

05

Намагниченность и критическая плотность тока сверхпроводящих гранул, допированных наночастицами NiO

© Д.М. Гохфельд, С.В. Семёнов, М.И. Петров

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
E-mail: gokhfeld@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 17 октября 2025 г.

В окончательной редакции 12 ноября 2025 г.

Принято к публикации 17 ноября 2025 г.

Синтезирована серия объемных сверхпроводящих образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO), допированных антиферромагнитными наночастицами NiO. Образцы подвергались высокотемпературному отжигу в течение 18 h. Для образцов YBCO, допированных наночастицами со средним размером 8, 12 и 23 нм, проведено сравнение характерных величин ΔM петель магнитного гистерезиса и установлен оптимальный размер наночастиц NiO. Исследовано влияние концентрации наночастиц NiO со средним размером 8 нм на петли магнитного гистерезиса YBCO и критическую плотность тока при $T = 4.2$ К. Максимальное увеличение критической плотности внутргранулярных токов достигается при добавлении 0.5 wt.% наночастиц NiO.

Ключевые слова: магнитный гистерезис, магнитный пиннинг, RE-123, твердофазный синтез, гранулярный сверхпроводник, критическая плотность тока.

DOI: 10.21883/0000000000

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты второго поколения на основе $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ представляют собой ключевой материал для современных энергетических и исследовательских установок из-за способности переносить критические токи в тысячи ампер при температурах ниже 20 К в сильных магнитных полях [1–4]. Планирующиеся мегапроекты ускорителей частиц и термоядерных реакторов выдвигают все более растущие требования к токонесущей способности сверхпроводников [5]. Применяемой стратегией увеличения пиннинга магнитного потока и критической плотности тока является внедрение искусственных центров пиннинга на этапе роста [6–8], замена редкоземельного элемента или изменение его стехиометрии [9] и облучение лент различными ионами [10,11]. Внедрение магнитных наночастиц в сверхпроводник может быть наиболее эффективным методом увеличения пиннинга [12–15], так как магнитные дефекты обеспечивают существенно более сильное взаимодействие с вихрями Абрикосова по сравнению с немагнитными центрами пиннинга. Технология магнитного пиннинга для сверхпроводящих лент второго поколения в настоящее время не освоена. Основными проблемами являются внедрение магнитных наночастиц в многослойную структуру лент и минимизация возможного негативного влияния на сверхпроводящий слой.

Некоторые особенности влияния магнитных наночастиц на свойства сверхпроводников могут быть исследованы с использованием доступной технологии твердофазного синтеза. Ранее мы определили, что при быстром спекании порошка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) с наночастицами $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и NiO удается получить образцы с увеличенной критической плотностью внутргранулярного тока [16,17]. Так как данный метод может не подходить

для внедрения в технологию приготовления 2G-лент, необходимо рассмотреть пути увеличения магнитного пиннинга при длительном отжиге образцов.

Исследования свойств допированных наночастицами сверхпроводников в работах [16,17] проводились при температуре кипения азота. Однако эффективность использования высокотемпературных сверхпроводников значительно возрастает при температурах 4.2–20 К. При этих температурах длина когерентности и эффективный размер центров пиннинга меньше, чем при 77 К. Следовательно, увеличение пиннинга может быть достигнуто при использовании наночастиц меньшего размера.

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния концентрации ультрамалых антиферромагнитных наночастиц NiO на критическую плотность тока сверхпроводящих гранул в поликристаллическом YBCO при $T = 4.2$ К.

Синтез $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ проводился по стандартной технологии твердофазного синтеза из порошков Y_2O_3 , BaCO_3 и CuO . Наночастицы NiO со средними размерами 8, 12 и 23 нм приготовлены в Институте катализа СО РАН [18]. Размер наночастиц NiO определен в работе [18] на основе микрофотографий, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Для приготовления образцов в диспергированный в спирте порошок YBCO добавлялась спиртовая взвесь наночастиц. Затем спирт выпаривался при слабом нагреве на плите. Сухой порошок тщательно перетирался и подвергался гидростатическому прессованию (~ 100 МПа). Полученные прессованные таблетки нагревались в печи до температуры 920 °С и отжигались при этой температуре в течение 18 h. Затем образцы выдерживались 10 h при температуре 400 °С.

Приготовлена серия образцов с различным содержанием наночастиц NiO от 0 до 6 wt.% ($0 \leq x \leq 0.06$). Температура начала сверхпроводящего перехода, выше которой намагниченность M становится положительной, для всех образцов одинакова: $T_c \approx 93$ К. Измерения петель магнитного гистерезиса проводились на вибрационном магнитометре, созданном в лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН, в диапазоне магнитных полей ± 7 Т при $T = 4.2$ К.

