

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ РЕПЕРОВ В МАРКШЕЙДЕРСКОМ ДЕЛЕ

М. Г. Гуров¹, Е. Г. Гурова²

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Московская обл., Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассмотрены особенности устройства реперов, используемых в маркшейдерских приборах, которые применяются для измерений на поверхности и в недрах Земли при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительстве горных предприятий с частотой оптического диапазона для случая измерения гравитационного потенциала и использования технологии лазерного трехмерного сканирования в маркшейдерии. Представлены основные принципы функционирования оптического репера 87Sr. Рассмотрены основные рабочие уровни первичного и вторичного охлаждения атомов, с применением спектроскопии без эффекта Доплера. Это позволило создать устройство, чувствительное к изменению высоты над уровнем моря, а при неизменности высоты – чувствительное к изменению гравитационного потенциала: гравиметра. Приведена разработанная диаграмма последовательности сигналов управления оптическим репером. Представлены различные типы возмущений детектирующего сигнала данного устройства, которые необходимо уменьшать для стабилизации работы устройства – сдвиг рабочей частоты оптической решетки, влияние теплового потока от частей вакуумной камеры на атомные переходы рабочего вещества. Также указано влияние гравитационного воздействия на полезный сигнал устройства. Сформулированы способы их обхода и устранения. Перечислены возможности использования оптического репера как инструмента для построения гравитационной карты земной поверхности или нахождения аномалий земной коры по изменению ускорения свободного падения, что также может привести к использованию технологии лазерного трехмерного сканирования для объемных измерений. Выполнены оценки погрешности измерения высоты при помощи оптического репера частоты в зависимости от изменения полезного сигнала оптического репера частоты, что позволяет производить точные топологические замеры в маркшейдерии при измерениях на поверхности и в недрах Земли при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительстве горных предприятий.

Ключевые слова: маркшейдерия, горные выработки, топология, горный ландшафт, оптический репер, лазерное охлаждение, тепловой сдвиг, гравитационный сдвиг, гравиметр.

Для цитирования: Гуров М. Г., Гурова Е. Г. Эффективное применение оптических реперов в маркшейдерском деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 87–101. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_87.

Efficient application of optical references in surveying

M. G. Gurov¹, E. G. Gurova²

¹ FSUE «Russian metrological Institute of Technical Physics and Radio engineering»,
Mendeleevo, Moscow reg., Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The article discusses the features of the reference device used in mine surveying, mountain-landscape marking and mine workings with the frequency of the optical range for the case of measuring the gravitational potential. The basic principles of operation of the optical reference 87Sr are presented. The main working levels of primary and secondary cooling of atoms are considered, by means of which spectroscopy without the Doppler effect is possible, leading to the creation of a device sensitive to changes in altitude above sea level, and with a constant height sensitive to changes in the gravitational potential – a gravimeter. The developed diagram of the sequence of control signals of the optical reference – for detecting and binding the custodian to the clock transition of the working substance is presented. A number of types of perturbations of the detecting signal of this device, which must be reduced and stabilized to ensure operation as a gravimeter: the shift of the operating optical frequency from the influence of the intensity of the optical grating, the effect of heat flow from parts of the vacuum chamber on the atomic transitions of the working substance, the effect of gravitational influence on the useful device signal. Formed ways to bypass and eliminate them. The possibilities of using an optical reference as a tool for constructing a gravitational map of the earth's surface, or finding anomalies of the earth's crust by changing the acceleration of free fall, which can also lead to the development of methods for finding minerals, are presented. Estimates are made of the height measurement error using an optical frequency reference from a change in the useful signal of the optical frequency reference, which makes it possible to make accurate topological measurements in mine surveying when measuring on the surface and in the bowels of the Earth during the exploration and exploitation of mineral deposits and the construction of mining enterprises.

Key words: optical clocks, laser cooling, thermal shift, gravity shift, gravimeter.

Forcitation: Gurov M. G., Gurova E. G. Efficient application of optical references in surveying. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):87–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_87.

1. Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений научно-технического развития являются технологии освоения горных месторождений полезных ископаемых, исследования и диагностики геологической среды [1,2]. Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция развития данных направлений влечет за собой разработку систем и устройств, повышающих точность проектирования и мониторинга земной поверхности, создания и ведения кадастровых планов месторождений и добычи полезных ископаемых.

Лазерные сканеры, или лидары, недавно появились в практике маркшейдерии. Их применение во многом схоже с использованием в топографо-геодезических работах, но есть и отличия. По видам сканеры подразделяются на воздушные, наземные и подзем-

ные. Воздушные сканеры предназначены для съемки больших площадных и линейных объектов. В горном деле под такие объекты попадают новые площади проектируемых горных предприятий, существующие карьеры и разрезы, нефте- и газопроводы, дороги и ЛЭП. Ранее работы по картированию таких объектов производились методами аэрофотосъемки, альтернативы которой долгое время не существовало. Лазерная локация имеет ряд неоспоримых преимуществ перед АФС. Сам технологический цикл полевых работ прост. Снимаемые точки после короткого цикла обработки сразу получают координаты в заданной пользователем системе. Оценка качества полевых работ – полнота облаков точек лазерного отражения и ортофотомозаики, производится в тот же полетный день, что намного уменьшает процент брака.

Лазерная локация приводит к многократному уменьшению наземных подготовительных работ, исключающих создание опознаков.

