

Научная статья

УДК 621.318.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-123-132

## МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ АВИАЦИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ НА ОСНОВЕ СМЕСИ НЕОДИМА И ПРАЗЕОДИМА

В.П. Пискорский<sup>1</sup>, М.В. Потапов<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>1</sup>, А.В. Бузенков<sup>1</sup>, Р.Б. Моргунов<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия; office@icp.ac.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия; tstu@tstu.ru

**Аннотация.** Исследованы спеченные материалы для навигационных приборов авиации на основе празеодима с примесью неодима. Установлено, что при высоком содержании кобальта, необходимого для повышения температурной стабильности, примесь неодима допустима только в минимальных количествах. В материалах на основе неодима с увеличением содержания кобальта резко уменьшается содержание основной магнитной фазы  $R_2(Fe, Co)_{14}B$ . Установлено, что оптимальными магнитными свойствами обладает материал с минимальным содержанием церия.

**Ключевые слова:** редкоземельные магниты, намагниченность насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, температура спекания, температура отжига, кривая размагничивания, коэффициент прямоугольности кривой размагничивания

**Для цитирования:** Пискорский В.П., Потапов М.В., Валеев Р.А., Бузенков А.В., Моргунов Р.Б. Магнитотвердые материалы для навигационных приборов авиации, изготовленные на основе смеси неодима и празеодима // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 123–132. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-123-132.

Scientific article

## HARD MAGNETIC MATERIALS FOR AVIATION NAVIGATION DEVICES MADE ON THE BASIS OF A MIXTURE OF NEODYMIUM AND PRASEODYMIUM

V.P. Piskorsky<sup>1</sup>, M.V. Potapov<sup>1</sup>, R.A. Valeev<sup>1</sup>, A.V. Buzenkov<sup>1</sup>, R.B. Morgunov<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia; office@icp.ac.ru

<sup>3</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of High Education «Tambov State Technical University», Tambov, Russia; tstu@tstu.ru

**Abstract.** The work studies sintered materials for aviation navigation devices based on praseodymium with an impurity of neodymium. It has been established that at a high content of cobalt, which is necessary to increase the temperature stability, the impurity of neodymium is acceptable only in minimal quantities. In neodymium-based materials, the content of the main

*magnetic phase  $R_2(Fe, Co)_{14}B$  decreases sharply with an increase in the content of cobalt. It had been established that a material with a minimum content of cerium has optimal magnetic properties.*

**Keywords:** rare-earth magnets, saturation magnetization, residual induction, coercive force, sintering temperature, annealing temperature, demagnetization curve, «squareness» coefficient of demagnetization curve

**For citation:** Piskorsky V.P., Potapov M.V., Valeev R.A., Buzenkov A.V., Morgunov R.B. Hard magnetic materials for aviation navigation devices made on the basis of a mixture of neodymium and praseodymium. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 123–132. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-123-132.

## Введение

Разработанный в НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) марки ДНГ-091 имеет следующие основные характеристики: масса 125 г, ресурс работы 140000 ч, скорость вращения 30000 мин<sup>-1</sup>, величина измеряемой угловой скорости 10 градусов/с [1]. Длительная автономная работа инерциальных навигационных систем сопряжена со сложностью описания погрешностей их датчиков стандартными статистическими методами [2]. В рамках данного обзора исследуются источники шумов в микро электромеханических акселерометрах и гироскопах, а также анализируются подходы к их оценке.

Как отмечено в работе [2], погрешности таких датчиков можно классифицировать и количественно оценить двумя ключевыми методами: через дисперсию Аллана и анализ спектральной плотности мощности, что продемонстрировано на примере инерциальной системы ADIS16448. Практически подтверждена взаимосвязь между этими методами, а именно возможность вычисления дисперсии Аллана на основе данных о спектральной плотности. Адаптация этих методов для работы в реальном времени предоставляет возможность создания систем взаимной компенсации показаний разнородных сенсоров. Рассматриваются также технические средства и методики контроля информационно-измерительных систем. Особое внимание уделяется разработке и калибровке датчиков угла поворота для систем управления полетом. Описаны принцип построения испытательного стенда для оценки точности калибровки и процесс обучения нейронной сети, призванной нивелировать недостатки традиционных методов калибровки.

