

Новая реперная точка орбитальной калибровочной шкалы на базе эвтектического сплава In-Bi для применения в высокостабильных опорных бортовых излучателях нового поколения

Андрей Александрович Бурдакин^{1✉}, Валерий Рудольфович Гаврилов², Екатерина Александровна Ус³, Виталий Сергеевич Бормашов⁴

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

¹burdakin-m4@vniiofi.ru✉, ²gavrilov@vniiofi.ru, ³eus@vniiofi.ru, ⁴bormashov@vniiofi.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения стабильности спутниковой аппаратуры наблюдения Земли, ведущей долговременные температурные измерения в тепловом инфракрасном спектральном диапазоне. Для надёжного полётного контроля характеристик спутниковой инфракрасной аппаратуры необходимо повышать стабильность опорных бортовых излучателей. Функцию таких высокостабильных излучателей должны выполнить разрабатываемые в настоящее время бортовые чёрные тела нового поколения, основанные на явлении фазового перехода плавление↔затвердевание. В рамках этих работ требуется создать орбитальную калибровочную шкалу в динамическом температурном диапазоне систем наблюдения Земли 210–350 К из реперных точек температур фазового перехода ряда потенциально пригодных веществ. На реперных точках орбитальной калибровочной шкалы будет построен соответствующий ряд опорных бортовых чёрных тел. Показано, что для решения поставленной задачи следует провести серию космических экспериментов с выбранными реперными точками и прототипами перспективных бортовых чёрных тел на основе фазового перехода. В качестве важной точки будущей орбитальной калибровочной шкалы предложена новая реперная точка температуры плавления эвтектического сплава In-Bi (~345 К). Проанализированы результаты предварительных лабораторных исследований новой реперной точки. Полученные результаты позволили начать подготовку космических экспериментов для исследования сплава In-Bi с целью его применения в опорных бортовых излучателях нового поколения.

Ключевые слова: космический эксперимент, орбитальная калибровочная шкала, реперная точка температуры, сплав In-Bi, бортовое чёрное тело, фазовый переход, эвтектический сплав

Для цитирования: Бурдакин А. А., Гаврилов В. Р., Ус Е. А., Бормашов В. С. Новая реперная точка орбитальной калибровочной шкалы на базе эвтектического сплава In-Bi для применения в высокостабильных опорных бортовых излучателях нового поколения // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-32-37>

New fixed point of on-orbit calibration scale based on the In-Bi eutectic alloy for application in novel high-stable space-borne standard sources

Andrei A. Burdakin^{1✉}, Valerii R. Gavrilov², Ekaterina A. Us³, Vitalii S. Bormashov⁴

^{1, 2, 3, 4} All-Russian Scientific and Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

¹burdakin-m4@vniiofi.ru✉, ²gavrilov@vniiofi.ru, ³eus@vniiofi.ru, ⁴bormashov@vniiofi.ru

Abstract. The problem of ensuring stability of Earth observation space-borne instruments undertaking long-term temperature measurements within thermal IR spectral range is described. For in-flight reliable control of the space-borne IR instruments characteristics the stability of onboard reference sources should be improved. The function of these high-stable sources will be executed by novel onboard blackbodies, incorporating the melt↔freeze phase transition phenomenon, currently being developed. As a part of these works the task of realizing an on-orbit calibration scale within the dynamic temperature range of Earth observation systems 210–350 K based on fixed-point phase transition temperatures of a number of potentially suitable substances is advanced. The corresponding series of the onboard reference blackbodies will be set up on the basis of the on-orbit calibration scale fixed points. It is shown that the achievement of the target lies in carrying out a number of in-flight experiments with the selected fixed points and the prospective onboard fixed-point blackbodies prototypes. The new In-Bi eutectic alloy melt temperature fixed point (~345 K) is proposed as the significant fixed points of the future on-orbit calibration scale. The results of the new fixed point preliminary laboratory studies have been analyzed. The results allowed to start preparation of the in-flight experiments investigating the In-Bi alloy for the purpose of its application in the novel onboard reference sources.

