

УДК 669.725:543.42

*Р.М. Дворецков<sup>1</sup>, О.С. Волкова<sup>1</sup>, В.Н. Радзиковская<sup>1</sup>, В.Н. Бурова<sup>1</sup>***ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ В СОВРЕМЕННЫХ  
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ  
СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5

*Проведены исследования по выбору условий пробоподготовки для различных бериллий-содержащих авиационных материалов, а также по выбору аналитических линий для различных диапазонов содержания Be в этих материалах. Разработаны методики измерения массовой доли бериллия в авиационных материалах с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) в сочетании с микроволновой пробоподготовкой. Методики позволяют определять как высокое (более 2,5% (по массе)), так и низкое (от 0,0001% (по массе)) содержание бериллия. Показано, что приведенные методики АЭС-ИСП менее длительные и трудоемкие и более безопасные по сравнению с методиками гравиметрического определения содержания бериллия.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.6. «Элинварные, износостойкие сплавы и высокопрочные бериллийсодержащие стали для приборов и агрегатов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** методика измерений, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой, АЭС-ИСП, бериллий, бериллийсодержащие материалы.

*Research on selection of sample preparation conditions for various beryllium-bearing aviation materials and selection of analytical lines for different ranges of Be content in these materials was carried out. The measurement technique of the mass fraction of beryllium in aviation materials by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-AES) in combination with microwave sample preparation was developed. The technique allows determining both high (more than 2,5% wt.) and low (0,0001% wt.) concentrations of beryllium. It has been shown that ICP-AES technique is less long and labour-intensive and safer as compared with gravimetry technique.*

*Work is executed within implementation of the complex scientific direction 8.6. «Elinvar, wear-resistant alloys and high-strength beryllium-bearing steels for devices and units» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** measurement technique, atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma, ICP-AES, beryllium, beryllium-bearing materials.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Бериллий обладает небольшой плотностью (1,85 г/см<sup>3</sup>) и высоким модулем упругости (290 ГПа), благодаря этому конструкционные материалы на основе Be обладают одновременно легкостью и прочностью, которая выше прочности многих специальных сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Материалы на основе Be имеют также относительно высокую теплопроводность (201 Вт/(м·К)). В связи с этим Be, несмотря на свою токсичность и высокую стоимость, является широко применяемым

элементом в ракетно-космической и авиационной технике [2–6]. Бериллий обладает уникальными физическими и электрофизическими свойствами, что также позволяет использовать его в ядерной и термоядерной, лазерной и рентгеновской технике [7, 8].

Бериллий представляет интерес и в качестве материала для изготовления деталей новой техники, и как важнейший легирующий элемент, используемый для получения различных сплавов на основе меди, магния, никеля, алюминия, железа и других металлов с уникальными свойствами [1, 9], которые используются в авиастроении и других отраслях промышленности [10].

### Материалы и методы

Воскресенский экспериментальный технический центр (филиал ВИАМ) – единственное в России предприятие с замкнутым металлургическим производством и механической обработкой бериллия и бериллийсодержащих сплавов, обладающее технологиями по утилизации и переработке бериллийсодержащих отходов [11]. Широкий спектр выпускаемой в ВИАМ продукции, содержащей бериллий, включает как изделия из чистого бериллия (фольги, пластины, оптические зеркала, паяные рентгеновские окна и др.), так и свариваемые высокопрочные сплавы пониженной плотности системы Al–Be–Mg, бериллиевые лигатуры, бериллиевые бронзы, литейные алюминиевые сплавы, а также специальные бериллийсодержащие стали и сплавы [12, 13].

Например, прецизионный сплав 97НЛ-ВИ (2,1–2,5% Be (по массе)) обладает высоким уровнем упругопластических свойств, стабильных в интервале рабочих температур от -70 до +250°C, применяется в виде холоднокатаной ленты для изготовления уплотнителей воздухозаборников летательных аппаратов [14].

Коррозионностойкая сталь ВНС-32 (0,5–1% Be (по массе)), содержащая бериллий, обладает высокой тепло- и износостойкостью, предназначена для деталей трения топливной аппаратуры. Сталь ВНС-32 может применяться для деталей, работающих во всех климатических условиях при температуре от -196 до +450°C [15].