Потенциально достижимая точность в системах определения координат топологических замеров при горноландшафтной разметке и на горных выработках формируется точностью воспроизведения размера единицы времени, так как расстояния до источников и до земной поверхности определяются за время распространения сигналов до измеряемых объектов [3]. Данный факт приводит к необходимости повышения точности формирования различных шкал времени. Стабильная работа первичных эталонов и их метрологические характеристики оказывают влияние на формирование шкалы времени и передачу ее потребителям. Поэтому разработка и совершенствование первичных (специальных) эталонов единиц величин является одной из приоритетных задач в области измерений времени в геологических системах, устройств проектирования земной поверхности [4] и разработки перспективных методов изысканий в горном деле [5, 6].

Наиболее распространенными являются атомные стандарты частоты в ультравысоком и сверхвысоком диапазонах частот. Одними из самых точных стандартов частоты данного диапазона являются оптические стандарты частоты, которые в настоящее время демонстрируют метрологические характеристики, превосходящие стандарты частоты СВЧ-диапазона в несколько раз [7]. На его основе представлены оптические реперы на холодных атомах, состоящие из формирователя оптической частоты оптического спектроскопа [8,9]. Конструктивно оптический спектроскоп состоит из вакуумной камеры, в которой производится охлаждение

Это обеспечивает изоляцию атомов стронция в оптическую решетку лазерных систем первичного и вторичного охлаждения, системы стабилизации оптической решетки, а также системы криогенного охлаждения внутренней камеры, изолирующей атомы от внешних тепловых потоков.

Формирователь оптической частоты состоит из высокостабильной лазерной системы, основанной на внешнем резонаторе из стекла со сверхнизким тепловым расширением (СНР), охваченном высокочастотной системой обратной связи с частотно-модулированными боковыми полосами или системой Паунда–Древера–Холла (ПДХ), функционирует на близкой к часовому переходу частоте и способен удерживать ее определенное время.

Излучение от формирователя до оптического спектроскопа на холодных атомах обеспечивается при помощи оптического волокна с системой фазовой компенсации шумов. С использованием данного излучения производится спектроскопия часового перехода, а фемтосекундным синтезатором оптических частот осуществляется перенос единицы времени и частоты из оптического в микроволновый диапазон.

Выделение природной линии сверхузкополосного перехода, относительно которого корректируется рабочая частота оптического хранителя, происходит в корректоре оптической частоты. Рабочими веществами могут выступать пары изотопов различных редкоземельных металлов – Yb, Tm [9], щелочноземельных металлов, например Sr [10, 11], металлов Al [12], Hg [13]. Наибольшую популярность и проработанность, как с теоретической точки зрения, так и с практической, в мире имеет фермионный изотоп стронция-87. В его энергетической структуре существует интеркомбинационный переход $^1S_0-^3P_0$,

частота которого равна 429 228 004 229 873.0 Гц / 698 445 709.612 754 4 фм [14]. Данный переход, называемый также «часовым», имеет очень узкую ширину линии ~ 1 мГц. В обычных условиях атом всегда подвержен влияниям со стороны внешних излучений, магнитных полей и гравитации, которые возмущают истинное положение часового перехода; необходим комплекс мер по снижению влияния этих возмущений или их обходу, а также формальному нахождению нижней границы репера, так называемой неисключенной систематической погрешности (НСП).

2. Особенности формирования детектирующего сигнала оптического репера

При лазерном сканировании требуется наличие ограниченного количества базовых GPS-ГЛОНАСС станций. Для обеспечения координатами лазерно-локационных данных используется метод прямого геопозиционирования, который обеспечивает входящий в состав лидара навигационный блок. Скорость картографических работ с использованием данного метода в целом в 5–10 раз выше, чем при традиционных технологиях. Точность лазерного сканирования, неоднократно проверенная на практике, соответствует требованиям Инструкции по производству маркшейдерских работ. Для ее достижения необходимо четкое исполнение полевой бригадой нормативных требований аэросъемочных работ, калибровочных процедур, которые подробно расписаны в соответствующих руководствах.

Производительность лазерного сканирования очень высока. Реальными являются объемы съемки в 500 км за один день для линейных объектов и до 1000 км² для площадных объектов. По точности различают: приборы

высокоточные (средняя квадратическая ошибка измерения углов $0,5 \div 1$ »), точные — $2 \div 5$ » и технические — $15 \div 60$ ». Современные лазерные сканеры Сугах 2500, Callidus, Stonex X300 — это компактные лазерные сканеры, широко используемые в маркшейдерском деле. Диапазон измерений 1,6–300 м, относятся к точным приборам и являются оптимальным техническим решением для маркшейдерии. Принципиальным отличием лазерной локации является возможность работы в ночное время. Уникальная особенность этой технологии — возможность снимать зашумленную объектами территорию с получением при этом цифровой модели рельефа и территорию со слабовыраженным рельефом и отсутствием маркирующей ситуации.

Для эффективной работы реперов, используемых в горных выработках, ландшафтных измерениях и гравитационных исследованиях в качестве измерительных приборов, были разработаны принципиально новые оптические реперы, применяемые в горном деле, с высокой степенью точности, разработки запатентованы — патенты на изобретения РФ [15, 16]. Одним из ключевых элементов, в отличие от прибора Stonex X300, является вакуумная система спектроскопа, которая содержит три основных составляющих: источник атомов — нагреватель, зону замедления и зону детектирования и захвата. Стронций находится в зоне детектирования репера в парообразном состоянии. Данное состояние получается возгонкой металлического стронция в вакууме, при температуре 400–450 °С и выше. Конструкция нагревателя обеспечивает направленность потока атомов. Нагреватель имеет сопло, состоящее из тонких трубочек диаметром 150–200 мкм и длиной от 5 до 10 мм. Данная конструкция обеспе-

чивает достаточную степень коллимации атомного пучка для достижения центра зоны детектирования.

