

Взаимодействие магнонных Бозэ конденсатов в пленках железо-иттриевого граната через акустическую связь

Г. А. Князев^{ID+*}, А. Н. Кузмичев^{ID+}, П. Е. Петров^{ID+*}, П. М. Ветошко^{ID+×°}, В. И. Белотелов^{ID+×*},
Ю. М. Буньков^{ID+1)}

⁺Российский квантовый центр, 143025 Сколково, Москва, Россия

^{*}Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

[×]Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, 295007 Симферополь, Россия

[°]Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 сентября 2023 г.

После переработки 21 сентября 2023 г.

Принята к публикации 21 сентября 2023 г.

Экспериментально исследовано возбуждение магнонного Бозэ конденсата в пленке железо-иттриевого граната через акустическую связь с конденсатом во втором образце. Показана нелинейная природа этого возбуждения. Предположено образование фононного Бозе конденсата в подложке. Данный эксперимент открывает возможности для создания кубитов на основе Бозэ конденсатов, которые взаимодействуют акустически.

DOI: 10.31857/S1234567823200119, EDN: orlkyc

Исследования когерентного квантового состояния вещества имеют фундаментальное значение. Они проявляются в первую очередь в таких явлениях, как электронная сверхпроводимость и массовая сверхтекучесть. Непосредственно Бозе конденсация наблюдалась в разряженном газе атомов [1, 2], а также фотонов [3–5]. Кроме частиц, макроскопические квантовые состояния могут образовывать и квазичастицы – магноны [6], фононы [7], ротонны [8], экситоны [9], поляритоны [10], связанные экситон-поляритонные состояния [11] и т.д. В состоянии Бозе-Эйнштейновской конденсации макроскопическое число квазичастиц находится в едином квантовом состоянии. Оно возникает при возбуждении достаточного числа неравновесных квазичастиц и определяется известной формулой Бозе конденсации, в которую входят плотность, температура и масса квазичастиц.

Впервые сверхтекучее состояние квазичастиц – магнонов было обнаружено в 1984 г. в антиферромагнитном сверхтекучем $^3\text{He-B}$ [12–14]. Бозе конденсация магнонов (МБЭК) была обнаружена по спонтанному восстановлению их когерентности после расфазировки в сильно неоднородном магнитном поле [15, 16]. Сверхтекучие свойства МБЭК были также подтверждены экспериментально и детально ис-

следованы [17, 18]. Несмотря на то, что $^3\text{He-B}$ является сверхтекучей жидкостью, явление магнонной сверхтекучести связано непосредственно с магнитными свойствами этого антиферромагнетика, а не с его массовой сверхтекучестью. Поэтому аналогичные явления можно наблюдать и в твердотельных магнетиках, где подвижность магнонов осуществляется за счет их взаимодействия.

Образование аналогичного магнонного БЭК и спиновой сверхтекучести в твердотельных магнетиках было предсказано в системах со связанной ядерно-электронной прецессией в антиферромагнетиках [19] и обнаружено в CsMnF_3 [20] и MnCO_3 [21–24]. Настоящим прорывом стало обнаружение аналогичного явления в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) при комнатной температуре [25, 26]. Магноны в пленках ЖИГ, намагниченных перпендикулярно плоскости образца, имеют минимум энергии при волновом векторе k , равном нулю. Они также характеризуются взаимодействием отталкивания, как и в $^3\text{He-B}$. Поэтому МБЭК образуется стационарными магнонами, как и в атомарном БЭК. Назовем его БЭК атомарного типа.

Кроме этого, другой тип Бозе конденсации магнонов был обнаружен в пленках ЖИГ, намагниченных в плоскости. В этом случае минимум энергии соответствует магнонам с ненулевым вектором k . При достаточной плотности возбужденных магнонов они

¹⁾e-mail: y.bunkov@rqc.ru

образуют Бозе конденсаты с $+k_{\min}$ и $-k_{\min}$ [27–29]. Вопрос о существовании магнной сверхтекучести в этом случае остается открытым, так как не была исследована ни длина когерентности, ни критическая величина сверхтекучего тока магненов. В данной статье мы будем рассматривать только атомарный тип МБЭК, в котором минимум энергии соответствует квазичастицам с нулевым импульсом.

