степени температуры [18].

Поэтому долю теплового потока, а следовательно, и соответствующий ему сдвиг можно найти из выражения

$$\Delta\nu_{\text{тепл}}(T) = \frac{\Theta}{4\pi} \varepsilon \cdot$$

$$\left[ \Delta\nu_{\text{стат}} \left( \frac{T}{T_0} \right)^4 + \Delta\nu_{\text{дин}} \left( \frac{T}{T_0} \right)^6 + O \right] \quad (3)$$

где  $\Theta$  — это часть полного телесного угла, соответствующая источнику теплового излучения;  $T$  — текущая температура поверхности прижима в градусах Кельвина;  $T_0$  — комнатная температура 300 °К;  $\varepsilon$  — степень черноты источника теплового потока, в нашем случае — прижима из полированной нержавеющей стали с  $\varepsilon = 0,1$ .

При рабочей температуре в стационарном режиме и вычисленном телесном угле видимости источника атомов тепловой сдвиг, вносимый как составляющая погрешности, составляет величину  $\Delta\nu = 0,0008$  Гц, что в относительных единицах менее  $10^{-18}$ . Таким образом, тепловое влияние на атомы снижено до значений, не нарушающих параметры современных ОСЧ.

### Применение новых ОСЧ

Повышение точности систем глобального позиционирования связано не только с повышением количества спутников для улучшения геопозиционирования наземных приемников, но также и с повышением стабильности базовых



генераторов, таких как цезиевые, водородные или находящиеся на этапе тестирования оптические, устанавливаемых на них. При разработке и использовании современного маркшейдерского оборудования необходимо решать проблему взаимодействия данного оборудования с глобальными системами позиционирования, для того чтобы получать необходимые сведения и численные значения координат местоположения или нахождения изменения этих координат в результате техногенного воздействия горных разработок. В том числе для данных целей на наземных карьерных базовых станциях производят замену водородных генераторов, цезиевых и рубидиевых базовых генераторов на ОСЧ, имеющие более высокие параметры стабильности, точности и воспроизводимости. Отдельными базовыми станциями с приемником сигналов глобальных систем позиционирования оснащаются, например, открытые разработки, карьеры, в которых необходимо иметь единую (местную) систему координат для полного объемного профилирования поверхности карьера, а также определения местоположения карьерной техники.

При помощи базовых генераторов частот, размещаемых на спутниках глобальных систем позиционирования GPS, ГЛОНАСС, при точности  $10^{-16}$  обеспечивается погрешность определения положения и высоты на уровне нескольких десятков метров. Например, сигналы системы ГЛОНАСС обеспечивают определение горизонтальных координат с точностью 50–70 м, вертикальных координат — с точностью 70 м.

Для экспериментального тестирования использования компактизированного источника направленных атомов ОСЧ было выбрано АО «Разрез Тугнуйский» в Республике Бурятия, которое является крупнейшим на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также

входит в тройку лидеров России по добыче каменного угля и является одним из самых перспективных и динамично развивающихся в структуре АО «СУЭК».

Основной единицей для карьерной добычи угля до сих пор являются самосвалы, например, «БЕЛАЗ». В парке самосвалов на «Разрезе Тугнуйский» используются «БЕЛАЗ-7513R». Управление данной техникой при помощи водителя постепенно отходит на второй план. Это связано с необходимостью повышения производительности, точности позиционирования и устранения человеческого фактора, который может снизить эффективность добычи. Объектом использования ОСЧ с компактизированным источником направленных атомов является система автоматического позиционирования самосвалов. Необходимость точного позиционирования для единиц техники важна, например, при таких операциях, как работа под ковшом экскаватора для загрузки, передвижение по узкой дороге с возможностью разъезда со встречной тяжелой техникой, разгрузка в определенной точке.

Определение позиционирования на данный момент обеспечивается таким оборудованием, как лидары Quaenergy, LeddarTech, георадары CHCNAV/ГЕО-СУППОРТ и т.д. Но данные устройства выполнены в виде отдельного модуля, который в лучшем случае имеет апертуры сканирования 250–270°, а одиночный пиксель сканирования на расстоянии 1 км имеет характерные размеры 0,5×0,5 м. Наличие ситуационных затемнений лидарных и радарных снимков также не позволяет в полной мере контролировать ситуацию с движением техники.