В работе [3] представлен сравнительный анализ классического подхода к совместной калибровке датчиков угла и метода, использующего нейронные сети.

Увеличение потребностей в системах управления движением для различных изделий стимулировало спрос на недорогие и высокопроизводительные навигационные приборы, что, в свою очередь, потребовало организации их крупносерийного производства. Появление принципиально новых типов гироскопов, таких как волоконно-оптические (ВОГ), твердотельные волновые (ТВГ), микромеханические и лазерные, ознаменовано проведением интенсивных исследований, начало которым положено еще во второй половине XX в. [4]. В активной фазе также находятся исследования по проектированию гироскопов, основополагающим принципом которых является квантовая оптика.

Согласно данным работы [4], в настоящее время с учетом уже имеющихся видов механических гироскопов широкий диапазон точности обеспечивается тремя конкурирующими технологиями. Создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) стало возможным благодаря использованию лазерных гироскопов, имеющих стабильный масштабный коэффициент и дрейф нуля  $\sim 10^{-2}$  градусов/ч.

Благодаря простоте и низкой стоимости БИНС с использованием лазерного гироскопа стали основным решением для авиации, что обеспечило их массовое производство. Например, компания Honeywell за два десятилетия (1995–2015 гг.) выпустила >300 тыс. триад лазерных гироскопов. На 1980-е гг. пришелся пик научных публикаций, посвященных разработке лазерных гироскопов, тогда как в настоящее время появляются новые данные только о локальных усовершенствованиях их конструкции. Дрейф нуля на уровне  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  градус/ч остается наиболее востребованным. С учетом того, что данный диапазон в ближайшее время не будет расширен, лазерные гироскопы занимают лидирующие позиции на рынке.

Позднее началась активная фаза исследований ВОГ с более низкими значениями точности, работа этого гироскопа основана на релятивистском эффекте Саньяка. Навигационные системы с использованием таких гироскопов появились лишь в XXI в. и смогли занять рыночную нишу благодаря трем преимуществам. Во-первых, в их производстве используются отработанные и недорогие компоненты волоконно-оптических сетей связи. Во-вторых, ВОГ не подвержен эффекту захвата встречных волн, в отличие от лазерных гироскопов. В-третьих, надежность ВОГ потенциально можно повысить путем вынесения источника излучения за пределы оптического контура, тогда как в лазерном гироскопе он расположен внутри резонатора. Следует отметить, что ВОГ незаменим в проектировании систем, где приоритетной характеристикой является автономная работа с высокой точностью в течение длительного времени. Достичь этого можно благодаря повышенной чувствительности ВОГ, которая обусловлена возможностью увеличения длины оптического волокна. Навигационные системы с применением ВОГ нашли применение в агрегатах, используемых преимущественно в судостроительной отрасли. При этом единственным сдерживающим фактором, ограничивающим его применение в более ответственной ракетно-космической технике, является меньшая, чем у лазерных гироскопов, стабильность масштабного коэффициента.

Космическая техника, например, США и Франции включает альтернативный тип гироскопа – ТВГ. Он разрабатывался для применения преимущественно в морских условиях. В сравнении с оптическими аналогами ТВГ опережает их по массогабаритной характеристике, но является более дорогостоящим.

Нельзя забывать и о гироскопе, принцип работы которого основан на ядерном магнитном резонансе. Такой гироскоп обладает средней и высокой точностью (дрейф нуля  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  градусов/ч) и повышенной стойкостью к механическим воздействиям [5–7].