Имея при данной температуре скорость потока 450–500 м/с, атомы не захвачены в магнитооптическую ловушку. Поэтому между источником атомов и зоной захвата атомов для дальнейших стадий охлаждения помещается устройство, уменьшающее линейную скорость атомов до значений 40–50 м/с — Зеemanовский замедлитель [15,16]. Зеemanовский замедлитель может использоваться для основных цифровых маркшейдерских приборов — нивелира, теодолита и тахеометра, а также и для лазерных сканеров Сурах 2500, Callidus, Stonex X300. Это необходимо для повышения точности выполнения всех маркшейдерских работ, основой которых является измерение углов и расстояний.

Минимальная температура, достигаемая при охлаждении, ограничивается доплеровским пределом охлаждения атомов. Эта температура жестко связана с шириной линии перехода и определяется по (1):

$$T_{\text{мин.д}} = \frac{h \cdot \gamma}{2k_B}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; γ , Гц — однородная ширина линии перехода или поглощения атома; k_B — постоянная Больцмана). Так, при ширине 32 МГц на охлаждающем переходе $^1S_0 - ^1P_1$ в ^{87}Sr предельное значение $T_{\text{мин.д}} < (730-00)$ мК. При использовании более узкополосного перехода вторичного охлаждения $^1S_0 - ^3P_1$ шириной 7,6 кГц $T_{\text{мин.д}} \approx 180-200$ нК.

Основным методом обеспечения высокого уровня соотношения сигнал-шум в атомных часах является увеличение числа атомов в магнито-оптической ловушке (МОЛ). Этот эффект широко используется для измерения

длин линий в лазерных тахеометрах, в которых стандартно используется невидимый инфракрасный лазерный луч, который выходит из объектива зрительной трубы. Дальность измерения длины зависит от используемого отражателя, которым может служить как стеклянная призма, так и специальная пластиковая отражающая пластина или пленка. В маркшейдерских приборах, как правило, дальность измерения в инфракрасном диапазоне не превышает 3500 метров для стеклянных призм и 250 метров для пластикового отражателя (тахеометры серии Trimble 3600DR и Trimble 5600, лазерные (лазерно-цифровые) и моторизованные теодолиты Sokkia TM1A, Торосоп серии DT-100, состоящей из трех моделей — DT-101, DT-102 и DT-103, теодолиты DET-20/10 и DET-20).

При лазерном захвате и охлаждении на циклическом переходе с утечками атомы могут попадать в темные состояния и выпадать из процесса охлаждения (например, через уровень 1D_2 в состоянии 3P_2), вызывая потери сигнальных атомов в МОЛ. Для возвращения атомов из метастабильных состояний 3P_0 и 3P_2 в 1S_0 используются лазеры перекачки (repumpers) с длинами волн 679 нм и 707 нм. Через уровень 3S_1 атомы перекачиваются на уровень с относительно малым временем жизни 3P_1 и далее снова переходят в состояние 1S_0 .

После этапа первичного охлаждения — получения МОЛ температура атомов имеет существенно более высокое значение порядка 10 мК, чем необходимо для захвата их оптической решеткой и спектроскопии без эффекта Доплера. Для снижения температуры атомов переходят к следующему этапу — вторичного охлаждения, работающего на переходе $^1S_0 - ^3P_1$ (689 нм).

Резкий переход от температур первичной МОЛ к узкополосной вторичной МОЛ с предельными температурами, достаточными для захвата атомов в оптическую решетку, может привести к уменьшению коэффициента перезагрузки, поэтому этап узкополосной вторичной МОЛ разбивают на два: широкополосное и узкополосное охлаждение.

Атомы, обладающие температурным параметром ниже глубины оптической решетки, имеют температуру несколько единиц нК, т. е. находятся в условиях, когда возможна спектроскопия без влияния эффекта Допплера, захватываются в ней и последовательностью «часового» ($^1S_0 - ^3P_0$, длина волны перехода — 698 нм) импульса хранителя производится сканирование соответствия частоты хранителя часовому переходу. Отстроенным по частоте лучом детектирующего лазера и триггерированной сверхвысокочувствительной видеокамеры и электронно-оптического преобразователя производится сканирование основного состояния N_1 . Импульсом лазера перекачки атомы, попавшие на часовой уровень 3P_0 , переводятся в основное состояние и детектируются пробным лучом — N_2 . После данных двух импульсов третьим импульсом производится считывание фонового сигнала N_B для устранения постоянной паразитной фоновой составляющей. Вероятность попадания в частоту часового перехода определяется из выражения (2):

$$P = \frac{N_2 - N_B}{N_1 + N_2 - 2N_B}. \quad (2)$$

Это выражение описывает работу для основных цифровых маркшейдерских приборов — нивелира, теодолита и тахеометра, для повышения их точности, там, где конструктивно представлен источник лазерного излу-

чения, соединенный с двигателем. Вращением лазерного луча задается лазерная плоскость — горизонтальная или вертикальная, если прибор имеет возможность вертикальной установки. Фиксирование плоскости осуществляется или визуально (на стене, потолке и т.д.), или с помощью датчика лазерного излучения (в зависимости от модели и производителя датчик крепится на рейку, на вешку или на дорожную технику). Использование датчика позволяет более точно, чем визуально, зафиксировать лазерную плоскость в случае ее плохой видимости. К примеру, для горизонтирования лазерного нивелира используются жидкостные или светодиодные уровни. Многие модели имеют компенсатор для самостановки инструмента в горизонтальную плоскость.