Полученная картина профиля карьера с техникой анализируется при помощи специального программного обеспечения, в котором и происходит распозна-

Таблица 2

**Сравнительные параметры определения точности в различных ситуациях**  
**Comparative parameters for determining accuracy in different situations**

Тип операции \ Точность определения	Лидар, см	Система с ОСЧ и источником атомов, см	По непосредственному измерению, см
Загрузка	50	20	10
Разъезд	70*	50	30
Разгрузка	50	20	10

Примечание: \* — зависит от ориентации плоскости разъезда относительно положения лидара.

вание параметров отснятой картины. Если приемлемая точность позиционирования при погрузке — разгрузке самосвала составляет 10–20 см, то при разъезде с техникой автоматизированный самосвал должен иметь точность определения своего местоположения 5–10 см. Причем производить измерения необходимо в реальном масштабе времени. Данная операция возможна только при применении, например, систем спутникового позиционирования, а точность и контроль в реальном масштабе времени может достигаться только при применении ОСЧ в составе приемников. Задача определения местоположения решается в вычислительном устройстве приемника, размещенного на транспортном средстве с использованием сигналов спутниковых систем и системы перевода оптической частоты ОСЧ в радиодиапазон с соответствующим перенесением стабильности. Координаты определяются при помощи измерения расстояния до каждого из группы спутников, состоящей из четырех аппаратов. Расстояние между фазовыми центрами данных аппаратов и приемника прямо пропорционально времени распространения радиосигнала от космического аппарата до приемника с учетом применения кодированных сигналов компенсации временных задержек. Таким образом, определение координат фазового центра приемника зависит от точности хода часов, размещенных и на

спутниковых аппаратах, и в приемнике. В основе измерений и вычисления координат местоположения используется метод наименьших квадратов. Координаты, полученные таким образом, передаются на базовую станцию для оценки положений, скоростного режима и синхронизации действий. А для оценки временной задержки используется псевдослучайный код, который генерируется и с космического аппарата, и в приемнике. В эксперименте проводилось сравнение точности определения местоположения карьерного самосвала посредством лидара и через спутниковую систему с контролем по непосредственному измерению расстояния геодезической рулеткой (табл. 2).

При использовании метода пространственной дальнометрии возможны ошибки измерений, возникающие из-за таких явлений, как непостоянство скорости света (коэффициента пропорциональности для измерения временных задержек), которая изменяется при прохождении различных слоев атмосферы, интерференции сигналов, излученных аппаратами, погодных условий. На данный момент на космических аппаратах размещаются источники с генераторами на основе радиочастотных реперов различных типов. К особенностям данных радиочастотных реперов можно отнести их относительно слабую воспроизводимость и возникающие в процессе работы дрейфы частоты, в том числе и

непредсказуемые, которые могут также привести к возникновению ошибки в частоте излученного сигнала и, следовательно, к ошибке измерения дальности.

В ОСЧ воспроизводимость частоты гораздо лучше единиц  $10^{-18}$ , а дрейф частоты отсутствует из-за использования оптического перехода, который не подвержен влиянию эффекта старения и затягивания. Анализ данных, полученных при проведении эксперимента, показал, что при использовании модернизированных оптических часов на основе изотопа стронция-87 с компактизированным источником направленных атомов при уровне неопределенности нескольких единиц  $10^{-18}$  точность определения положения  $\sim 10 - 20$  см.

Полученные результаты показали перспективность и применимость ОСЧ с компактизированным источником направленных атомов в составе приемников геопозиционирования карьерной техники.

### Заключение

В рамках научного исследования разработан и реализован компактизированный источник направленных атомов ОСЧ, позволяющий уменьшить массогабаритные характеристики источников

частоты ОСЧ. С перспективой дальнейшей компактизации, миниатюризации и использования при геопозиционировании в горном деле при горно-ландшафтной разметке и на горных и карьерных выработках, для повышения точности составления карт и координат положения устройств и техники, приведены принципы функционирования оптического репера частоты на примере стронциевых оптических стандартов частоты нового поколения.

1. Обоснованы предпосылки модернизации источников атомов ОСЧ на основе атомных переходов для использования в горно-ландшафтной разметке и наблюдения в режиме реального времени за положением карьерной техники.

2. Описана модернизация конструкции ИНА для уменьшения массогабаритных характеристик источников частоты для передатчиков и приемников систем геопозиционирования.

3. Получены положительные результаты после анализа сравнительных характеристик отечественного ИНА с характеристиками импортных аналогов.