Отдельного внимания требует микромеханический гироскоп, точность которого в обозримом будущем может быть значительно повышена – до уровня  $10^{-1}$  градусов/ч. Перспективной, но сложно реализуемой в настоящее время является технология с использованием холодных атомов.

Ввиду масштабной конкуренции продолжают использоваться прецизионные электростатические гироскопы, но ведутся активные мероприятия по их замене на ВОГ, ТВГ и гироскопы, работающие на новых физических принципах, тогда как прочие виды механических гироскопов применяются ограниченно [4].

Особого внимания заслуживает ДНГ, имеющий три степени свободы во внутреннем подвесе и две взаимно ортогональные входные оси. Его точность находится в интервале  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  градус/ч [8]. Ключевая особенность ДНГ – способность точно компенсировать угловую жесткость упругих элементов подвеса инерционным моментом при выполнении условия динамической настройки [9].

Такие гироскопы нашли массовое применение в качестве чувствительного элемента в курсовых вертикалях и гиросtabilизаторах для авиации, спецтехники, автомобилестроения и добывающей промышленности [9]. В исследовании [10] представлена математическая модель собственной скорости прецессии ДНГ в режиме датчика угловой скорости, учитывающая его ориентацию в географической системе координат и реальное положение на испытательном стенде. Показано, что при отклонении платформы метод последовательного приближения позволяет определять параметры гироскопа с точностью, сопоставимой с аналитическими алгоритмами. Среди классических механических гироскопов ДНГ отличается оптимальным соотношением точности, стоимости и массогабаритных показателей [11]. По размерам, массе и стоимости ДНГ превосходит поплавковые гироскопы.

Экспериментально установлено, что вектор намагниченности ротора двигателя ДНГ вносит существенный вклад в его погрешность, которая может достигать 40 % от запуска к запуску [12]. Для функционирования ДНГ в его конструкции заложен кольцевой магнит с радиальной текстурой (КМРТ). Основное требование, предъявляемое к данным магнитам, – термическая стабильность, т. е. неизменность намагниченности при различных температурах. В противном случае потребуются применение в ДНГ устройства для стабилизации температуры, что усложнит его конструкцию. Магниты также должны иметь высокое значение коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cl}$ . Этим условиям удовлетворяют материалы системы Sm–Co, однако из них невозможно изготовить КМРТ, поскольку они разрушаются в процессе производства из-за возникновения радиальных трещин [13–16]. Это связано с тем, что при спекании за счет достаточно высокого значения коэффициента линейного теплового расширения возникают растягивающие напряжения, превышающие предел прочности материала при растяжении [17]. Именно поэтому из материалов системы Sm–Co можно изготавливать радиальные кольца для ДНГ только из отдельных сегментов (как правило, из восьми штук), что делает поле на поверхности кольца неоднородным и ухудшает точность гироскопа. При использовании материалов системы Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B эти напряжения сжимающие, поэтому их можно использовать для изготовления КМРТ [18, 19]. Хотя стоимость КМРТ в составе ДНГ незначительна относительно стоимости самого прибора, следует рассмотреть возможность изготовления магнита из неразделенной смеси неодима и празеодима. Такой подход может оказаться важным для сохранения производства в условиях нарушения поставок редкоземельных металлов. Кроме того, разделение лантаноидов – сложная задача вследствие близости их химических свойств, соответственно разделение неодима и празеодима значительно повышает их стоимость.

### **Материалы и методы**

Слитки получали в вакуумной индукционной печи. В качестве исходных материалов использовали металлы: неодим НМ-1, празеодим ПрМ-1, диспрозий ДиМ-1, кобальт К0, а также железо АРМКО первого типа. Для создания рабочего слоя тигля применяли инертную керамику на основе оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Легирование бором осуществляли, вводя в расплав ферроборную лигатуру состава  $Fe_{88,7}B_{11,3}$ . Полученный слиток подвергали дроблению в атмосфере азота до достижения фракции размером <315 мкм. Дальнейшее измельчение порошка до монокристаллического состояния проводили в мельнице, где в качестве защитной среды использовали хладон. Формование образцов выполняли методом прессования в магнитном поле напряженностью 800 кА/м. Затем спрессованные образцы спекали в вакуумной печи при температуре ~1100 °С с последующим отжигом.