3. Факторы, влияющие на функционирование оптических реперов, и результаты устранения влияния данных факторов на точность оптических реперов для повышения точности топологических замеров при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительстве горных предприятий

На сегодняшний день в ряде мировых лабораторий создаются оптические реперы на основе ^{87}Sr [17,18], ^{171}Yb [9], имеющие неопределенность лучше 10^{-16} и НСП лучше $6,9 \cdot 10^{-17}$, наряду с этим в рамках научных исследований данной работы проводится разработка оптических реперов на изотопе ^{87}Sr нового поколения с заявленной неопределенностью до 10^{-17} и соответствующей НСП. Эта технология на сегодняшний день уже нашла отражение в использовании наземных лазерных сканеров, она позволяет не только максимально повысить производительность труда при маркшейдерских съемках, но и получать дан-

ные о пространственном положении объектов в виде трехмерной компьютерной модели практически без промежуточной стадии обработки измеренных величин. Современные лазерные сканеры (Сугах 2500, Callidus, Stonex X300) обладают высокой точностью позиционирования объектов съемки (до 6 мм) при значительном радиусе действия (до 500 м). Электропитание сканера осуществляется либо от сети переменного тока, либо от двух заряжаемых батарей напряжением 12 В (время работы до 8 часов). Вес прибора составляет около 20 кг. Также эта технология используется в приборах вертикального проектирования, областью применения которых являются вертикальные горные выработки и высотные инженерные сооружения (например, надшахтное здание с копром). Одним из лучших в своем классе оптических приборов вертикального проектирования является FG-L100 (известный под торговой маркой PZL100) производства фирмы FPM Holding GmbH (Германия).

Широкое применение перечисленных видов маркшейдерских приборов привело к практическому исчезновению с рынка стационарных дальнометрических приставок, работающих в комплекте с теодолитами. В то же время развитие безотражательных способов измерений привело к возникновению ручных лазерных рулеток, позволяющих в одиночку измерять расстояния между объектами, используя видимый лазерный луч. Лидерами в этой области следует признать компании Leica и Bosch.

В разрабатываемых оптических реперах предложены меры по устранению недостатков предыдущих версий модификаций оптических реперов, таких как: формирование энергетической огибающей оптической решетки путем введения узкополосных интер-

ференционных фильтров, введение элементов фазовой компенсации длинных линий передачи излучения между лазерными системами и доставки опорного излучения до систем хранения времени и частоты. Переработана конструкция вакуумного спектроסקопа — добавлена внутренняя камера [17], охлаждаемая до криогенных температур для исключения влияния теплового излучения, действующего на атомы.

3.1. Сдвиг, обусловленный влиянием оптической решетки

Атомы, претерпев несколько стадий охлаждения, захватываются периодическим набором потенциальных ям, окончательно устраняя доплеровский сдвиг до необходимого для сканирования «часового» резонанса предела. Данный набор потенциалов создается в оптическом резонаторе, размещаемом снаружи в плоскости вакуумной камеры, в которой создается стоячая волна. Захваченные в такую решетку ям атомы имеют температуру менее 1–10 мкК. Действие поля волны порождает еще один тип нарушения положения часового резонанса — Штарковский сдвиг. Рассмотренное в [19] поведение данного сдвига монотонно, но не одинаково для основного 1S_0 и возбужденного 3P_0 уровней часового перехода атома стронция. В результате исследований определено, что длины волн, при которых данные сдвиги совпадают, лежат в области 813 нм и 461 нм. Наиболее оптимальной для удержания или стабилизации разницы уровней является зона, где зависимости сдвигов наиболее пологи, таковой является длина волны 813 нм. Используя эту длину рабочей волны для лазерных сканеров Сугах 2500, Callidus, Stonex X300, можно повысить их точность измерений в 2 раза.

Проведенные исследования показали, что при использовании массивов

данных об интенсивностях, полученных со спектроанализатора, и величин поляризуемостей из [3], возможно с заданной точностью вычислить в диапазоне длин волн, определяемом паразитными составляющими спектра, величину улучшения смещения при использовании дополнительного фильтрующего элемента — интерференционного фильтра.

Экспериментально установлено, что сдвиг частоты «часового» перехода в схеме с интерференционным фильтром по сравнению со схемой без фильтра на два порядка меньше, т.е. лежит на уровне 10^{-19} , что практически устраняет его влияние на НСП даже самых лучших образцов оптических реперов. Эта полученная авторами технология и ее количественная характеристика позволит существенно повысить точность оптического репера (в 2–3 раза, в зависимости от конструкции) и устанавливать их на модифицированные лазерные сканеры Сугах 2500, Callidus, Stonex X300 и другие лазерные приборы, используемые в маркшейдерском деле. В целом данный результат позволит применять разрабатываемые гравитационные датчики с оптическими реперами и производить точные топологические замеры в маркшейдерии при измерениях на поверхности и в недрах Земли при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительстве горных предприятий.