Keywords: space experiment, on-orbit calibration scale, fixed-point temperature, In-Bi alloy, onboard blackbody, phase transition, eutectic

Введение. Результаты измерений температуры атмосферных, водных и сухопутных объектов Земли с помощью спутниковой аппаратуры наблюдения Земли (САНЗ) широко используются в климатологии, метеорологии, при контроле состояния окружающей среды. Достоверность результатов за многолетний период наблюдений зависит от долговременной стабильности радиометрических характеристик САНЗ. Наиболее высокие требования к стабильности САНЗ, вытекающие из цели мониторинга глобальных климатических изменений, предъявляются в тепловом инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне и составляют примерно 0,03 К за десятилетие [1]. В настоящее время задача обеспечения на требуемом уровне стабильности полётных характеристик САНЗ в тепловом ИК-диапазоне не решена [2].

Для решения данной проблемы в работе [2] для полётного контроля стабильности САНЗ предложено применять перспективные бортовые чёрные тела (БЧТ) нового поколения, основанные на явлении фазового перехода (ФП) плавление↔затвердевание веществ (БЧТ на ФП, или реперные БЧТ). В силу фундаментального свойства – постоянства температуры ФП – реперные БЧТ должны обладать более высокой стабильностью характеристик опорного излучения, чем применяемые в настоящее время бортовые калибраторы. Возможны два направления реализации этой идеи:

создание встроенных в излучатель (как протяжённый, так и полостной) миниатюрных термометрических ячеек для полётного контроля датчиков температуры в системе термостатирования БЧТ по температуре ФП вещества в ячейке (реперной точке);

создание полостных БЧТ на ФП, излучающая полость которых окружается рабочим веществом, в режиме калибровки претерпевающим ФП, что непосредственно обеспечивает стабильность операционной температуры излучателя.

Работы по обоим направлениям, охватывающие подготовку и проведение серии космических экспериментов, проходят во ВНИИОФИ с 2006 г. (с учётом предварительных лабораторных исследований). По первому направлению завершена подготовка к проведению в российском сегменте Международной космической станции первого этапа космического эксперимента «Репер-Калибр» и продолжается подготовка к его второму этапу. По второму направлению в 2014 г. на борту космического аппарата «Фотон-М» № 4 был проведен космический эксперимент «Калибр» [3, 4], а в настоящее время к проведению на борту космического аппарата «Бион-М» № 2 готовится космический эксперимент «Калибр-2».

Целью космического эксперимента «Репер-Калибр» является разработка орбитальной калибровочной шкалы на реперных точках температуры ФП плавление↔кристаллизация ряда веществ (преимущественно эвтектических сплавов, или эвтектик) для построения на следующем шаге соответствующего ряда реперных БЧТ. В космических экспериментах «Калибр» и «Калибр-2» поставлена аналогичная задача исследования в условиях невесомости реперных точек на базе веществ, потенциально пригодных для БЧТ на ФП. Но кроме того, в этих экспериментах одновременно происходит тестирование в условиях орбитального полёта прототипов

полостных БЧТ на основе фазового перехода исследуемых веществ.

В числе реперных точек, исследуемых в серии КЭ, есть малоизученная и, как будет показано ниже, перспективная для применения в разрабатываемых БЧТ на ФП реперная точка на базе эвтектического сплава In-Bi (температура ФП примерно 345 К). В настоящей статье приведены основные результаты предварительных лабораторных исследований новой реперной точки на базе сплава In-Bi и кратко описаны цели и задачи КЭ, в которых она будет изучена в условиях невесомости.

Реперные точки в динамическом температурном диапазоне систем наблюдения Земли. Температуры поверхности океанов и суши, многолетние измерения которых с помощью САНЗ позволяют судить о глобальных климатических изменениях, варьируются в пределах динамического температурного диапазона систем наблюдения Земли 210–350 К. В соответствии с этим предпочтительно выбирать рабочие вещества перспективных БЧТ на ФП, предназначенных для полётного контроля стабильности САНЗ, с температурами фазового перехода веществ (реперными точками) в том же диапазоне. В этом достаточно протяжённом диапазоне находятся три реперные точки действующей температурной шкалы МТШ-90: тройная точка ртути Hg (~234,3 К), тройная точка воды (273,16 К) и точка плавления галлия Ga (~302,9 К). В условиях орбитального полёта тройные точки Hg и воды можно заменить менее сложными в реализации точками плавления. Тем не менее создание орбитальной калибровочной шкалы требует более плотного заполнения данного температурного интервала путём разработки дополнительных реперных точек.