Для определения плотности спеченных материалов применяли метод гидростатического взвешивания в дистиллированной воде [20].

Качественный и количественный анализ содержания основной магнитной фазы  $R_2(Fe, Co)_{14}B$  проводили с помощью микрорентгеноспектрального анализа. Используемый микроанализатор обеспечивал регистрацию элементов в диапазоне от бора ( $Z = 5$ ) до урана ( $Z = 92$ ) с локальностью анализа  $1 \text{ мкм}^2$  и глубиной проникновения  $\sim 1 \text{ мкм}$ . Магнитные характеристики измеряли на вибрационном магнитометре на образцах сферической формы. При измерении текстуру образцов направляли параллельно полю электромагнита.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Типичные кривые размагничивания исследованных материалов представлены на рис. 1. Для удобства все данные измерений представлены в таблице. Как видно из данных таблицы (строки 3–6), концентрация церия в материале коррелирует с магнитными свойствами.

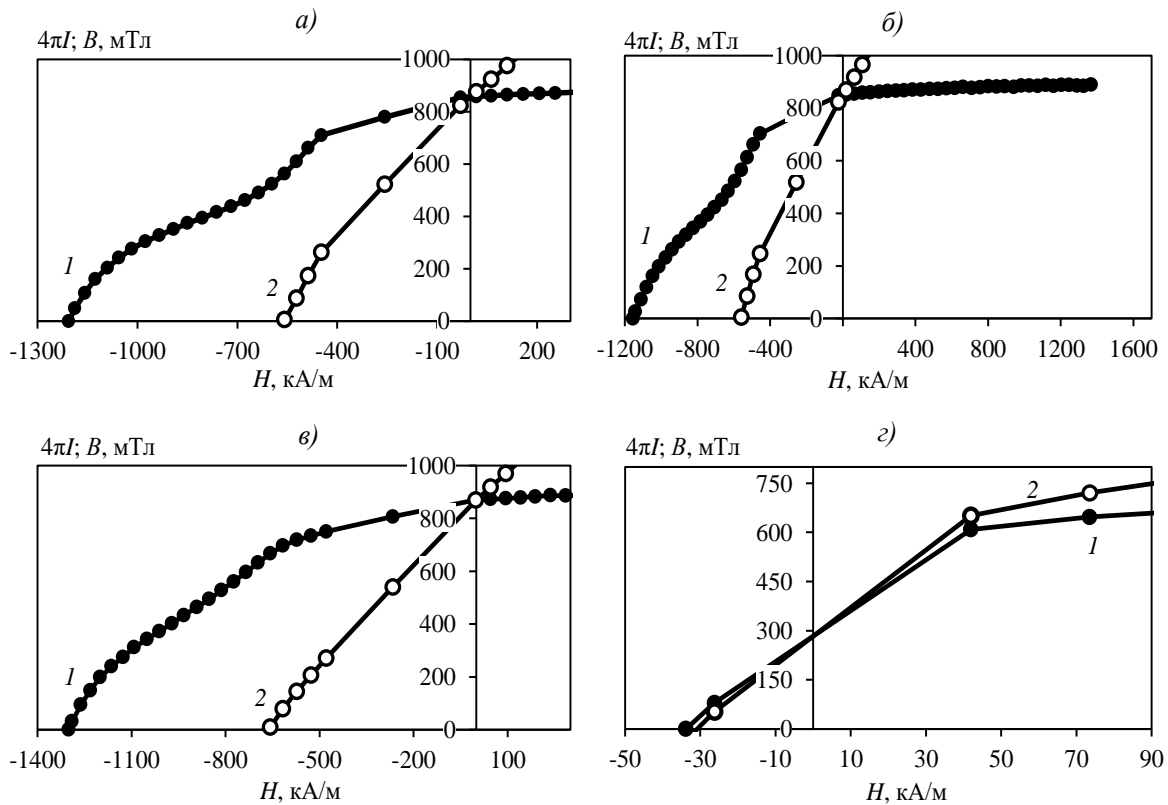


Рис. 1. Кривые размагничивания по намагниченности (1) и по индукции (2) спеченных материалов составов  $(Nd_{0,30}Pr_{0,27}Dy_{0,25}Tb_{0,04}Ce_{0,14})_{14,72}(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{79,10}B_{6,18}$  (а),  $(Nd_{0,33}Pr_{0,28}Dy_{0,25}Tb_{0,04}Ce_{0,11})_{14,61}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{79,26}B_{6,13}$  (б),  $(Nd_{0,37}Pr_{0,29}Dy_{0,25}Tb_{0,04}Ce_{0,06})_{14,39}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{79,58}B_{6,03}$  (в) и  $(Nd_{0,34}Pr_{0,27}Dy_{0,32}Ce_{0,06})_{15,28}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{79,92}B_{4,8}$  (г), измеренные при температуре  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Величина  $H_{cl}$  материала, не содержащего празеодим (строка 1), больше по сравнению с другими системами, однако все остальные характеристики значительно ухудшаются.