3.2. Сдвиг, обусловленный тепловым излучением

В оптических реперах физическое взаимодействие атомов со световым и тепловым полями происходит в вакуумном объеме специальной камеры со стеклянными окнами. Данные окна имеют максимальный коэффициент пропускания в полосе, охватывающей весь диапазон длин волн излучения

лазеров, участвующих в процессах захвата, охлаждения и детектирования, например, для стронциевых реперов он составляет 450–820 нм. При этом, находясь при ненулевой (комнатной) температуре, окна и внутренняя металлическая поверхность камеры сами являются источниками теплового излучения. Плотность потока данного излучения легко рассчитывается из уравнения Планка, и при температуре ≈ 300 К составляет 180–200 Вт/м².

Значение теплового сдвига часового резонанса реперов представляет собой при комнатной температуре сумму статической и динамической составляющих при 300 К значения $|\Delta v_{stat}| = 2.13$ Гц и $|\Delta v_{dyn}| = 0.147$ Гц. При этом $|\Delta v_{room}| = \Delta v_{dyn} + \Delta v_{stat} = 2.27$ Гц [10]. Из (3) видно, что статическая часть пропорциональна четвертой степени температуры, а динамическая составляющая пропорциональна шестой степени температуры [21]. Если все атомы подвергаются действию излучения окружающей среды при криогенной температуре, т.е. ниже температуры жидкого азота, тепловой сдвиг часового резонанса в ⁸⁷Sr составляет величину менее 0,01 Гц. При условии, что однородность распределения температуры равна одному градусу, неопределенность будет меньше 10^{-17} [19].

$$\Delta v_{\text{тепл}}(T) = \sum_i \frac{\Theta_i}{4\pi} \cdot \varepsilon \cdot \left[\Delta v_{\text{стат}} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 + \Delta v_{\text{дин}} \cdot \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^6 \right] + O \right], \quad (3)$$

где Θ_i , ср — часть полного телесного угла от видимого конуса с вершущкой в центре вакуумной камеры или центре атомного облака; ε — степень черноты внутренней поверхности камеры; T , K — температура участка поверхности вакуумной камеры, соответствующей

щей телесному углу Θ_i ; T_0 , К – температура участка поверхности вакуумной камеры, соответствующей телесному углу 4π ср; O , Гц – пренебрежимо малая составляющая величины частоты более высокого порядка, влияющая на определение сдвига часового резонанса на уровне 10^{-20} и менее. Приведенная аналитическая зависимость теплового сдвига часового резонанса реперов позволяет рассчитывать оптимальную температуру оптических реперов в маркшейдерских приборах Сугах 2500, Callidus, Stonex X300 и других лазерных приборах, повышая качество съемки и увеличивая длительность работы, поддерживая оптимальный тепловой баланс измерительного обо-

рудования в зависимости от внешних эксплуатационных температур окружающей среды.

Наряду с исследованиями способов обхода теплового сдвига в [7,21], представлена разработка [17] – окружающая атомы неподвижная многослойная камера. Разработанная конструкция реализуется как малая алюминиевая криокамера с характерным диаметром ≈ 16 см внутри большей по диаметру ≈ 30 см криокамеры, находящейся при комнатной температуре. На рис. 1 представлен внешний вид данной двухконтурной камеры [17].

Алюминиевая внутренняя камера (рис. 2) имеет специальное внутреннее оребрение для перехвата большинства

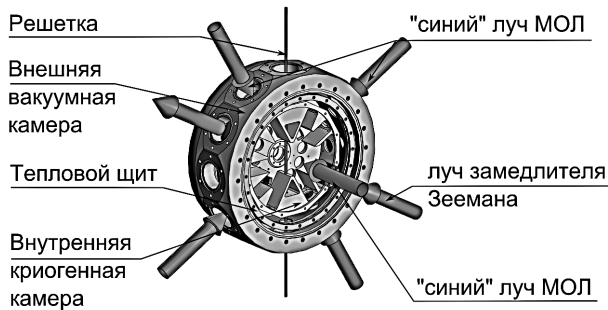


Рис. 1. Изображение 3D-модификации многослойной криогенной камеры
 Fig. 1. Image of a 3D modification of a multilayer cryogenic chamber

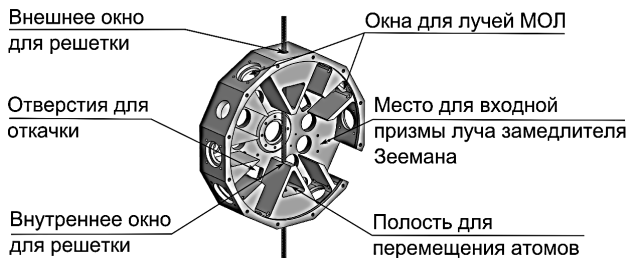


Рис. 2. Изображение модифицированной внутренней криогенной камеры, объединяющей в себе возможности неподвижного измерения часового перехода [10] и перемещения захваченных атомов вместе с оптической решеткой [8]

Fig. 2. The image of the modified internal cryogenic chamber, which is combines the possibilities of still measuring the clock transition [10] and the ability to move trapped atoms along with an optical lattice [8]

атомов стронция, не попавших в процессе охлаждения в ловушку, и предотвращения их оседания на поверхности окон, находящихся при низкой температуре.