Сплавы системы Al–Be (от 20 до 70% Be (по массе)) являются легкими металлическими композиционными материалами (КМ), в которых упрочнителем служит бериллий (от 20 до 70% (по массе)), а матрицей – алюминий. Такие материалы обладают высокой жесткостью, низкой плотностью, высоким коэффициентом звукопоглощаемости и уникальными конструкционными свойствами [16].

Все материалы для авиационной промышленности требуют жесткого контроля качества, что ставит перед химическими лабораториями отрасли задачу определения массовой доли Be в материалах его содержащих. Однако разработанные в СССР нормативные документы и методики определения массовой доли бериллия устарели, так как изменились интервалы легирования сплавов, а современные методики измерения содержания Be отсутствуют [17–19], так же как и стандартные образцы состава на бериллийсодержащие материалы. Необходимо отметить, что «Санитарные правила при работе с бериллием и его соединениями» [20] предписывают изолировать участки и цеха по обработке металлического бериллия и его сплавов (с содержанием Be 20% и более) от других участков производства.

В ВЭТЦ определение содержания Be осуществляется по разработанным в институте методикам измерения массовой доли бериллия концентрацией до 2,5% (по массе) в алюминиевых сплавах, бериллийсодержащих бронзах, сталях и никелевых сплавах методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) и атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС), а также в лигатурах и специальных сплавах с содержанием Be более 2,5% (по массе) гравиметрическим способом, методами АЭС-ИСП и ААС.

**Результаты определения массовой доли бериллия в сталях и сплавах  
с концентрацией Be до 2,5% (по массе)**

Определение массовой доли бериллия в алюминиевых сплавах (0,0001–0,01% Be (по массе)), сталях типа ВНС-32 (0,5–1% Be (по массе)), сплавах типа 97НЛ-ВИ (2–2,5% Be (по массе)) и бериллиевых бронзах (0,2–3% Be (по массе)) выполняли на атомно-эмиссионных спектрометрах Varian 730 ES и Perkin Elmer Optima 8300. Для обоих спектрометров использовали заводские настройки [21]. Рабочий газ – аргон высокой чистоты (объемная доля Ar не менее 99,998%). Для построения градуировочных зависимостей использовался метод стандартных добавок. В качестве внутреннего стандарта использовали индий [22].

Известно, что наиболее токсичными являются растворимые соединения бериллия (фтористый, хлористый, серноокислый бериллий и др.), поэтому для растворения проб предпочтительно использование герметичной микроволновой системы разложения. Использование микроволновых систем разложения существенно сокращает продолжительность растворения пробы, а также позволяет уменьшить объем используемых кислот, сократить количество вредных выбросов в атмосферу, устранить вероятность потери вещества в результате его разбрызгивания при кипении, а отдельные элементы уберечь от потери при образовании летучих соединений [23, 24].

При разработке данных методик навески образцов растворяли в смесях разбавленных кислот:

– для сталей типа ВНС-32, сплавов типа 97НЛ-ВИ и бериллиевых бронз навески массой 0,2 г растворяли в смеси: вода (10 мл)+HCl (3 мл)+HNO<sub>3</sub> (1 мл), в системе микроволнового разложения;

– для алюминиевых сплавов навески массой 0,5 г растворяли в смеси: вода (5 мл)+HCl (5 мл)+HNO<sub>3</sub> (1 мл).

Для каждого материала были выбраны наиболее чувствительные и наименее подверженные спектральным наложениям аналитические линии Be в исследуемом диапазоне концентраций (табл. 1) [25]. Результаты определения содержания Be в бериллийсодержащих материалах представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

Аналитические линии Be, используемые в методиках

Материал	Диапазон концентраций Be, % (по массе)	Аналитические линии Be, нм
Алюминиевые сплавы	0,0001–0,01	313,042; 313,107
Бронзы	0,2–3	313,042; 313,107; 249,473; 265,062
Сталь ВНС-32	0,5–1	313,042; 313,107; 249,473; 265,062; 332,108
Сплав 97НЛ-ВИ	2–2,5	313,042; 313,107; 249,473; 265,062; 332,108

Таблица 2

**Результаты определения содержания Ве в экспериментальных составах бериллиевых бронз методами АЭС-ИСП и гравиметрии**

Условный номер плавки	Содержание Ве, % (по массе), определенное методом	
	АЭС-ИСП	гравиметрии
1	1,92	1,91
2	2,06	2,04
3	1,83	1,84

Таблица 3

**Результаты определения содержания Ве в стали ВНС-32 методами АЭС-ИСП и ААС**

Условный номер плавки	Содержание Ве, % (по массе), определенное методом	
	АЭС-ИСП	ААС
1	0,709	0,710
2	0,748	0,740
3	0,850	0,848

Видно (табл. 2 и 3), что результаты разных методов анализа при определении содержания Ве в указанных материалах хорошо сходятся между собой, относительная погрешность составила менее 1,5%.