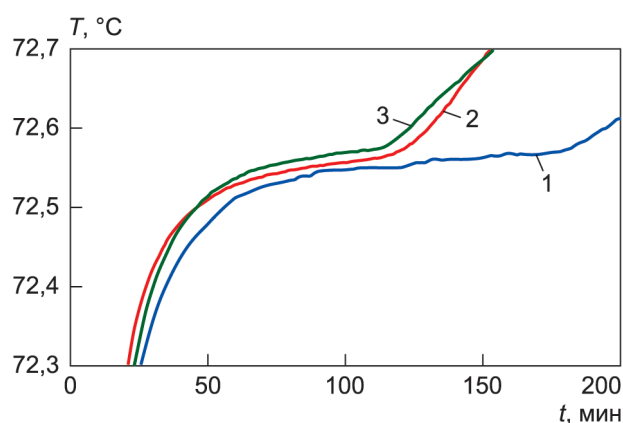
В этом отношении наиболее перспективны новые эвтектические реперные точки (ЭРТ), разрабатываемые, как правило, на базе интерметаллических эвтектических сплавов [5, 6]. В отличие от реперных точек на базе природных веществ ЭРТ можно создать практически в любом представляющем интерес температурном интервале путём подбора компонентов сплава. Приведём некоторые интерметаллические эвтектические сплавы с примерными температурами ФП, потенциально пригодные для создания ЭРТ в диапазоне 210–350 К в дополнение к существующим реперным точкам: Ga-In-Sn (~283,6 К); Ga-In (~288,8 К); Ga-Sn (~293,6 К); Ga-Zn (~298,3 К); In-Bi-Sn (~332 К); In-Bi (~345 К).

Значения ЭРТ принято определять по температуре плавления, а не кристаллизации, как это происходит в случае монометаллических реперных точек МТШ-90, за исключением галлия. Реперная точка кристаллизации эвтектических сплавов имеет принципиальный недостаток из-за эффекта понижения экспериментального значения температуры кристаллизации по отношению к равновесному значению температуры ФП, одинаковому для кристаллизации и плавления. И, что даже важнее, ЭРТ плавления имеет более высокую повторяемость. Далее под характеристиками ЭРТ будем подразумевать характеристики температурного плато плавления эвтектического сплава.

Необходимость проведения космического эксперимента с реперными точками орбитальной калибровочной шкалы. В условиях невесомости могут измениться характеристики температурных плато ФП плавление↔кристаллизация рабочих веществ БЧТ на ФП (реперных точек), а следовательно, характеристики самих опорных реперных БЧТ в режиме калибровки аппаратуры. Отсюда вытекает необходимость исследований в условиях невесомости реперных точек, потенциально пригодных для применения в БЧТ на ФП.

Практическое значение космического эксперимента заключается в разработке орбитальной калибровочной шкалы в интервале 210–350 К, насыщенной реперными точками, и создании затем ряда опорных БЧТ на реперных точках шкалы. Фиксированная операционная/реперная температура БЧТ на ФП является их определённым недостатком, который будет менее заметен в случае более плотного заполнения шкалы реперными точками (с привлечением ЭРТ). Эвтектические системы являются более гравитационно-чувствительными с точки зрения механизма ФП, чем индивидуальные вещества (преимущественно металлы), применяемые в МТШ-90, и поэтому ЭРТ представляют первостепенный интерес для исследований в невесомости. В качестве основных объектов исследования в серии КЭ, постановщиком которых является ВНИИОФИ [7], выбран ряд эвтектических сплавов (Ga-In, Ga-Sn, Ga-Zn, In-Bi), температуры ФП которых принадлежат динамическому температурному диапазону.

Задачи космических экспериментов. В 2014 г. на борту космического аппарата «Фотон-М» № 4 проведён космический эксперимент «Калибр» с прототипом полостного БЧТ на основе ФП плавления Ga (~302,9 К). В результате исследованы реперные плато плавления Ga, полученные в условиях невесомости, а также в условиях орбитального полёта протестирован первый прототип БЧТ нового поколения на основе ФП [3, 4].