Оценка влияния теплового излучения при использовании камеры имеет также свой нижний предел. Долговременные наблюдения за температурой такой внутренней камеры при работающей криогенной установке, основанной на криорефрижераторе (на эффекте Гиффорда-МакМагона), позволили накопить достаточно данных о воспроизводимости температуры и вычислить среднее значение колебаний температуры после установления криогенной установки на 90 ± 1 К. Рассчитанное значение сдвига часового перехода репера на интервале измерений с учетом данных наблюдений за температурой и типа материала камеры и окон составило $1,5 \cdot 10^{18}$, а НСП сдвига частоты «часового» перехода оптического репера частоты из-за эффекта действия теплового излучения составила $\Theta_{ИЧТ} = 8,1 \cdot 10^{19}$.

Как показали опытные исследования на базе лазерного маркшейдерского прибора Stonex X300, полученная оценка влияния теплового излучения при использовании модифицированной внутренней криогенной камеры позволяет на практике снизить тепловую нагрузку на маркшейдерские приборы Сурах 2500, Callidus, Stonex X300 и других лазерные приборы и уменьшить их нагрев на 15–25%.

3.3. Сдвиг часового перехода из-за влияния гравитации

Вышеперечисленные сдвиги являются локальными и не зависят от положения оптического репера в пространстве или его близости к крупногабаритным объектам в горной промышленности, способным влиять на гравитационный потенциал

вокруг оптического репера. Единственным сдвигом положения оптического резонанса, который проявляет себя при изменении высоты оптического репера [22] или изменении интегрального значения ускорения свободного падения, является гравитационный сдвиг [23]. Проявление данного сдвига заключается в том, что ход оптического репера замедляется при приближении к массивным предметам по сравнению с их ходом на достаточном удалении от них. Относительная частота оптического репера в двух различных точках, или разность частот двух реперов, находящихся в двух различных точках пространства, пропорциональна разнице абсолютных высот нахождения одного репера последовательно в двух точках пространства, или одновременно двух реперов в этих двух точках пространства.

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta W}{c^2} = \frac{g_0 \cdot \Delta h}{c^2}, \quad (4)$$

где g , м/с² — местное точечное ускорение свободного падения; c , м/с — скорость света; ΔW , Дж — разность потенциальных энергий (гравитационного потенциала) уровней нахождения оптического репера; Δh , м — разница высот, соответствующих потенциалам уровней; $\Delta\tau$, с — измеренное расхождение хода часов на суточном интервале τ , с.

На основе исследований проведен эксперимент на базе лазерного маркшейдерского прибора Stonex X300, в котором два оптических репера находились на одной вертикали, но были разнесены на 300 метров по высоте, их относительная разность хода составила $\approx 3 \cdot 10^{-14}$ [22]. Экспериментальные исследования показали, что высокая чувствительность установленного в прибор оптического репера к изменению высоты позволяет использовать

Таблица

Оценка погрешности измерения перепада высот нахождения оптического репера частоты от практической неопределенности оптического репера

The estimation of the measurement error of the height difference of the optical frequency clocks from the practical uncertainty of the optical clocks

Неопределенность частоты оптического репера частоты, $\Delta\nu/\nu$ Frequency uncertainty of the optical clock, $\Delta\nu/\nu$	Погрешность измерения высоты, h , см Measurement error of the height difference, h , cm
10^{-16}	100
10^{-17}	10
10^{-18}	1

его как сверхчувствительный атомный высотомер в практическом применении при геодезических исследованиях, добыче полезных ископаемых и горном деле, существенно повысив его точность (на 35%). В таблице приведены оценки необходимых неопределенностей частоты оптического репера от погрешности измерения высоты. При исследовании (4) можно сделать вывод, что оптический репер, разработанный на основе запатентованных устройств [15,16], является и чувствительным прибором с высокой степенью точности для измерения ускорения свободного падения g , при условии сохранения геометрической высоты, что существенно расширяет область практического применения авторского устройства для маркшейдеров, занимающихся измерениями на поверхности и в недрах Земли при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительстве горных предприятий.

4. Заключение

1. В рамках научных исследований разработаны оптические реперы и проведены экспериментальные исследования с их применением на базе современных лазерных приборов — сканеров CyraX 2500, Callidus, Stonex X300, широко используемых в марк-

шейдерском деле, горном деле, при горно-ландшафтной разметке и на горных выработках, которые позволили существенно улучшить геометрические характеристики замеров — повысить точность измерений до 25–35%.

2. Опытные исследования на базе лазерного маркшейдерского прибора Stonex X300 показали, что полученная оценка влияния теплового излучения при использовании модифицированной внутренней криогенной камеры позволяет на практике снизить тепловую нагрузку на маркшейдерские приборы CyraX 2500, Callidus, Stonex X300 и других лазерные приборы и уменьшить их нагрев на 15–25%.

3. Приведены принципы функционирования оптического репера частоты на примере стронциевого репера и разработки оптических стандартов частоты нового поколения.

4. Показаны энергетические диаграммы рабочих уровней и всех необходимых отстроек.

5. Описана последовательность получения полезного сигнала для стабилизации хранителя оптической частоты путем привязки к естественному часовому переходу в атоме стронция.

6. Объяснены причины использования нескольких стадий охлаждения атомов при детектировании и стабилизации оптического репера.