**Результаты определения содержания бериллия в лигатурах и специальных сплавах с концентрацией Ве более 2,5% (по массе)**

Ранее в ВЭТЦ использовался отраслевой стандарт ОСТ 95.442–76 «Бериллийсодержащие продукты. Методы определения содержания бериллия», в котором описан гравиметрический метод определения концентрации бериллия в гидроксиде (18–20% Ве (по массе)) и оксиде (33–36% Ве (по массе)) бериллия, концентрате (2–12% Ве (по массе)) и грануляте (2–3% Ве (по массе)) бериллия, алюминиево-бериллиевой (2–4% Ве (по массе)), алюминиево-бериллиево-магниево- (Ве 30–70% (по массе)) и медно-бериллиевой (4–12% Ве (по массе)) лигатурах [26].

Несмотря на то что гравиметрия – один из старейших и точных методов анализа, метод имеет ряд недостатков: длительность проведения анализа, трудоемкость, а также малая избирательность (так как большинство осаждающих реагентов не являются селективными, то приходится проводить предварительное разделение компонентов). В настоящее время гравиметрический метод применяют редко, в основном при арбитражных анализах, аттестации стандартных образцов, установлении химических формул веществ [27]. При отсутствии стандартных образцов состава для контроля качества сырья и продукции наиболее оптимальным, по мнению авторов, является метод АЭС-ИСП [28, 29].

Метод АЭС-ИСП менее трудоемкий и длительный, по сравнению с гравиметрией, так как пробоподготовка включает меньшее количество стадий, а при разложении проб, как правило, используются микроволновые системы разложения, а также минимально необходимые массы навесок и объемы реагентов, вследствие этого и вероятность нахождения в рабочей зоне токсичных соединений бериллия будет меньше.

Для разработки менее длительной и трудоемкой и более безопасной методики измерения массовой доли Ве методом АЭС-ИСП было проведено исследование метрологических характеристик при определении содержания Ве в модельных растворах.

Сложность при определении содержания высоких концентраций Ве заключается в том, что спектральные линии этого элемента обладают очень большой чувствительностью и, как следствие, высокой интенсивностью. В разных моделях спектрометров (АЭС-ИСП) детекторы имеют ограниченный динамический диапазон на измерение очень больших интенсивностей, так как это может повредить детектор. По этой

причине приходится выбирать соответствующий диапазон концентраций Ве в анализируемом растворе с помощью либо небольшой массы навески, либо большого разбавления исходного раствора. В данном эксперименте использовались модельные растворы алюминий-бериллий-магниевых сплавов с массовой долей бериллия от 25 до 75%, приготовленные из моноэлементных стандартных растворов элементов. Исходная концентрация модельных растворов 1 г/л (1000 ppm).

При анализе использовались следующие режимы работы спектрометров:

- на Varian 730 ES – аксиальный обзор плазмы;
- на Optima 8300 – аксиальный и радиальный обзор плазмы.

Результаты измерений массовой доли Ве и метрологические характеристики представлены в табл. 4–6.

Таблица 4

**Результаты анализа модельных растворов, разбавленных в 100 раз (до 10 ppm), на спектрометре Varian 730 ES и метрологические характеристики результатов**

Содержание Ве в анализируемом модельном растворе сплава, ppm	Значение (Varian 730 ES)	Аналитические линии Ве, нм						
		313,042	313,107	234,861	249,473	265,062	332,108	457,266
2,5	Среднее арифметическое	2,56	2,5	2,51	2,49	2,45	2,33	3,04
	СКО, % (отн.)	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	12,6
5	Среднее арифметическое	5,05	4,95	5,07	5,03	4,94	4,77	5,03
	СКО, % (отн.)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,9	7,5
7,5	Среднее арифметическое	7,57	7,47	7,61	7,54	7,55	7,23	7,74
	СКО, % (отн.)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	3,5

Таблица 5

**Результаты анализа модельных растворов, разбавленных в 20 раз (до 50 ppm), на спектрометре Varian 730 ES и метрологические характеристики результатов**

