ДВУХМОДАЛЬНЫЙ КОНТРАСТНЫЙ АГЕНТ ДЛЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ОРТОФЕРРИТА ГАДОЛИНИЯ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

© *Албади Ямен,[а,б,*] Попков Вадим Игоревич[а,в]*

[а] Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). 190013, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26. E-mail: albadi.yamen@gmail.com

[б] Университет Аль-Баас. 77, Хомс, Сирийская Арабская Республика

[в] Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе. 194021, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 26

Ключевые слова: ортоферрит гадолиния; наночастицы; коллоидные растворы; магнитно-резонансная томография; контрастные агенты

Введение. Действие контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии (МРТ) основано на их способности изменять времена релаксации T_1 и T_2 протонов воды. T_1-контрастные агенты приводят к гиперинтенсивным (позитивным) сигналам, а T_2-контрастные агенты — к гипоинтенсивным (негативным) сигналам на *МРТ* изображениях. Несмотря на то, что почти все контрастные агенты для МРТ влияют и на T_1 и на T_2 времена релаксации, их действие обычно более выражено только в позитивном или негативном режиме МРТ диагностики; такие контрастные агенты называются одномодальными.[1] Однако некоторые вещества за счёт особенностей своего состава и строения способны проявлять гибридное контрастное действие и оказывают влияние как на позитивную, так и негативную МРТ картины.[2] Двухмодальные (гибридные) контрастные агенты объединяют преимущества одномодальных контрастных агентов и способствуют повышению точности диагностики, которая проводится в T_1 и T_2 режимах в рамках одной процедуры МРТ исследования.[3] Поэтому разработка МРТ контрастных агентов нового поколения является важной научной и практической задачей.

Цель исследования. Данная работа направлена на разработку гибридного контрастного агента на основе наночастиц ортоферрита гадолиния ($GdFeO_3$), который содержит в своём составе как гадолиний (Gd^{3+}), так и железо [Fe^{3+}],[4] которые обеспечивают T_1- и T_2-контрастное действие, соответственно. Целью работы является получение наночастиц $GdFeO_3$ и коллоидных растворов на их основе, изучение особенностей строения полученных объектов и исследование их T_1 и T_2 контрастных характеристик.

Материалы и методы. Синтез наночастиц $GdFeO_3$ был проведён методом обратного соосаждения гидроксидов гадолиния и железа(III) с их последующей термической обработкой на воздухе.[5] Соосаждённые гидроксиды были исследованы методами рентгеноспектрального микроанализа, синхронного термического анализа, рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии. После термической обработки соосаждённых гидроксидов при 750°C в течение 4 часов на воздухе полученные наночастицы ортоферрита гадолиния были переведены в коллоидный раствор путём ультразвуковой обработки их водной суспензии с последующим центрифугированием.

Результаты. Состав полученного вещества по основным элементам соответствовал $GdFeO_3$. Методом синхронного термического анализа была установлена оптимальная температура обработки соосаждённых гидроксидов — 750°C, а также механизм их формирования. По данным рентгеновской дифракции, соосаждённые гидроксиды были рентгеноаморфными, а продукт термической обработки соответствовал ромбическому ортоферриту гадолиния (o-$GdFeO_3$) с небольшой примесью кубического феррита-граната гадолиния (c-$Gd_3Fe_5O_{12}$). Полученные нанокристаллы ортоферрита гадолиния имеют изометрическую морфологию и их средний размер составляет около 30 нм.

Заключение.и выводы. Контрастные характеристики наночастиц ортоферрита гадолиния в коллоидных растворах будут оцени-

ваться на основании измерений времён релаксации T_1 и T_2 протонов воды с использованием ^{1}H ядерной магнитно-резонансной (ЯМР) спектроскопии. На основании результатов проведённой работы обсуждается возможность и перспективы практического использования разработанных двухмодальных контрастных агентов.

Список литературы.

1. Estelrich, J. Nanoparticles in magnetic resonance imaging: from simple to dual contrast agents / J. Estelrich, M. J. Sánchez-Martín, M. A. Busquets. — *International Journal of Nanomedicine*, 10, 2015. — p. 1727–1741.
2. Szpak, A. T_1-T_2 Dual-modal MRI contrast agents based on superparamagnetic iron oxide nanoparticles with surface attached gadolinium complexes / A. Szpak [et al.] — *Journal of Nanoparticle Research*, 16(11):2678, 2014.
3. De, M. Hybrid magnetic nanostructures (MNS) for magnetic resonance imaging applications / M. De [et al.] — *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63(14–15), 2011. — p. 1282–1299.
4. Gimaztdinova M. M. Synthesis of $GdFeO_3$ nanocrystals via glycine-nitrate combustion / M. M. Gimaztdinova [et al.] — *Condensed Phases and Interfaces*, 18(3), 2016. — p. 422–431.
5. Popkov, V. I. The formation of nanocrystalline orthoferrites of rare-earth elements $XFeO_3$ (X = Y, La, Gd) via heat treatment of co-precipitated hydroxides / V. I. Popkov [et al.] — *Russian Journal of General Chemistry*, 87(11), 2017. — p. 2516–2524.