7. Приведены основные сдвиги частоты, обусловленные различными физическими эффектами, такими как излучение черного тела, гравитационный сдвиг, сдвиг из-за влияния излучения оптической решетки.

8. Описаны пути устранения влияния данных эффектов на точность измерений при горно-ландшафтной разметке и на горных выработках.

9. Показан способ модифицирования оптического репера частоты с заданной нестабильностью для потенциального построения устройства для определения ускорения свободного падения.

10. По тематике исследований получены два патента на изобретения РФ: № 2693551 (03.07.2019); № 2752462 (28.07.2021).

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 // *Geophys. J. Int.* 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, p. 872. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.

3. *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, p. 253–262. DOI:10.1088/0026-1394/51/3/253.

4. *Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level // *Nature.* 2014, vol. 506, p. 71–75. DOI:10.1038/nature12941.

5. *Воротынцева И. А., Смирнов П. А., Данильченко А. Л., Якубов М. М.* Интерпретация геологических данных на стадии геологоразведочных работ золоторудного месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2021. — № 11. — С. 45–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_45.

6. *Аленичев В. М.* формирование геоинформации для диагностики состояния горного предприятия // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2021. — № 5–1. — С. 217–225. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_217.

7. *Ushijima I., Takamoto M., Das M., Ohkubo T., and Katori H.* Cryogenic optical lattice clocks // *Nat. Photon.* 2015, vol. 9, p.185. DOI: 10.1038/nphoton.2015.5.

8. *Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppa M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D.* An atomic clock with 10^{-18} instability // *Science.* 2013, vol. 341, pp.1215–1218. DOI: 10.1126/science.1240420.

9. *Pizzocaro M., Bregolin F., Barbieri P., Rauf B., Levi F., Calonico D.* Absolute frequency measurement of the $^1S_0-^3P_0$ transition of ^{171}Yb // *Metrologia.* 2017, vol. 54, pp. 102–112. DOI: 10.1088/1681-7575/aa4e62.

10. *Lisdat Ch., Dorschner S., Nosske I., Sterr U.,* Blackbody radiation shift in strontium lattice clocks revisited // *Phys.Rev.Res.* 2021, vol. 3, L042036. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.L042036.

11. *Hobson R., Bowden W., Silva A., Baynham C. F. A., Margolis H. S., Baird P. E. G., Gill P., and Hill I. R.* A strontium optical lattice clock with $1 \cdot 10^{-17}$ uncertainty and measurement of its absolute frequency // *Metrologia.* 2020, vol. 57,065026. DOI: 10.1088/1681-7575/abb530.

12. *Brewer S. M., Chen J. S., Hankin A. M., Clements E. R., Chou C. W., Wineland D. J., Hume D. B., Leibrandt D. R.* $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} // *Phys. Rev. Lett.* 2019, vol. 123,033201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.033201.

13. *Ohmae N., Bregolin F., Nemitz N., Katori H.* Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clocks and closure of the Hg/Yb/Sr loop // *Opt Express*. 2020, vol. 28, iss. 5531, pp. 15112–15121. DOI: 10.1364/OE.391602.
14. *Nemitz N., Gotoh T., Nakagawa F., Ito H., Hanado Y., Ido T., Hachisu H.* Absolute frequency of ^{87}Sr at $1.8 \cdot 10^{-16}$ uncertainty by reference to remote primary frequency standards // *Metrologia*. 2021, vol. 58,025006. DOI: 10.1088/1681-7575/abc232.
15. Патент РФ № 2693551,03.07.2019. Гуров М. Г., Костин А. С., Слюсарев С. Н. Замедлитель Зеемана атомного пучка. 2019. Бюл. № 19.
16. Патент РФ № 2752462,28.07.2021. Гуров М. Г. Замедлитель Зеемана атомного пучка. 2021. Бюл. № 22.
17. *Gurov M. G., Gurova E. G., Rozanov S. B.* Species of vacuum chamber design with cryogenic cooling for strontium optical clocks // *IOP Journal of Physics*. 2020, vol. 1661,012140. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012140.
18. *Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P.* Observation and cancellation of the dc Stark shift in strontium optical lattice clocks // *IEEE Transactions on UFFC*. 2012, vol. 59, p. 411. DOI:10.1109/TUFFC.2012.2209.
19. *Porsev S. G., Safronova M. S., Safronova U. I., Kozlov M. G.* Multipolar Polarizabilities and Hyperpolarizabilities in the Sr Optical Lattice Clock // *Phys. Rev. Lett.* 2018, vol. 120,063204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.063204.
20. *Middelmann Th., Falke St., Lisdat Ch. and Sterr U.* High Accuracy Correction of Blackbody Radiation Shift in an Optical Lattice Clock // *Phys. Rev. Lett.* 2012, vol. 109, pp. 263004–1–263004–5. DOI:10.1103/PhysRevLett.109.263004.
21. *Ablewski P., Bober M. and Zawada M.* Reducing blackbody radiation shift uncertainty in optical lattice clocks // *Proceedings of the European Frequency and Time Forum, Torino, Italy*. 2018, p. 352. DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409067.
22. *Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., and Katori H.* Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // *Nat. Photon.* 2020, vol. 14, pp. 411–415. DOI:10.1038/s41566-020-0619-8.
23. *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. **MIAB**

REFERENCES

1. Bondarescu R., Schärer A., Lundgren A., Hetényi G., Houlié N., Jetzer P., Bondarescu M. Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion. *Geophys. J. Int.* 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, p. 872. DOI: 10.1007/978-3-319-44431-4.
3. 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, p. 253–262. DOI:10.1088/0026-1394/51/3/253.
4. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level. *Nature*. 2014, vol. 506, p. 71–75. DOI:10.1038/nature12941.
5. Vorotyntseva I. A., Smirnov P. A., Danilchenko A. L., Yakubov M. M. Interpretation of geological data at the stage of gold ore deposit exploration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):45 – 55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_45.
6. Alenichev V. M. Shaping geoinformation system for mine diagnostics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):217 – 225. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_217.