## Свойства исследованных материалов

Состав материала в атомных долях	Термо-обработка	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$H_{cl}$ , кА/м	$H_{cb}$ , кА/м	$H_k$ , кА/м	$B_r$ , мТл	$4\pi I_s$ , мТл	SF
(Nd <sub>0,59</sub> Dy <sub>0,41</sub> ) <sub>16,48</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>75,95</sub> B <sub>6,57</sub>	Спекание	7760	1700	470	300	570	625	0,18
(Pr <sub>0,65</sub> Dy <sub>0,35</sub> ) <sub>13,08</sub> (Fe <sub>0,76</sub> Co <sub>0,24</sub> ) <sub>78,95</sub> B <sub>7,97</sub>		7680	1114	606	390	770	820	0,35
(Nd <sub>0,30</sub> Pr <sub>0,27</sub> Dy <sub>0,25</sub> Tb <sub>0,04</sub> Ce <sub>0,14</sub> ) <sub>14,72</sub> (Fe <sub>0,79</sub> Co <sub>0,21</sub> ) <sub>79,10</sub> B <sub>6,18</sub>	Спекание + отжиг	7580	1200	550	250	850	900	0,21
(Nd <sub>0,33</sub> Pr <sub>0,28</sub> Dy <sub>0,25</sub> Tb <sub>0,04</sub> Ce <sub>0,11</sub> ) <sub>14,61</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>79,26</sub> B <sub>6,13</sub>		7530	1156	560	200	850	900	0,17
(Nd <sub>0,37</sub> Pr <sub>0,29</sub> Dy <sub>0,25</sub> Tb <sub>0,04</sub> Ce <sub>0,06</sub> ) <sub>14,39</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>79,58</sub> B <sub>6,03</sub>		7460	1300	650	300	870	900	0,23
(Nd <sub>0,39</sub> Pr <sub>0,30</sub> Dy <sub>0,25</sub> Tb <sub>0,04</sub> Ce <sub>0,03</sub> ) <sub>14,27</sub> (Fe <sub>0,80</sub> Co <sub>0,20</sub> ) <sub>79,77</sub> B <sub>5,98</sub>		7380	1100	700	300	840	905	0,27

Примечание.  $\rho$  – плотность,  $H_{cl}$  – коэрцитивная сила по намагничению,  $H_{cb}$  – коэрцитивная сила по индукции,  $4\pi I_s$  – намагниченность насыщения,  $B_r$  – остаточная индукция,  $H_k$  – магнитное поле «колена», SF – коэффициент прямоугольности кривой размагничивания.