В связи с тем, что магны являются квазичастицами в магнитоупорядоченных системах, их равновесная плотность определяется температурой системы. При этом она всегда меньше, чем концентрация магненов, необходимая для Бозе конденсации. Однако их плотность можно существенно увеличить путем возбуждения неравновесных магненов. Критическая концентрация магненов для образования МБЭК для различных систем может быть вычислена из параметров спектра магненов. Так, для рассматриваемой в данной статье системы, состоящей из пленки ЖИГ, намагниченной перпендикулярно поверхности, критическая плотность магненов соответствует динамическому отклонению намагниченности на угол 2.5° [30]. В системе неравновесных магненов роль плотности частиц $\mathcal{N}$ играет проекция полного спина на направление внешнего магнитного поля S_z . Возбуждение неравновесных магненов приводит к уменьшению продольной намагниченности системы S_z на величину, пропорциональную $1 - \cos \beta$, где β – угол динамического отклонения равновесной намагниченности [31, 32]. Взаимодействие между магнами приводит к сдвигу частоты прецессии от ларморовской на величину $\Delta\omega$, которая определяет длину когерентности и критическую скорость сверхтекучего тока магненов [31, 32].

Большим достоинством магнной сверхтекучести является то, что данное состояние с отклоненной и прецессирующей намагниченностью является основным состоянием системы при заданной плотности магненов. Поэтому его можно поддерживать непрерывно, возмещая испаряющиеся магны внешней накачкой. При этом новые возбужденные магны рождаются в состоянии уже существующего Бозе конденсата [33]. Более того, частота радиочастотной (РЧ) накачки определяет химический потенциал и соответствующую плотность неравновесных магненов [6, 34]. Сканируя частоту (или магнитное поле) при постоянной РЧ накачке, возможно изменять плотность магненов в конденсате [35].

Основным каналом релаксации магненов в пленках ЖИГ является возбуждение фононов в подложке [36]. Скорость релаксации магненов существенно ускоряется при условии, что частота магнитного ре-

зонанса совпадает с частотой акустической моды на толщине подложки [37]. Однако в данном исследовании был также обнаружен эффект антирезонанса, при котором скорость релаксации магненов существенно замедлялась, когда их частота совпадала с серединой частот стоячих акустических мод, что говорит о когерентности магнон-фононного взаимодействия. Поэтому целью данного исследования является изучение взаимодействия магненов в удаленных образцах за счет возбужденных фононов подложки.

МБЭК является макроскопическим квантовым состоянием, на основе которого можно построить вычислительные квантовые устройства, имеющие свойства кубитов. Их можно представить в виде двух МБЭК в двух магнитных дисках, связанных управляемой связью, которая может быть реализована при помощи радиочастотных фотонов, магненов или фононов [38]. В эксперименте, представленном в данном письме, мы исследовали связь двух образцов пленок ЖИГ круглой формы диаметром 1 мм и толщиной 2 мкм, выращенных на расстоянии 4 мм на общей подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) толщиной 0.5 мм.

Схема установки представлена на рис. 1. Установка является модификацией оптической установки, детальное описание которой представлено в [39, 40]. Магнитный резонанс в области одного из магнитных дисков возбуждался за счет полосковой линии. Величина прецессирующей намагниченности в нем измерялась лазерной системой с использованием эффекта Фарадея. Эта же система позволяла измерять амплитуду магнитного резонанса и во втором магнитном диске путем перемещения оптической системы вдоль оптической призмы ВК-7 по оси y , как показано на рис. 1. Мы обнаружили, что при возбуждении магнитного резонанса в одном из магнитных дисков наблюдался также сигнал прецессирующей намагниченности и во втором магнитном диске. В случае сдвига возбуждающего полоска на величину более 1 мм от накачиваемого магнитного диска сигнал пропадал в обоих магнитных дисках, что исключает возможность РЧ наводки между полосковой линией и удаленным магнитным диском.

На рисунке 2 показана амплитуда отклонения прецессирующей намагниченности в магнитном диске # 1 при РЧ накачке на частоте 2.4 ГГц как функция магнитного поля и мощности накачки. В пределе малой накачки мы видим образование линейного сигнала резонанса в поле 2435 Э и вторую моду резонанса в поле 2413 Э. При увеличении мощности накачки область образования резонанса резко увеличивается. При этом область отклонения намагниченности бо-

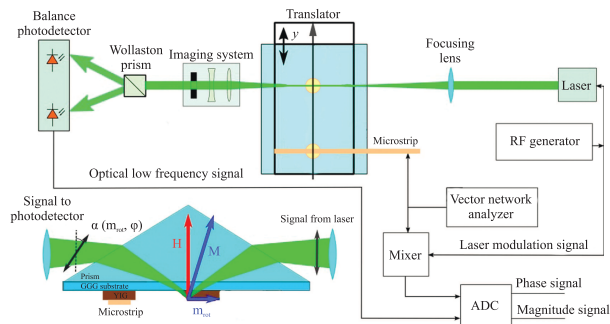


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки. Сверху представлена оптическая схема, вид сверху, с РЧ частью; внизу слева – вид сбоку на оптическую призму с образцом и РЧ полоском, а также ориентации векторов поляризации лазерного излучения, внешнего магнитного поля H , намагниченности M и ее проекции m_{tot}

лее 3° соответствует концентрации магнонов, удовлетворяющей образованию МБЭК, как было показано в [40, 41] и соответствует теоретической модели [30]. При увеличении мощности накачки максимум сигнала МБЭК сдвигается в область меньших полей, что соответствует эффекту “foldover” [42]. Однако видно, что область резонанса в данной геометрии расширяется также и в область больших полей. Хорошо также заметно, что МБЭК основной моды резонанса поглощает вторую моду при мощности накачки, превышающей 5 дБм. Данная установка позволяет детально исследовать многие свойства МБЭК. В данной статье мы остановимся на характеристиках фоновонного взаимодействия между двумя магнитными дисками с МБЭК.