Плато плавления образцов 1–3 сплава In-In₂Bi разных составов: 1 — приблизительно эвтектического (33,3 масс. % Bi); 2 — заэвтектического (37,1 масс. % Bi); 3 — доэвтектического (24,0 масс. % Bi)

Melting plateaus of three samples of the In-In₂Bi alloy:

1 — the sample of approximate eutectic composition (33.3 mass % Bi); 2 — the sample of hypereutectic composition (37.1 mass % Bi); 3 — the sample of hypoeutectic composition (24.0 mass % Bi)

На первом этапе предстоящего космического эксперимента «Репер-Калибр» объектами эксперимента в условиях невесомости являются эвтектические сплавы Ga-In (~288,8 К), Ga-Sn (~293,6 К), Ga-Zn (~298,3 К), а также элементарный Ga (поскольку на нём основана хорошо изученная реперная точка МТШ-90). Согласно предварительным лабораторным исследованиям выбранные на первом этапе космического эксперимента вещества действительно перспективны для применения в будущих БЧТ на ФП [8]. При этом реперные точки плавления на базе Ga и его интерметаллических эвтектических сплавов образуют довольно узкую орбитальную калибровочную шкалу в пределах примерно 283–303 К. Однако в данном интервале находятся температуры поверхности большей части Мирового океана, измерение которых имеет первостепенное значение для мониторинга глобальных климатических изменений.

С включением эвтектического сплава In-Bi и воды в ряд потенциально пригодных для БЧТ на ФП веществ орбитальная калибровочная шкала расширится примерно до 273–345 К. Реперные точки ФП плавления сплава In-Bi и льда будут исследованы на втором этапе космического эксперимента «Репер-Калибр». В предстоящем космическом эксперименте «Калибр-2» сплав In-Bi выполняет функцию рабочего вещества следующего прототипа полостного БЧТ на ФП, с более высокой операционной температурой ~345 К. Таким образом, в космическом эксперименте «Калибр-2» одновременно с исследованием реперной точки на базе эвтектического сплава In-Bi тестируется и соответствующий прототип БЧТ на ФП.

В соответствии с направленностью космических экспериментов «Калибр» и «Калибр-2» точка наблюдения температуры находится вблизи поверхности имитатора излучающей полости прототипа БЧТ на ФП, в космическом эксперименте «Репер-Калибр» — в канале термометрической ячейки.

По термограммам космических экспериментов анализируется качество (продолжительность, форма, температурный дрейф) и повторяемость реперных плато плавления, полученных в условиях невесомости. Качество и повторяемость в циклах плавления — кристаллизации реперных плато служат также критериями правильности конструктивных принципов, заложенных в прототипы высокостабильных БЧТ на ФП.

Предварительные исследования реперной точки на основе эвтектического сплава In-Bi. На диаграмме фазового равновесия системы In-Bi присутствуют несколько эвтектик с различными температурами ФП плавление↔кристаллизация [9]. Из них, как наиболее подходящую по температуре ФП (~345 К) для разработки новой реперной точки, выбрали эвтектику In-In₂Bi (обозначена в настоящей статье In-Bi по составляющим компонентам).

До начала работ по КЭ новую реперную точку на базе эвтектического сплава In-Bi предварительно исследовали в термометрических ячейках малого размера (не более 150 г вещества). Необходимость в применении малогабаритных реперных точек обусловлена общими требованиями к аппаратуре, предназначенной для эксплуатации на борту космических аппаратов (малые массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление).

Конструкция термометрических ячеек со сплавом In-Bi, методика эксперимента, измерительная аппаратура полностью соответствуют проведению аналогичных исследований малогабаритных реперных точек на базе галлия и галлиевых эвтектик [8].

Были изготовлены ячейки с тремя образцами сплава In-Bi разного состава: образец 1 – близкий к эвтектическому составу; образец 2 – заэвтектического состава (с точки зрения содержания в сплаве висмута); образец 3 – доэвтектического состава. На рисунке представлены типичные плато плавления образцов сплава In-Bi при температуре термостата, превышающей температуру плавления сплава примерно на один градус. Согласно теории [10] плато плавления сплавов до- и заэвтектического составов оказались менее протяжёнными, чем плато плавления сплава, близкого по составу к эвтектическому: примерно 1 и 1,5 ч соответственно (см. рисунок). Плато плавления образца 1 имеет наименьший угол наклона, но в силу его большей продолжительности температурный дрейф для всех плато практически одинаков и составляет приблизительно 30 мК. В целом можно сделать вывод, что качество плато плавления сплава In-Bi оказалось достаточно высоким с точки зрения конечной цели работ – создания опорных БЧТ на основе ФП.