Можно отметить, что с уменьшением концентрации церия и, соответственно, с увеличением содержания неодима возрастают только коэрцитивная сила по индукции  $H_{cb}$  и коэффициент прямоугольности кривой размагничивания SF. Плотность материала  $\rho$  уменьшается. Все остальные характеристики ( $H_{cl}$ ,  $4\pi I_s$ ,  $B_r$ ) остаются практически без изменений. Следует также учесть, что материал с неодимом содержит меньшее количество кобальта (0,21 атомных долей, как видно из таблицы), чем материал состава (Pr<sub>0,65</sub>Dy<sub>0,35</sub>)<sub>13,08</sub>(Fe<sub>0,76</sub>Co<sub>0,24</sub>)<sub>78,95</sub>B<sub>7,97</sub>. Известно, что с увеличением концентрации кобальта содержание основной магнитной фазы R<sub>2</sub>(Fe, Co)<sub>14</sub>B (фаза А) уменьшается [21, 22], а значит, снижается намагниченность, поскольку именно эта фаза определяет данный показатель материала на основе редкоземельных металлов [23]. Содержание этой фазы для материалов на основе неодима и празеодима представлено на рис. 2.

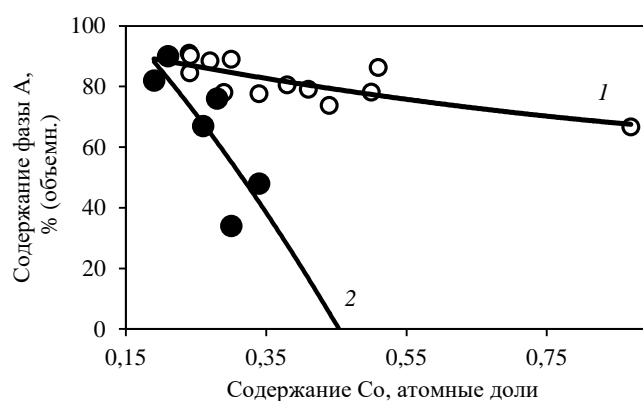


Рис. 2. Содержание основной магнитной фазы R<sub>2</sub>(Fe, Co)<sub>14</sub>B (фаза А) в спеченных материалах систем (Pr, Dy)–(Fe, Co)–В (1) и (Nd, Dy)–(Fe, Co)–В (2)

Содержание фазы А в материалах на основе празеодима значительно выше, чем в материалах на основе неодима. Возможно, это связано с меньшей скоростью диффузии в материалах на основе празеодима [24]. В работе [25] установлено, что спеченные материалы на основе празеодима имеют большую скорость уплотнения при спекании, чем материалы на основе неодима. Предполагается, что при спекании жидкая фаза в материалах на основе празеодима имеет лучшие смачивающие свойства по отношению к фазе R<sub>2</sub>(Fe, Co)<sub>14</sub>B, чем в материалах на основе неодима. Исходя из рис. 2, можно сделать вывод, что примесь неодима в данном случае вредна, и вопрос заключается только в ее допустимом количестве. Следует также обратить внимание на то, что с увеличением содержания кобальта в материалах на основе неодима резко уменьшается количество основной магнитной фазы. Между тем для термически стабильных материалов количество кобальта должно составлять не менее 1/3 от содержания железа.

### Заключения

Для навигационных приборов с высоким содержанием кобальта примесь неодима в сплаве допустима только на уровне, не превышающем ~5 атомных долей. В противном случае с увеличением содержания кобальта может резко уменьшиться количество основной магнитной фазы  $R_2(Fe, Co)_{14}B$ . Выявлено, что оптимальными магнитными свойствами обладает материал с минимальным содержанием церия. На основании результатов сравнения актуальных цен и доступности редкоземельных металлов и с учетом того, что в настоящее время они производятся в основном в КНР [26, 27], следует сделать вывод о приоритетности применения материалов на основе неодима.