4. По тематике исследований получен патент на изобретение РФ № 2811394 (07.11.2023).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondaescu R., Schärer A., Lundgren A., Hetényi G., Houlié N., Jetzer P., Bondaescu M.* Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion // *Geophysical Journal International*. 2015, vol. 202, pp. 1770 – 1774. DOI: 10.1093/gji/ggv246.

2. *Thompson A., Moran J., Swenson G.* Interferometry and synthesis in radio astronomy. Springer, Cham. 2017, 872 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.

3. *Xiaoxing H., Montillet J. P., Fernandes R., Bos M. S.* Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources // *Journal of Geodynamics*. 2017, vol. 106, pp. 12 – 29. DOI: 10.1016/j.jog.2017.01.004.

4. *Fujieda M., Piester D., Gotoh T., Becker J., Aida M., Bauch A.* Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline // *Metrologia*. 2014, vol. 51, no. 3, pp. 253 – 262. DOI: 10.1088/0026-1394/51/3/253.

5. *Корнилов С. В., Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Смирнов А. Ю.* Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала // *Горная промышленность*. – 2022. – № 1S. – С. 127 – 133. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133.

6. *Tanaka Y., Katori H.* Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone // *Journal of Geodesy*. 2021, vol. 95, article 93. DOI: 10.1007/s00190-021-01548-y.

7. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., Katori H. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // *Nature Photonics*. 2020, vol. 14, pp. 411 – 415. DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8.

8. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., Schäffer S. A., Beloy K., Nicolodi D., Brown R. C., Hinkley N., Milani G., Schioppo M., Yoon T. H., Ludlow A. D. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level // *Nature*. 2018, vol. 564, pp. 87 – 90. DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2.

9. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P. Observation and cancellation of a perturbing dc stark shift in strontium optical lattice clocks // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2012, vol. 59, no. 3, pp. 411 – 415. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2209.

10. Schioppo M., Poli N., Prevedelli M., Falke St., Lisdat Ch., Sterr U., Tino M. A compact and efficient strontium oven for laser-cooling experiments // *Review of Scientific Instruments*. 2012, vol. 83, article 103101. DOI: 10.1063/1.4756936.

11. Vishwakarma Ch., Mangaonkar J., Patel K., Verma G., Sarkar S., Rapol U. D. A simple atomic beam oven with a metal thermal break // *Review of Scientific Instruments*. 2019, vol. 90, article 053106. DOI: 10.1063/1.5067306.

12. Гуров М. Г. Патент РФ № 2811394, 07.11.2023. Источник атомов. 2023. Бюл. № 2.

13. Попов А. Ю., Прокофьев В. А. Повышение точности обработки глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом // *Омский научный вестник*. – 2023. – № 1(185). – С. 5 – 9. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9.

14. Альтшуллер Г. С. Поиск идеи: Введение в ТРИЗ – Теория решения изобретательских задач. – М.: Альпина Паблишер, 2008. – 409 с.

15. Гуров М. Г., Гурова Е. Г., Дмитриев А. К. Влияние тепловых полей на сдвиг оптических стандартов частоты // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57. – С. 83 – 88.

16. Safronova M. S., Porsev S. G., Safronova U. I., Kozlov M. G., Clark C. W. Blackbody-radiation shift in the Sr optical atomic clock // *Physical Review A*. 2013, vol. 87, article 012509. DOI: 10.1103/PhysRevA.87.012509.

17. Porsev S. G., Safronova M. S., Safronova U. I., Kozlov M. G. Multipolar polarizabilities and hyperpolarizabilities in the sr optical lattice clock // *Physical Review Letters*. 2018, vol. 120, article 063204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.063204.

18. Middelmann Th., Falke St., Lisdat Ch., Sterr U. High accuracy correction of blackbody radiation shift in an optical lattice clock // *Physical Review Letters*. 2012, vol. 109, article 263004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.263004.

19. Lisdat C., Grosche G., Quintin N., et al. A clock network for geodesy and fundamental science // *Nature Communications*. 2016, vol. 7, pp. 1 – 7. DOI: 10.1038/ncomms12443. **PLoS**

## REFERENCES

1. Bondarescu R., Schäfer A., Lundgren A., Hetényi G., Houlié N., Jetzer P., Bondarescu M. Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion. *Geophysical Journal International*. 2015, vol. 202, pp. 1770 – 1774. DOI: 10.1093/gji/ggv246.