В непродолжительных экспериментах (наземных и космических) критерием пригодности реперной точки для построения БЧТ на ФП с высокой долговременной стабильностью может служить повторяемость σ её экспериментального значения в циклах плавления – кристаллизации. Плато плавления эвтектических сплавов присущ больший температурный дрейф, чем в случае металлов, поэтому экспериментально определяемое значение температуры ЭРТ в определённой мере будет условным – зависящим от выбора точки на плато. Таким образом, при оценке повторяемости ЭРТ в первую очередь необходимо выбрать метод определения экспериментального значения её температуры по плато плавления. Авторами настоящей статьи выбран метод отождествления условного значения ЭРТ с «точкой отрыва» (“the run-off point”), определяемой как конец квазилинейного участка плато плавления [6]. Повторяемость экспериментальных значений реперной точки на основе ФП плавления эвтектического сплава In-Bi составила $\sigma \approx 3$ мК (на основании анализа девяти плато плавления образцов 1–3).

Таким образом, характеристики ЭРТ на базе сплава In-Bi делают эту реперную точку перспективной для построения соответствующего БЧТ на ФП с целью полётного контроля стабильности САНЗ. Полученный результат позволяет перейти к подготовке КЭ «Калибр-2» с прототипом БЧТ на основе фазового перехода плавления эвтектического сплава In-Bi.

Предстоящие исследования эвтектической реперной точки на базе сплава In-Bi в условиях невесомости. Как уже отмечалось, исследование характеристик ЭРТ на базе сплава In-Bi в условиях невесомости будет реализовано в космических экспериментах «Калибр-2» и «Репер-Калибр» (на его втором этапе). Предположение о влиянии силы гравитации на характеристики ЭРТ (по крайней мере, более значительном, чем для монометаллических реперных точек)

следует из анализа особенностей структуры эвтектических сплавов и вытекающей отсюда специфики механизма эвтектического ФП.

Фазовая структура эвтектических сплавов в твёрдом состоянии резко неоднородна по содержанию компонентов сплава в эвтектических фазах. Размеры эвтектических фаз могут быть значительными – от одного до десятков микрометров в зависимости от типа эвтектики [10, 11], что ещё более увеличивает неоднородность эвтектического сплава. При температуре ФП неоднородный по распределению атомов компонентов эвтектический сплав в состоянии равновесия сосуществует с однородным расплавом. С точки зрения механизма ФП это означает, что в процессе ФП атомы компонентов эвтектического сплава перемещаются в жидкой фазе на расстояния, на несколько порядков большие смещения атомов при плавлении или кристаллизации однокомпонентных металлов. Такое перемещение атомов в расплаве эвтектики приводит не только к переносу массы на значительные расстояния, но и (при градиентах температуры) к соответствующему переносу теплоты. Тепломассоперенос в жидкой фазе (в расплаве) зависит от силы гравитации [например, 12], что делает ЭРТ гравитационно-чувствительными при реализации ФП в эвтектических сплавах.

Таким образом, изменение в условиях невесомости характера тепломассопереноса в расплаве эвтектики способно существенно повлиять на механизм эвтектического ФП и, как следствие, на характеристики реперного плато плавления, что предстоит проверить в ходе КЭ с эвтектическими сплавами, включая сплав In-Bi.

Кроме того, многокомпонентным системам, в том числе эвтектическим сплавам, в наземных условиях присуща макроскопическая неоднородность в распределении компонентов по объёму образца (седиментация) вследствие различия их атомного веса [11]. Обусловленная силой гравитации седиментация происходит в расплавленном состоянии, фиксируется в процессе кристаллизации и влияет на характеристики реперного плато при последующем плавлении эвтектического сплава [13]. Вследствие исчезновения в невесомости причин для седиментации характеристики плато также могут изменяться. С этой точки зрения сплав In-Bi является ещё более интересным объектом для КЭ, чем эвтектические сплавы на основе Ga (Ga-In, Ga-Sn, Ga-Zn). Это связано с тем, что атомные веса In и Bi отличаются друг от друга больше, чем атомный вес Ga отличается от атомных весов In, Sn, Zn. Следовательно, можно ожидать, что влияние силы гравитации на характеристики реперного плато плавления сплава In-Bi будет более значительным из-за седиментации.