Содержание Ве в анализируемом модельном растворе сплава, ppm	Значение (Varian 730 ES)	Аналитические линии Ве, нм				
		234,861	249,473	265,062	332,108	457,266
12,5	Среднее арифметическое	16,68	12,72	12,65	12,32	12,45
	СКО, % (отн.)	0,6	0,5	0,6	0,5	0,7
25	Среднее арифметическое	31,49	25,57	25,02	24,62	24,86
	СКО, % (отн.)	1,1	0,6	0,8	0,6	1,1
37,5	Среднее арифметическое	42,04	38,96	38,04	37,79	37,71
	СКО, % (отн.)	0,5	0,2	0,3	0,3	0,2

Видно (табл. 4), что при содержании Ве в анализируемых растворах 2,5–7,5 ppm лучшие метрологические характеристики показывают наиболее интенсивные аналитические линии Ве (313,042 и 313,107 нм). При содержании Ве свыше 12,5 ppm (табл. 5) в анализируемых растворах на линиях 313,042 и 313,107 нм на спектрометре Varian 730 ES происходит превышение предельных значений интенсивности прибора, вследствие чего построение градуировочного графика невозможно. Результаты по линии 234,861 нм имеют высокую относительную погрешность, в то время как малоинтенсивные линии хорошо калибруются, и полученные по ним результаты имеют небольшое среднеквадратическое отклонение и невысокую относительную погрешность.

Таблица 6

**Результаты анализа модельных растворов, разбавленных в 100 раз (до 10 ppm),  
на спектрометре Optima 8300 и метрологические характеристики результатов**

Содержание Be в анализируемом модельном растворе сплава, ppm	Значение (Optima 8300)	Аналитические линии Be, нм		
		313,042	313,107	234,861
2,5	Среднее арифметическое	2,41	2,44	2,45
	СКО, % (отн.)	0,6	1,1	1,0
5	Среднее арифметическое	4,75	4,87	4,88
	СКО, % (отн.)	0,9	0,8	0,8
7,5	Среднее арифметическое	7,21	7,41	7,41
	СКО, % (отн.)	1,0	0,9	0,8

На спектрометре Optima 8300 в аксиальном режиме также имеется ограничение по измеряемым интенсивностям ~700000 импульсов, что не позволяет измерять содержание Be в вышеуказанных диапазонах. Построить калибровочную прямую по результатам, полученным на спектрометре Optima 8300 в радиальном режиме обзора плазмы, оказалось возможным для содержаний Be до 7,5 ppm – результаты сравнимы по метрологическим характеристикам с результатами, полученными на спектрометре Varian 730 ES в аксиальном режиме в таком же диапазоне концентраций (табл.6).

### Обсуждение и заключения

В результате проведенных экспериментов выбраны условия пробоподготовки (масса навески, способ растворения) для различных бериллийсодержащих авиационных материалов, выбраны аналитические линии для различных диапазонов содержания Be в этих материалах, рассчитаны метрологические характеристики по ГОСТ 5725–2002.

При определении концентраций Be:

- от 0,0001 до 0,01% (по массе) в алюминиевых сплавах лучшие метрологические характеристики имеют линии 313,042 и 313,107 нм;
- от 0,2 до 3% (по массе) в сталях типа ВНС-32, сплавах типа 97НЛ-ВИ и бериллиевых бронзах – линии 313,042 и 313,107; 249,473 и 265,062 нм;
- до 7,5 ppm в модельных растворах Al–Be–Mg-сплавов – линии 313,042; 313,107; 234,861; 249,473 и 265,062 нм;
- от 7,5 ppm до 37,5 ppm в модельных растворах Al–Be–Mg-сплавов – линии 249,473; 265,062; 332,108 и 457,266 нм.

На основании этих исследований разработаны новые методики определения массовой доли Be концентрацией до 2,5% (по массе) в алюминиевых сплавах, бериллийсодержащих бронзах, сталях и никелевых сплавах методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) и атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС), а также в лигатурах и специальных сплавах с содержанием Be более 2,5% (по массе) методом АЭС-ИСП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
3. Фридляндер И.Н., Яценко К.П. Бериллиевые сплавы – перспективное направление аэрокосмического материаловедения // Авиационные материалы и технологии. 2000. №4. С. 6–13.