На рисунке 3 показана амплитуда отклонения прецессии намагниченности на втором магнитном диске при возбуждении МБЭК на первом магнитном диске. То есть возбуждение магнонов во втором магнитном диске происходит исключительно за счет фононов, сгенерированных МБЭК в первом магнитном диске, накачиваемом РЧ полоском. Локальное поле на втором магнитном диске слегка смещено, так что линейный резонанс при малой мощности формируется в поле 2444 Э. При мощности более 5 дБм образуется отклонение намагниченности более 3° , что должно соответствовать образованию МБЭК магнонов.

Проанализируем зависимость амплитуды прецессии во втором магнитном диске от ее амплитуды в первом магнитном диске при фиксированном магнитном поле. Результаты этого исследования показаны на рис. 4. В магнитном поле 2444 Э, соответствующем линейному резонансу на втором магнитном диске, амплитуды сигналов одинаковы до углов

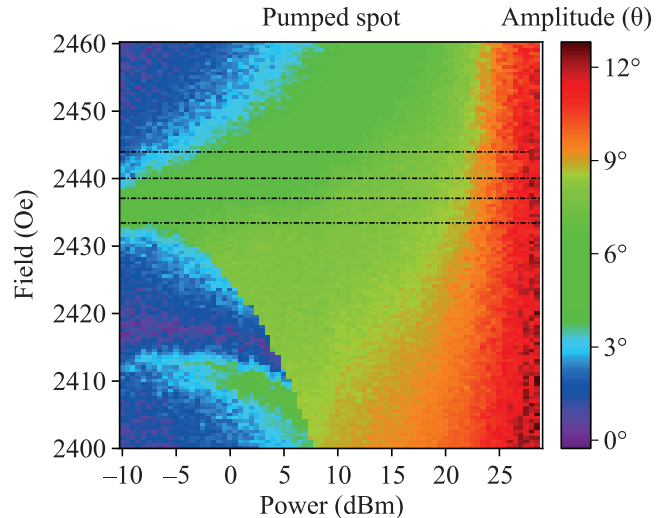


Рис. 2. (Цветной онлайн) Распределение амплитуды угла прецессии намагниченности в зависимости от величины мощности РЧ накачки и значения внешнего магнитного поля H в магнитном диске, помещенном на РЧ полосок

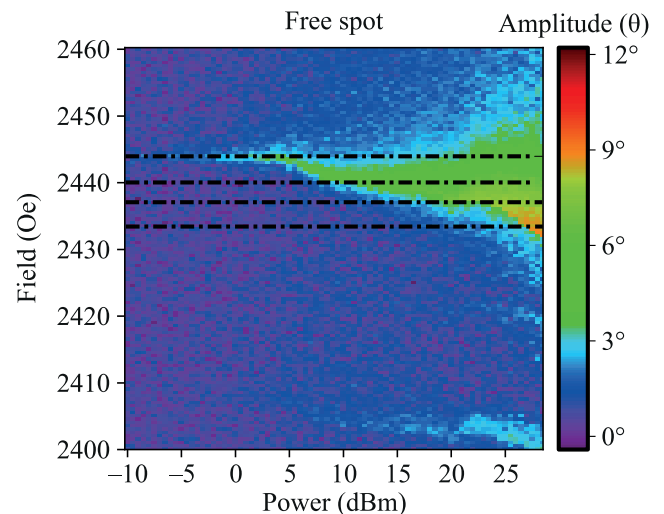


Рис. 3. (Цветной онлайн) Распределение амплитуды угла прецессии намагниченности в зависимости от величины мощности РЧ накачки и значения внешнего магнитного поля H в магнитном диске, расположенном на расстоянии 3 мм от РЧ полоска

отклонения до 4° . Затем намагниченность во втором магнитном диске перестает отклоняться. При других полях прецессирующая намагниченность образуется пороговым образом при отклонении намагниченности в первом магнитном диске более 6° и достигает углов отклонения, соответствующих равновесно-му МБЭК при данном поле и частоте накачки.