Заключение. В работах, касающихся проблемы создания БЧТ на ФП, или реперных БЧТ, в качестве потенциально пригодных рабочих веществ рассматриваются, как правило, галлий и эвтектические сплавы на его основе [например, 14]. Как было отмечено, на этих реперных точках может быть построена довольно узкая (в пределах 283–303 К), хотя и очень важная для мониторинга глобальных климатических изменений, орбитальная калибровочная шкала.

Предложенная новая реперная точка на базе эвтектического сплава In-Bi (~345 K) расширяет орбитальную калибровочную шкалу до верхнего предела динамического температурного диапазона систем наблюдения Земли. (Включение воды в число исследуемых в космических экспериментах веществ преследует цель расширения орбитальной калибровочной шкалы в сторону низких температур.)

Достаточно протяжённая, насыщенная реперными точками орбитальная калибровочная шкала в температурном диапазоне 210–350 K необходима для разработки на её основе ряда БЧТ на ФП – высокостабильных опорных бортовых излучателей нового поколения. Создание ряда опорных бортовых излучателей на низкотемпературных реперных точках будет означать появление радиометрической орбитальной калибровочной шкалы для полётного контроля стабильности САНЗ в ИК спектральном диапазоне.

Предварительные исследования реперной точки температуры плавления эвтектического сплава In-Bi продемонстрировали её перспективность для включения в орбитальную калибровочную шкалу. Это позволило сделать сплав In-Bi одним из объектов исследования в серии космических экспериментах, необходимых для продолжения работ по созданию БЧТ на ФП.

Представленные в работе исследования реперной точки на базе эвтектического сплава In-Bi выполнены с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и финансово поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. The Response of the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) to the Global Climate Observing System Implementation Plan 2010 (GCOS IP-10), Edited by CEOS, 2012, 55 p.
2. Victor I. Sapritsky, Andrey A. Burdakin, Boris B. Khlevnoy, Svetlana P. Morozova, Sergey A. Ogarev, Alexander S. Panfilov, Vladimir N. Krutikov, Gail Bingham, Thomas Humpherys, Joseph J. Tansock, Alan V. Thurgood, Victor E. Privalsky, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, vol. 3 (1), p. 033506. <https://doi.org/10.1117/1.3086288>
3. Саприцкий В. И., Бурдакин А. А., Иванов А. И., Крутиков В. Н., Лисянский Б. Е., Лысак А. С., Морозова С. П., Панфилов А. С., Пузанов А. В., Раков В. В., Самойлов М. Л., Ус Е. А., Хлевной Б. Б. Реализация высокостабильных опорных бортовых излучателей в эксперименте «Калибр» на космическом аппарате «Фотон-М» № 4 // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 85–88. <https://doi.org/10.7868/S0205961416030064>
4. Burdakin A., Khlevnoy B., Krutikov V., Puzanov A., Samoylov M., Sapritsky V., Us E., Ivanov A., Kudashkina M., *Proceedings of the 13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry "NEWRAD 2017"*, Tokyo, 13–16 June, 2017, Local Organizing Committee (LOC) of NEWRAD Publ., 2017, pp. 28–29.