4. Каськов В.С. Бериллий и материалы на его основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 222–226.
5. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Композиционные стеклометаллические покрытия для защиты бериллия при высоких температурах // *Стекло и керамика*. 2012. №4. С. 12–15.
6. Розененкова В.А., Солнцев С.С., Миронова Н.А. Комплексная защита бериллиевых сплавов от окисления и сублимации токсичных паров бериллия // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №5. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2015).
7. Тузов Ю.В., Маркушкин Ю.Е. Бериллий – состояние, возможности и перспективы применения в термоядерной технике // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез*. 2011. №2. С. 21–27.
8. Папилов И.И., Тихинский Г.Ф. *Физическое металловедение бериллия*. М.: Атомиздат, 1968. 452 с.
9. Папилов И.И. *Бериллий в сплавах: справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 3–4.
10. Каськов В.С. Бериллий – конструкционный материал для многоразовой космической системы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2015).
11. Фоканов А.Н., Подуражная В.Ф., Тебякин А.В., Каськов В.С. Изготовление фольги из технического спеченного бериллия повышенной чистоты // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-3-3.
12. Фоканов А.Н., Каськов В.С., Подуражная В.Ф. Пайка бериллия со сплавом монель при изготовлении рентгеновских окон // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-2-2.
13. ГОСТ 10994–74 «Сплавы прецизионные. Марки». Калуга: Калужская типография стандартов, 2004. 18 с.
14. Щербаков А.И., Мосолов А.Н., Калицев В.А. Восстановление технологии получения бериллийсодержащей стали ВНС-32-ВИ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-1-1.
15. Фридляндер И.Н., Братухин А.Г., Горбунов П.З., Галь В.В., Яценко К.П., Фоканов А.Н. Al-Be-сплавы – металлические композиционные материалы широкого назначения // *МиТОМ*. 1996. №9. С. 23–26.
16. ГОСТ 11739.3–82 «Сплавы алюминиевые литейные и деформируемые. Методы определения бериллия». М.: Издательство стандартов, 1989. 10 с.
17. ГОСТ 15027.13–77 «Бронзы безоловянные. Методы определения бериллия». М.: Издательство стандартов, 2002. 4 с.
18. ГОСТ 23687.1–79 «Лигатура медно-бериллиевая. Методы определения бериллия». М.: Издательство стандартов, 1979. 7 с.
19. Санитарные правила при работе с бериллием и его соединениями: Санитарные правила №393–72: утв. главным санитарным врачом СССР П.Н. Бургасовым 16.11.1972. М., 1973. 5 с.
20. Пупышев А.А., Данилова Д.А. Использование атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой для анализа материалов и продуктов черной металлургии // *Аналитика и контроль*. 2007. Т. 11. №2–3. С. 131–181.
21. Евдокимова О.В., Майорова А.В., Печищева Н.В., Карачевцев Ф.Н., Шуняев К.Ю. Теоретический выбор внутреннего стандарта при ИСП-АЭС определении легирующих компонентов жаропрочных никелевых сплавов // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №2. Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 19.06.2015).
22. Адрышев А.К., Соколов В.М., Самойлов В.И. Охрана труда при производстве и использовании бериллия и его соединений // *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. «Инженерные исследования»*. 2007. №3. С. 104–110.

23. Тютюнник О.А., Гецина М.Л., Торопченко Е.С., Кубракова И.В. Микроволновая пробоподготовка природных объектов к атомно-абсорбционному определению ртути и других токсичных элементов // Журнал аналитической химии. 2013. Т. 68. №5. С. 420.
24. Новоселова А.В., Бацанова Л.Р. Аналитическая химия бериллия. М.: Наука, 1966. С. 50–59.
25. Бериллийсодержащие продукты. Методы определения содержания бериллия: ОСТ 95.442–76: утв. заместителем руководителя организации п/я В-2688. М., 1976.
26. Васильев В. П. Аналитическая химия. В 2-х ч. М.: Высшая школа, 1989. Ч. 1. Гравиметрический и титриметрический методы анализа. 320 с.
27. Вернидуб О.Д., Ломакина Г.Е. Анализ материалов черной металлургии атомно-эмиссионным с ИСП методом с применением МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. №5. С. 54–57.
28. Пупышев А.А., Данилова Д.А. Использование атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой для анализа материалов и продуктов черной металлургии // Аналитика и контроль. 2007. Т. 11. №2–3. С. 131–181.
29. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н., Гундобин Н.В., Титов В.И. Разработка стандартных образцов состава сплавов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 393–398.