2. Thompson A., Moran J., Swenson G. *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. Springer, Cham. 2017, 872 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.

3. Xiaoxing H., Montillet J. P., Fernandes R., Bos M. S. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. 2017, vol. 106, pp. 12 – 29. DOI: 10.1016/j.jog.2017.01.004.

4. Fujieda M., Piester D., Gotoh T., Becker J., Aida M., Bauch A. Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline. *Metrologia*. 2014, vol. 51, no. 3, pp. 253 – 262. DOI: 10.1088/0026-1394/51/3/253.

5. Kornilkov S. V., Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Smirnov A. Yu. Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining areas of the Middle Urals. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 1S, pp. 127 – 133. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-127-133.

6. Tanaka Y., Katori H. Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone. *Journal of Geodesy*. 2021, vol. 95, article 93. DOI: 10.1007/s00190-021-01548-y.

7. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., Katori H. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nature Photonics*. 2020, vol. 14, pp. 411 – 415. DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8.

8. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., Schäffer S. A., Beloy K., Nicolodi D., Brown R. C., Hinkley N., Milani G., Schioppo M., Yoon T. H., Ludlow A. D. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. *Nature*. 2018, vol. 564, pp. 87 – 90. DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2.
9. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P. Observation and cancellation of a perturbing dc Stark shift in strontium optical lattice clocks. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2012, vol. 59, no. 3, pp. 411 – 415. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2209.
10. Schioppo M., Poli N., Prevedelli M., Falke St., Lisdat Ch., Sterr U., Tino M. A compact and efficient strontium oven for laser-cooling experiments. *Review of Scientific Instruments*. 2012, vol. 83, article 103101. DOI: 10.1063/1.4756936.
11. Vishwakarma Ch., Mangaonkar J., Patel K., Verma G., Sarkar S., Rapol U. D. A simple atomic beam oven with a metal thermal break. *Review of Scientific Instruments*. 2019, vol. 90, article 053106. DOI: 10.1063/1.5067306.
12. Gurov M. G. *Patent RU 2811394*, 07.11.2023. [In Russ].
13. Popov A. Yu., Prokofiev V. A. Improving the accuracy of machining deep holes by electrical erosion machining with a rotating tubular electrode. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023, no. 1(185), pp. 5 – 9. [In Russ]. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9.
14. Altshuller G. S. *Poisk idei: Vvedenie v TRIZ – Teoriya resheniya izobretatel'skikh zadach* [Find an idea: Introduction to TRIZ – the theory of solving inventive problems], Moscow, Alpina Publisher, 2008, 409 p.
15. Gurov M. G., Gurova E. G., Dmitriev A. K. The thermal fields impact on the shift of optical frequency standards. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2014. T. 57. C. 83 – 88. [In Russ].
16. Safronova M. S., Porsev S. G., Safronova U. I., Kozlov M. G., Clark C. W. Blackbody-radiation shift in the Sr optical atomic clock. *Physical Review A*. 2013, vol. 87, article 012509. DOI: 10.1103/PhysRevA.87.012509.
17. Porsev S. G., Safronova M. S., Safronova U. I., Kozlov M. G. Multipolar polarizabilities and hyperpolarizabilities in the sr optical lattice clock. *Physical Review Letters*. 2018, vol. 120, article 063204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.063204.
18. Middelmann Th., Falke St., Lisdat Ch., Sterr U. High accuracy correction of blackbody radiation shift in an optical lattice clock. *Physical Review Letters*. 2012, vol. 109, article 263004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.263004.
19. Lisdat C., Grosche G., Quintin N., et al. A clock network for geodesy and fundamental science. *Nature Communications*. 2016, vol. 7, pp. 1 – 7. DOI: 10.1038/ncomms12443.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гуров Михаил Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, e-mail: goorovmg@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4958-1304,  
 Гурова Елена Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: lena319@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5254-4796.  
**Для контактов:** Гуров М.Г., e-mail: goorovmg@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.G. Gurov, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Senior Researcher, Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, 141570, Russia, e-mail: goorovmg@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4958-1304,  
 E.G. Gurova, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia, e-mail: lena319@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5254-4796.  
**Corresponding author:** M.G. Gurov, e-mail: goorovmg@mail.ru.

Получена редакцией 14.06.2024; получена после рецензии 31.10.2024; принята к печати 10.11.2024.  
 Received by the editors 14.06.2024; received after the review 31.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.