Сравнение петель магнитного гистерезиса для образцов YBCO с 1 wt.% наночастиц с размером 8, 12 и 23 нм позволило выбрать размер наночастиц NiO, при котором обеспечивается наиболее эффективный пиннинг магнитного потока при $T = 4.2$ К. Величина захваченного магнитного потока пропорциональна расстоянию между ветвями петель магнитного гистерезиса при возрастании и убывании поля (ΔM). Значения ΔM в поле $H = 0$ для образцов с разными размерами наночастиц NiO приведены в табл. 1.

В образце YBCO с размером наночастиц NiO 23 нм наблюдалось уменьшение ΔM в 1.1 раза по сравнению с величиной ΔM для недопированного YBCO. В образце YBCO с размером NiO 12 нм рост ΔM в сравнении с недопирированным YBCO составлял менее 2 %. В образце YBCO с размером наночастиц NiO 8 нм происходило увеличение ΔM в 1.1 раза в сравнении с недопирированным YBCO. Дальнейшее исследование влияния концентрации наночастиц NiO на намагниченность и критическую плотность тока проводилось для образцов YBCO, допированных наночастицами NiO со средним размером 8 нм.

На рис. 1, *a* показаны петли магнитного гистерезиса образцов, измеренные при температуре $T = 4.2$ К. Зависимость ΔM от массовой доли наночастиц x приведена на рис. 1, *b*. Максимальное значение ΔM , превышающее в 1.4 раза величину ΔM для недопирированного YBCO, наблюдается для образца с $x = 0.005$. Выше критической температуры сверхпроводника ($T_c = 93$ К) зависимости $M(H)$ для всех образцов обратимые, так что учета магнитных вкладов при анализе сверхпроводящего гистерезиса не требуется.

Плотность критического тока определялась по формуле $J_c(H) = 3\Delta M(H)/D$, где D — характерный масштаб циркуляции токов. В поликристаллических сверхпроводниках значение D определяется размерами гранул и параметрами их распределения [19–21]. Также размер D можно оценить из асимметрии петель гистерезиса намагниченности [22]. Значения намагниченности при увеличении поля M^+ по модулю больше значений намагниченности при уменьшении поля M^- . Асимметрия намагничивания вызвана равновесной намагниченностью приповерхностного слоя с глубиной λ . Значение масштаба циркуляции тока определялось по формуле $D \approx 2\lambda/[1 - (\Delta M/2|M_m^-|)^{1/3}]$, где M_m^- — минимальное значение намагниченности, т.е. максимальная величина диамагнитного сигнала. В вычислениях использовалось значение $\lambda = 0.15$ мкм. Для недопирированного YBCO получено значение $D = 4.2$ мкм. При увеличении доли NiO величина D растет до 6.8 мкм для $x = 0.001$, а затем уменьшается до 6.1 мкм для $x = 0.06$. Отметим, что значения D одинаковы для образцов, допированных наночастицами разного размера с $x = 0.01$.

Таблица 1. Значения ΔM при допирировании YBCO наночастицами NiO разного размера ($x = 0.01$)

| Образец | ΔM , emu/g ($H = 0$) |
|-----------------------|--------------------------------|
| Недопирированный YBCO | 35.2 |
| YBCO + 23 нм NiO | 31.9 |
| YBCO + 12 нм NiO | 35.8 |
| YBCO + 8 нм NiO | 38.9 |