5. Ancsin J., *Metrologia*, 1990, vol. 27 (1), pp. 89–93. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/2/007>
6. Ancsin J., *Metrologia*, 2006, vol. 43 (1), pp. 60–66. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1/009>
7. Burdakin A., Khlevnoy B., Krutikov V., Panfilov A., Puzanov A., Samoylov M., Sapritsky V., Us E., Lysak A., Kudashkina M., *Proceedings of the 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry "NEWRAD 2014"*, Aalto, 24–27 June, 2014, Aalto University Publ., 2014, pp. 57–58.
8. Burdakin A., Khlevnoy B., Samoylov M., Sapritsky V., Ogarev S., Panfilov A., Bingham G., Privalsky V., Tansock J., Humpherys T., *Metrologia*, 2008, vol. 45 (1), pp. 75–82. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1/011>
9. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3-х т. М.: Машиностроение, 1996.
10. Бочвар А. А. Металловедение. М.: Металлургиздат, 1956. 495 с.
11. Залкин В. М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. М.: Металлургия, 1987. 152 с.
12. Avduevsky V., Grishin S., Savitchev V., *Acta Astronautica*, 1980, vol. 7, pp. 867–876. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(80\)90076-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(80)90076-4)
13. Ivanova A., Gerasimov S., Elgourdou M., Renaot E., *Proceedings of the 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science "Tempmeko 2004"*, Cavtat-Dubrovnik, 21–25 June, 2004, University of Zagreb Publ., 2005, vol.1, pp. 267–270.
14. Gero P. Jonathan, Dykema John A., and Anderson James G., *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 2008, vol. 25, pp. 2046–2054. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1100.1>

References

1. The Response of the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) to the Global Climate Observing System Implementation Plan 2010 (GCOS IP-10), Edited by CEOS, 2012, 55 p.
2. Victor I. Sapritsky, Andrey A. Burdakin, Boris B. Khlevnoy, Svetlana P. Morozova, Sergey A. Ogarev, Alexander S. Panfilov, Vladimir N. Krutikov, Gail Bingham, Thomas Humpherys, Joseph J. Tansock, Alan V. Thurgood, Victor E. Privalsky, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, vol. 3 (1), p. 033506. <https://doi.org/10.1117/1.3086288>
3. V. I. Sapritskii, A. A. Burdakin, A. I. Ivanov, V. N. Krutikov, B. E. Lisyanskii, A. S. Lysak, S. P. Morozova, A. S. Panfilov, A. V. Puzanov, V. V. Rakov, M. L. Samoylov, E. A. Us, B. B. Khlevnoy, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, no. 4, pp. 85–88 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0205961416030064>
4. Burdakin A., Khlevnoy B., Krutikov V., Puzanov A., Samoylov M., Sapritsky V., Us E., Ivanov A., Kudashkina M., *Proceedings of the 13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry "NEWRAD 2017"*, Tokyo, 13–16 June, 2017, Local Organizing Committee (LOC) of NEWRAD Publ., 2017, pp. 28–29.
5. Ancsin J., *Metrologia*, 1990, vol. 27 (1), pp. 89–93. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/2/007>

6. Ancsin J., *Metrologia*, 2006, vol. 43 (1), pp. 60–66.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1/009>
7. Burdakin A., Khlevnoy B., Krutikov V., Panfilov A., Puzanov A., Samoylov M., Sapritsky V., Us E., Lysak A., Kudashkina M., *Proceedings of the 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry "NEWRAD 2014"*, Aalto, 24–27 June, 2014, Aalto University Publ., 2014, pp. 57–58.
8. Burdakin A., Khlevnoy B., Samoylov M., Sapritsky V., Ogarev S., Panfilov A., Bingham G., Privalsky V., Tansock J., Humpherys T., *Metrologia*, 2008, vol. 45 (1), pp. 75–82.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1/011>
9. Lyakishev N. P., *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih system*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996 (in Russian).
10. Bochvar A. A., *Metallovedenie*, Moscow, Metallurgizdat Publ., 1956 (in Russian).
11. Zalkin V. M., *Priroda evtekticheskikh splavov i effekt kontakt-nogo plavleniya*, Moscow, Metallurgiya Publ., 1987 (in Russian).
12. Avduevsky V., Grishin S., Savitchev V., *Acta Astronautica*, 1980, vol. 7, pp. 867–876.
[https://doi.org/10.1016/0094-5765\(80\)90076-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(80)90076-4)
13. Ivanova A., Gerasimov S., Elgourdou M., Renaot E., *Proceedings of the 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science "Tempmeko 2004"*, Cavtat-Dubrovnik, 21–25 June, 2004, University of Zagreb Publ., 2005, vol.1, pp. 267–270.
14. Gero P. Jonathan, Dykema John A., and Anderson James G., *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 2008, vol. 25, pp. 2046–2054. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1100.1>

Статья поступила в редакцию 26.08.2020;
принята к публикации 02.10.2020.