*Работа выполнена в рамках тематической карты ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН 124013100858-3.*

### Список источников

1. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2018. № 4. С. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
2. Литвин М.А., Малюгина А.А., Миллер А.Б. и др. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. 2014. Т. 14. № 4. С. 326–339.
3. Смирнов В.А., Снедков А.Б. Адаптивная калибровка датчика угла гироскопа // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 85–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-85-88.
4. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 2. С. 3–10. DOI: 10.17285/0869-7035.0028.
5. Умарходжаев Р.М., Павлов Ю.В., Васильева А.Н. История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1960–2000 годы // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 1. С. 3–27. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027.
6. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалев А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 1. С. 55–80. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
7. Померанцев Н.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой гироскопии // Успехи физических наук. 1970. Т. 100. Вып. 3. С. 361–394.
8. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120–127.
9. Королев М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости // 12-я Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение–2019». М., 2019. С. 21–23.
10. Синюань Т., Подчезерцев В.П. Алгоритмы аттестации динамически настраиваемого гироскопа в условиях реальной ориентации относительно географической системы координат // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 10. С. 1–15. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1691.
11. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 1. С. 1–11. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
12. Королев М.Н., Малютин Д.М. Анализ технических характеристик чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 30–46.
13. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type Sm–Co magnets // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 476. P. 98–101.

14. Tian J., Qu X., Zhang S. Influence of heat treatment on fracture and magnetic properties of radially oriented Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> permanent magnets // Transaction Nonferrous Metallic Society China. 2007. Vol. 17. P. 491–495.
15. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)<sub>z</sub> ring magnets // Materials Letters. 2007. Vol. 61. P. 5271–5274.
16. Матусевич В.А., Гетья А.Н., Шарабан Ю.В. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в самолетных агрегатах // Электротехника и электромеханика. 2006. № 1. С. 33–35.
17. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> magnets // IEEE Transactions on Magnetics. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4402–4403.
18. Потапов М.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Свойства спеченных магнитов (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B, полученных из неочищенных редкоземельных металлов // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). С. 65–74. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.
19. Бузенков А.В., Бурканов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние легирующих элементов и технологии получения на свойства спеченных магнитов Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm) // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). С. 69–79. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-69-79.
20. Определение плотности тел гидростатическим взвешиванием: методические рекомендации. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2003. 15 с.
21. Валеев Р.А., Пискорский В.П., Королев Д.В., Моргунов Р.Б. Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). С. 58–66. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.
22. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Вклад фаз в намагниченность спеченных материалов Nd–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 60–68. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
23. Herbst J.F. R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects // Reviews of Modern Physics. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
24. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials // Journal of Alloys and Compounds. 2000. Vol. 296. P. 223–228.
25. Taylor M.G., Davies B.E., Harris I.R. A comparative study of the sintering behavior of NdFeB and PrFeB for permanent magnet applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. Vol. 242–245. P. 1375–1377.
26. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
27. Крюков Я.В., Самсонов Н.Ю., Яценко В.А. Российская редкоземельная промышленность: следует ли перенять опыт Китая? // ЭКО. 2018. № 10 (532). С. 138–152. DOI: 10.30680/ЭСО0131-7652-2018-10-138-152.

### References

1. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. Experimental assessment of permissible mechanical effects on a dynamically tuned gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroenie*, 2018, no. 4, pp. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
2. Litvin M.A., Malyugina A.A., Miller A.B. et al. Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation. *Informatsionnye protsessy*, 2014, vol. 14, no. 4. pp. 326–339.
3. Smirnov V.A., Snedkov A.B. Adaptive Calibration of a Gyroscope Angle Sensor. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2021, no. 3 (177), pp. 85–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-85-88.
4. Peshekhonov V.G. Gyroscopy Development Prospects. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3–10. DOI: 10.17285/0869-7035.0028.