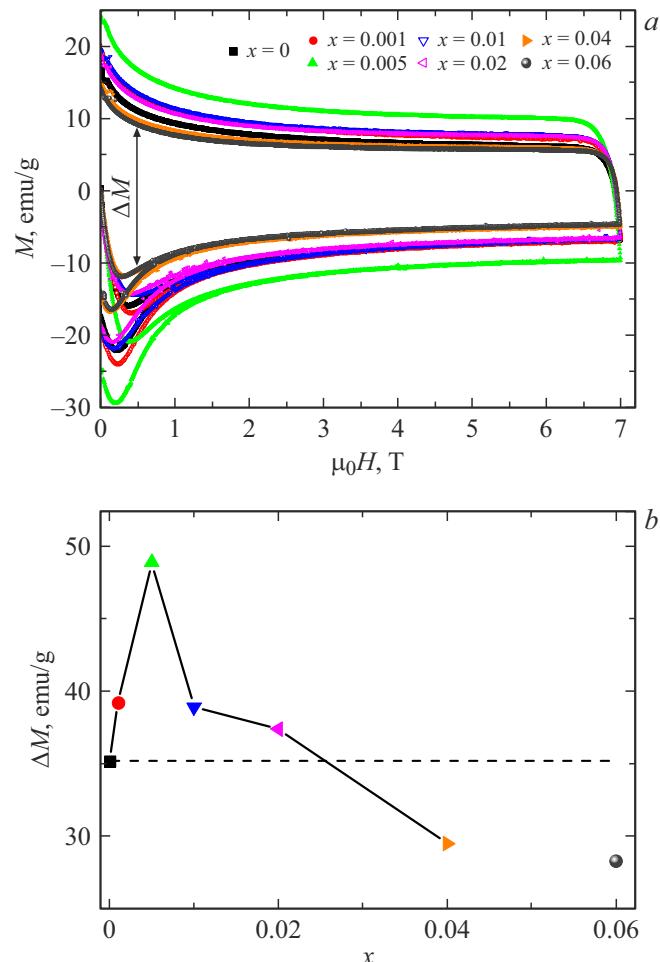


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса образцов с различным содержанием наночастиц при $T = 4.2$ К (*a*) и зависимость ΔM в поле $H = 0$ от x (*b*). Штриховой линией отмечено значение ΔM для недопирированного YBCO. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

В табл. 2 приведены полученные значения D и величины J_c в полях 0 и 6 Т. Погрешность определения J_c составляет около $\pm 10^5$ А/см². Зависимости критической плотности тока образцов от магнитного поля приведены

Таблица 2. Параметры образцов, оцененные на основе петель магнитного гистерезиса

| x | ΔM , emu/g ($H = 0$) | D , μm | $J_c, 10^6 \text{ A/cm}^2$ | |
|-------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| | | | $H = 0$ | $\mu_0 H = 6 \text{ T}$ |
| 0 | 35.2 | 4.2 | 16.0 | 6.0 |
| 0.001 | 39.2 | 4.5 | 16.6 | 6.1 |
| 0.005 | 48.9 | 5.6 | 17.1 | 6.9 |
| 0.01 | 38.9 | 6.8 | 10.9 | 4.1 |
| 0.02 | 37.4 | 6.7 | 10.5 | 4.0 |
| 0.04 | 29.5 | 6.6 | 8.5 | 3.2 |
| 0.06 | 28.3 | 6.1 | 8.9 | 3.3 |

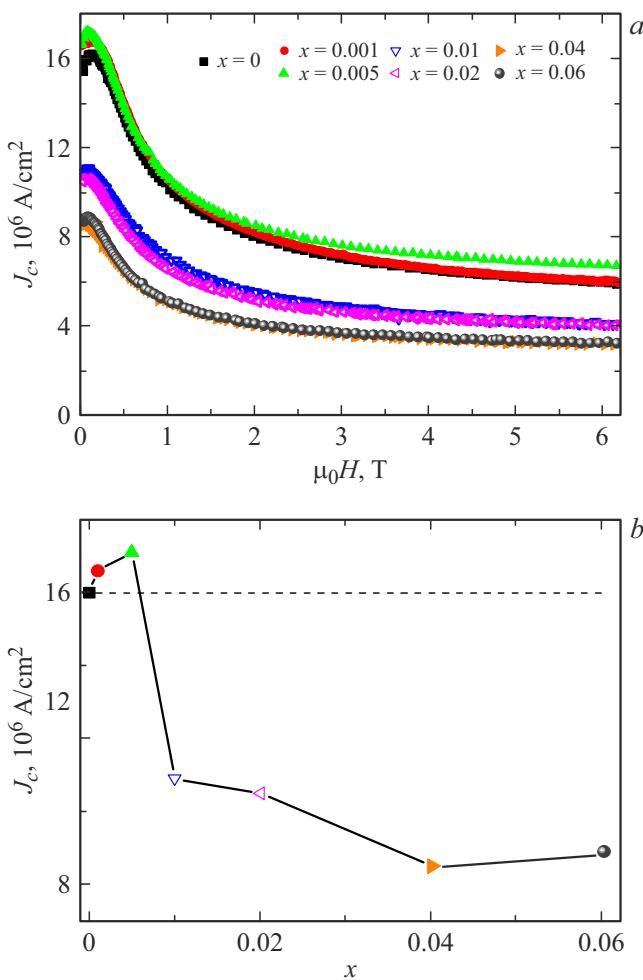


Рис. 2. Зависимости критической плотности тока от магнитного поля при $T = 4.2 \text{ K}$ (a) и зависимость J_c в $H = 0$ от x (b). Штриховой линией отмечено значение J_c для недопированного YBCO. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

на рис. 2, a. На рис. 2, b показано изменение J_c в $H = 0$ при увеличении x .