7. Ushijima I., Takamoto M., Das M., Ohkubo T., and Katori H. Cryogenic optical lattice clocks. *Nat. Photon.* 2015, vol. 9, p.185. DOI: 10.1038/nphoton.2015.5.
8. Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppo M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D. An atomic clock with 10^{-18} instability. *Science*. 2013, vol. 341, pp.1215–1218. DOI: 10.1126/science.1240420.
9. Pizzocaro M., Bregolin F., Barbieri P., Rauf B., Levi F., Calonico D. Absolute frequency measurement of the 1S_0 – 3P_0 transition of ^{171}Yb . *Metrologia*. 2017, vol. 54, pp. 102–112. DOI: 10.1088/1681-7575/aa4e62.
10. Lisdat Ch., Dorscher S., Nosske I., Sterr U., Blackbody radiation shift in strontium lattice clocks revisited. *Phys.Rev.Res.* 2021, vol. 3, L042036. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.L042036.
11. Hobson R., Bowden W., Silva A., Baynham C. F. A., Margolis H. S., Baird P. E. G., Gill P., and Hill I. R. A strontium optical lattice clock with $1\cdot 10^{-17}$ uncertainty and measurement of its absolute frequency. *Metrologia*. 2020, vol. 57,065026. DOI: 10.1088/1681-7575/abb530.
12. Brewer S. M., Chen J. S., Hankin A. M., Clements E. R., Chou C. W., Wineland D. J., Hume D. B., Leibrandt D. R. $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} . *Phys. Rev. Lett.* 2019, vol. 123,033201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.033201.
13. Ohmae N., Bregolin F., Nemitz N., Katori H. Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clocks and closure of the Hg/Yb/Sr loop. *Opt Express*. 2020, vol. 28, iss. 5531, pp. 15112–15121. DOI: 10.1364/OE.391602.
14. Nemitz N., Gotoh T., Nakagawa F., Ito H., Hanado Y., Ido T., Hachisu H. Absolute frequency of ^{87}Sr at $1.8\cdot 10^{-16}$ uncertainty by reference to remote primary frequency standards. *Metrologia*. 2021, vol. 58,025006. DOI: 10.1088/1681-7575/abc232.
15. RF patent No. 2693551,07/03/2019. Gurov M. G., Kostin A. S., Slyusarev S. N. Zeeman atomic beam moderator. 2019. Bull. No. 19. [In Russ].
16. RF patent No. 2752462,07/28/2021. Gurov M. G. Zeeman moderator of an atomic beam. 2021. Bull. No. 22. [In Russ].
17. Gurov M. G., Gurova E. G., Rozanov S. B. Species of vacuum chamber design with cryogenic cooling for strontium optical clocks. *IOP Journal of Physics*. 2020, vol. 1661,012140. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012140.
18. Lodewyck J., Zawada M., Lorini L., Gurov M., Lemonde P. Observation and cancellation of the dc Stark shift in strontium optical lattice clock. *IEEE Transactions on UFFC*. 2012, vol. 59, p. 411. DOI:10.1109/TUFFC.2012.2209.
19. Porsev S. G., Safronova M. S., Safronova U. I., Kozlov M. G. Multipolar Polarizabilities and Hyperpolarizabilities in the Sr Optical Lattice Clock. *Phys. Rev. Lett.* 2018, vol. 120,063204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.063204.
20. Middelmann Th., Falke St., Lisdat Ch. and Sterr U. High Accuracy Correction of Blackbody Radiation Shift in an Optical Lattice Clock. *Phys. Rev. Lett.* 2012, vol. 109, pp. 263004–1–263004–5. DOI:10.1103/PhysRevLett.109.263004.
21. Ablewski P., Bober M. and Zawada M. Reducing blackbody radiation shift uncertainty in optical lattice clocks. *Proceedings of the European Frequency and Time Forum*, Torino, Italy. 2018, p. 352. DOI: 10.1109/EFTF.2018.8409067.
22. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Yahagi T., Kokado K., Shinkai H., and Katori H. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat. Photon.* 2020. vol. 14, pp. 411–415. DOI:10.1038/s41566-020-0619-8.
23. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Гуров Михаил Геннадьевич*¹ – научный сотрудник,
e-mail: goorovmg@mail.ru;

*Гурова Елена Геннадьевна*² – доцент,
e-mail: lena319@mail.ru,

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево пгт, Менделеево, Московская обл., 141570, Россия;

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.

Для контактов: *Гурова Е. Г.*, e-mail: lena319@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Gurov M. G.*¹, Researcher,
e-mail: goorovmg@mail.ru;

*Gurova E. G.*², associate professor,
e-mail: lena319@mail.ru;

¹ Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements”, Mendeleevo village, Mendeleevo, Moscow region, 141570, Russia;

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073 Russia.

For contacts: *Gurova E. G.*, e-mail: lena319@mail.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