5. Umarkhodzhaev R.M., Pavlov Yu.V., Vasilyeva A.N. History of the Development of a Gyroscope Based on Nuclear Magnetic Resonance in Russia in the 1960s–2000s. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 3–27. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027.
6. Vershovskiy A.K., Litmanovich Yu.A., Pazgalev A.S., Peshekhonov V.G. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: Limiting Characteristics. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 55–80. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
7. Pomerantsev N.M., Skrotsky G.V. Physical Foundations of Quantum Gyroscopy. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1970, vol. 100, is. 3, pp. 361–394.
8. Martynenko Yu.G. Trends in the Development of Modern Gyroscopy. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1997, no. 11, pp. 120–127.
9. Korolev M.N. Study of Technical Characteristics of Modern Types of Angular Rate Sensors. *12th Int. Sc. and Tech. Conf. «Instrument Engineering–2019»*. Moscow, 2019, pp. 21–23.
10. Xinyuan T., Podchezertsev V.P. Algorithms for Certification of a Dynamically Tuned Gyroscope under Conditions of Real Orientation Relative to a Geographic Coordinate System. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, is. 10, pp. 1–15. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1691.
11. Korolev M.N., Malyutin D.M. Analysis of technical characteristics of sensitive elements of indicator gyroscopic stabilizers. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, is. 8, pp. 30–46.
12. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from launch to launch. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, is. 1, pp. 1–11. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
13. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type Sm–Co magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 476, pp. 98–101.
14. Tian J., Qu X., Zhang S. Influence of heat treatment on fracture and magnetic properties of radially oriented Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> permanent magnets. *Transaction Nonferrous Metallic Society China*, 2007, vol. 17, pp. 491–495.
15. Tian J., Qu X., Zhang S. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)<sub>z</sub> ring magnets. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, pp. 5271–5274.
16. Matusevich V.A., Getya A.N., Sharaban Yu.V. Application of high-coercivity permanent magnets in aircraft units. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2006, no. 1, pp. 33–35.
17. Li A., Li W., Wang H. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4402–4403.
18. Potapov M.V., Valeev R.A., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Properties of sintered magnets (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B obtained from unrefined rare earth metals. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 65–74. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.
19. Buzenkov A.V., Burkanov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P. Influence of alloying elements and production technology on the properties of sintered magnets Pr(Nd)–Dy(M)–Fe–Co–B (M: Tb, Ce, Sm). *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), pp. 69–79. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-69-79.
20. *Determination of the density of bodies by hydrostatic weighing: methodological recommendations*. Irkutsk: Irkutsk State Univ., 2003, 15 p.
21. Valeev R.A., Piskorsky V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 58–66. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-58-66.
22. Valeev R.A., Piskorsky V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 60–68. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
23. Herbst J.F. R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.

24. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 223–228.
25. Taylor M.G., Davies B.E., Harris I.R. A comparative study of the sintering behavior of NdFeB and PrFeB for permanent magnet applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 242–245, pp. 1375–1377.
26. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
27. Kryukov Ya.V., Samsonov N.Yu., Yatsenko V.A. Russian Rare Earth Industry: Should We Learn from China's Experience? *ECO*, 2018, no. 10 (532), pp.138–152. DOI: 10.30680/ЭСО0131-7652-2018-10-138-152.

*Информация об авторах*

**Пискорский Вадим Петрович**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Потапов Максим Викторович**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Валеев Руслан Анверович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Бузенков Александр Владимирович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Моргунов Роман Борисович**, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru; профессор, ТГТУ, tstu@tstu.ru

*Information about the authors*

**Vadim P. Piskorsky**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Maksim V. Potapov**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Ruslan A. Valeev**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Aleksander V. Buzenkov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Roman B. Morgunov**, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, FRC PCPMC RAS, office@icp.ac.ru; Professor, TSTU, tstu@tstu.ru

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.12.2025.  
The article was submitted 11.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 15.12.2025.