Как и ожидалось из данных ΔM , для образца, допированного 0.5 wt.% NiO (8 nm), наблюдается максимальное

значение J_c . Однако значение J_c для этого образца лишь в 1.07 раза больше, чем для недопированного YBCO. Для образцов, допированных 1 wt.% NiO и более, наблюдается уменьшение критической плотности тока по сравнению с недопированным YBCO. В сильных магнитных полях (6 Т) значение J_c для образца, допированного 0.5 wt.% NiO (8 nm), в 1.15 раза больше, чем для недопированного YBCO. К увеличению критической плотности тока приводит рост поверхностного пиннинга из-за наночастиц NiO на поверхности гранул, а также дополнительные дефекты в кристаллической решетке YBCO, вызванные внедрением Ni [12,15].

Во многих экспериментальных работах увеличение ΔM становится основанием для вывода о перспективности допирования данным видом наночастиц для увеличения критической плотности тока. Однако, как мы показали в нашем исследовании, увеличение ΔM может не коррелировать с изменением J_c . Таким образом, корректное сравнение J_c для разных сверхпроводящих образцов требует учета характерных структурных размеров этих образцов [20,21].

В заключение отметим, что обнаружено значительное увеличение ΔM (в 1.4 раза) при допировании YBCO ультрамалыми наночастицами NiO (8 nm) с концентрацией 0.5 wt.%. Размер сверхпроводящих гранул увеличивается в 1.3 раза, а критическая плотность внутригранульного тока в данном допированном образце увеличивается в 1.07 раза в нулевом поле и в 1.15 раза в сильных магнитных полях.

Благодарности

Авторы благодарят В.Л. Кириллова и О.Н. Мартынова за синтез наночастиц NiO, Д.А. Балаева и А.А. Дубровского за стимулирующие обсуждения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00053 (<https://rscf.ru/project/24-22-00053/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Molodyk, S. Samoilov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A.E. Pantoja, S.C. Wimbush, N.M. Strickland, A. Vasiliev, *Sci. Rep.*, **11**, 2084 (2021).
DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z

- [2] И.В. Анищенко, С.В. Покровский, М.А. Осипов, Д.А. Абин, Д.И. Грицаенко, И.А. Руднев, Письма в ЖТФ, **47** (19), 22 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51508.18828 [I.V. Anischenko, S.V. Pokrovskii, M.A. Osipov, D.A. Abin, D.I. Gritsaenko, I.A. Rudnev, Tech. Phys. Lett., **48** (13), 43 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.13.53352.18828].
- [3] В.В. Гурьев, В.Е. Крылов, И.В. Куликов, И.М. Абдуханов, М.В. Алексеев, Ю.Н. Белотелова, П.В. Коновалов, П.А. Лукьянов, М.В. Мальцева, С.Н. Николаев, С.В. Шавкин, ФТТ, **66** (12), 2082 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59565.6507PA [V.V. Guriev, V.E. Krylov, I.V. Kulikov, I.M. Abdyukhanov, M.V. Alekseev, Yu.N. Belotelova, P.V. Konovalov, P.A. Lukyanov, M.V. Maltseva, S.N. Nikolaev, S.V. Shavkin, Phys. Solid State, **66** (12), 1994 (2024). DOI: 10.61011/PSS.2024.12.60171.6507PA].
- [4] D. Abraimov, J. Gillman, C. Zha, Y. Oz, H. Pimentel, S. Mao, J. Kvitkovic, G. Bradford, J. Lee, J. Jaroszynski, N. Bishop, Y. Zhang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **35**, 8000507 (2025). DOI: 10.1109/TASC.2025.3549409
- [5] H.S. Ruiz, J. Hänisch, M. Polichetti, A. Galluzzi, L. Gozzelino, D. Torsello, S. Milošević-Govedarović, J. Grbović-Novaković, O.V. Dobrovolskiy, W. Lang, G. Grimaldi, A. Crisan, P. Badica, A.M. Ionescu, P. Cayado, R. Willa, B. Barbiellini, S. Eley, A. Badía-Majós, Prog. Mater. Sci., **155**, 101492 (2026). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101492
- [6] K. Tsuchiya, X. Wang, S. Fujita, A. Ichinose, K. Yamada, A. Terashima, A. Kikuchi, Supercond. Sci. Technol., **34**, 105005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/AC1E65
- [7] J. Wu, M. Panth, V. Ogunjimi, B. Gautam, J. Shi, M.A. Sebastian, T. Haugan, C. Ebbing, D. Zhang, J. Jian, J. Huang, Y. Zhang, H. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **33**, 8000908 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3254489
- [8] T.-X. Wang, D.-X. Huang, F.-Z. Ding, H. Dong, H. Yu, C.-C. Dun, H.-W. Gu, CMat, **1**, e12 (2024). DOI: 10.1002/CMT.212
- [9] Б.И. Массалимов, В.А. Власенко, А.Р. Прищепа, П.Н. Дегтяренко, Е.М. Иванова, А.В. Садаков, Письма в ЖЭТФ, **121** (10), 833 (2025). DOI: 10.31857/S0370274X25050198 [B.I. Massalimov, V.A. Vlasenko, A.R. Prishchepa, P.N. Degtyarenko, E.M. Ivanova, A.V. Sadakov, JETP Lett., **121** (10), 794 (2025). DOI: 10.1134/S0021364025606116].
- [10] И.А. Руднев, А.И. Подливаев, Д.А. Абин, С.В. Покровский, А.С. Стариковский, Р.Г. Батулин, П.А. Федин, К.Е. Прянишников, Т.В. Кулевой, ФТТ, **65** (3), 386 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.03.54735.540 [I.A. Rudnev, A.I. Podlivaev, D.A. Abin, S.V. Pokrovskii, A.S. Starikovskii, R.G. Batulin, P.A. Fedin, K.E. Prianishnikov, T.V. Kulevoy, Phys. Solid State, **65** (3), 379 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.03.55577.540].
- [11] П.Н. Дегтяренко, В.А. Скуратов, А.Л. Васильев, А.В. Овчаров, А.М. Петржик, В.К. Семина, С.Ю. Гаврилкин, М.С. Новиков, А.Ю. Малявина, В.А. Амеличев, А.Ю. Цветков, ЖЭТФ, **165** (6), 827 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024060099
- [12] Y. Zhao, C.H. Cheng, J.S. Wang, Supercond. Sci. Technol., **18**, S43 (2005). DOI: 10.1088/0953-2048/18/2/010
- [13] R.A. Algarni, Y. Slimani, E. Hannachi, M.A. Almessiere, T.M. Alqahtani, F.B. Azzouz, J. Mater. Sci. Mater. Electron., **34**, 1529 (2023). DOI: 10.1007/s10854-023-10921-w
- [14] А.Н. Максимова, И.А. Руднев, В.А. Каширников, А.Н. Мороз, ФТТ, **65** (4), 531 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55287.500 [A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, I.A. Kashurnikov, A.N. Moroz, Phys. Solid State, **65** (4), 517 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.04.55989.500].
- [15] R. Kandari, M. Dahiya, M. Faraz, N. Khare, J. Supercond. Nov. Magn., **38**, 37 (2025). DOI: 10.1007/s10948-024-06885-5
- [16] С.В. Семенов, Д.М. Гохфельд, М.И. Петров, Т.Д. Балаев, М.С. Молоекев, И.В. Немцев, В.Л. Кириллов, О.Н. Мартыянов, ФТТ, **66** (12), 2230 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59601.277 [S.V. Semenov, D.M. Gokhfeld, M.I. Petrov, T.D. Balaev, M.S. Molokeev, I.V. Nemtsev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, Phys. Solid State, **66** (12), 2135 (2024). DOI: 10.61011/PSS.2024.12.60207.277].
- [17] D.M. Gokhfeld, S.V. Semenov, M.I. Petrov, I.V. Nemtsev, M.S. Molokeev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, arXiv:2510.14322 [cond-mat.supr-con]. DOI: 10.48550/arXiv.2510.14322
- [18] S.I. Popkov, A.A. Krasikov, A.A. Dubrovskiy, M.N. Volochaev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, D.A. Balaev, J. Appl. Phys., **126**, 103904 (2019). DOI: 10.1063/1.5109054
- [19] D.M. Gokhfeld, J. Supercond. Nov. Magn., **36**, 1089 (2023). DOI: 10.1007/s10948-023-06575-8
- [20] К.С. Пигальский, А.А. Вишнев, Н.Н. Ефимов, П.Н. Васильев, А.В. Шабатин, Л.И. Трахтенберг, ЖЭТФ, **166** (8), 246 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024080108
- [21] K.S. Pigalskiy, A.A. Vishnev, N.N. Efimov, A. V. Shabatin, L.I. Trakhtenberg, Ceram. Int., **51**, 11037 (2025). DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2024.12.523
- [22] Д.М. Гохфельд, Письма в ЖТФ, **45** (2), 3 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47212.17553 [D.M. Gokhfeld, Tech. Phys. Lett., **45** (1), 1 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010243].