Из полученных результатов мы можем сделать вывод, что образуется связанное магнон-фононное

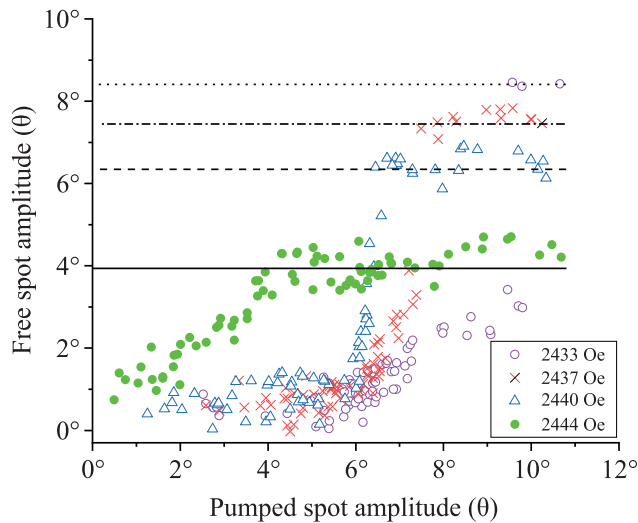


Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимость амплитуды угла прецессии намагниченности в свободном магнитном диске от амплитуды накачиваемого РЧ полоском магнитном диске для значений внешнего магнитного поля, соответствующих значениям 2433, 2437, 2440 и 2444 Э

состояние, причем фононы объединяют магнотонные подсистемы на больших расстояниях. Другими словами, МБЭК в пленке ЖИГ существует совместно с модами колебания фононов в подложке. Данный эксперимент ставит вопрос о когерентном состоянии фононов в подложке. Ранее возможность образования фононного Бозе конденсата исследовалась в ряде работ [7, 43]. Взаимодействие МБЭК и фононов детально исследовано для случая пленки ЖИГ, намагниченной в плоскости, когда и магныны, и фононы имеют ненулевой волновой вектор [44]. Однако возбуждение однородной прецессии фононами, насколько нам известно, не рассматривалось. Таким образом, благодаря представленным в этом письме экспериментальным результатам, мы можем поставить вопросы для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований связанных состояний фононов и магнотонного БЭК атомарного типа.

Одной из ключевых проблем для квантовых процессоров является время сохранения когерентности, непосредственно связанное с временами релаксации носителей. До сих пор считалось, что процессы релаксации магнотонных определяют возбуждением фононов. Однако добротность фононной системы в пленках ЖИГ на несколько порядков выше, чем магнотонных. Возникает возможность изготовления добротных фононных резонаторов, в которых энергия фононов не рассеивается, а возвращается в магнотонную подсистему, как это было впервые продемонстрировано в [37]. Кроме того, в работе показано, что фоно-

ны могут играть роль связи между двумя МБЭК с разными частотами в магнотонном макроскопическом кубите.

Эта работа финансировалась в рамках проекта # 22-12-00322 Российского научного фонда. Мы также благодарны Крымскому федеральному университету им. В. И. Вернадского, предоставившему нам образцы, изготовленные в рамках мегагранта # 075-15-2022-1108 Министерства науки и высшего образования РФ.

1. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthew, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269**, 5221 (1995).
2. K. B. Davis, M.-O. Mewes, M. R. Andrews, M. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
3. J. Klaers, J. Schmitt, F. Vewinger, and M. Weitz, *Nature* **468**, 545 (2010).
4. J. Schmitt, T. Damm, F. Vewinger, and M. Weitz, *Appl. Phys. B Laser Opt.* **105**, 17 (2011).
5. J. L. Figueiredo, J. T. Mendonça, and H. Terças, *Phys. Rev.* **108**, 013201 (2023).
6. G. E. Volovik, *J. Low Temp. Phys.* **153**, 266 (2008).
7. D. M. Stamper-Kurn, A. P. Chikkatur, A. Görlitz, S. Inouye, S. Gupta, D. E. Pritchard and W. Ketterle, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 2876 (1999).
8. L. A. Melnikovsky, *Phys. Rev. B* **84**, 024525 (2011).
9. L. V. Butov, A. L. Ivanov, A. Imamoglu, P. B. Littlewood, A. A. Shashkin, V. T. Dolgoplov, K. L. Campman, and A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5608 (2001).
10. B. Deveaud-Pledran, *J. Opt. Soc. Am.* **29**, 1387145 (2012).
11. J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymaska, R. Andre, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, and L. S. Dang, *Nature* **443**, 409 (2006).
12. А. С. Боровик-Романов, Ю. М. Буньков, В. В. Дмитриев, Ю. М. Мухарский, *Письма в ЖЭТФ* **40**, 256 (1984).
13. И. А. Фомин, *Письма в ЖЭТФ*, **40**, 260 (1984).
14. Yu. M. Bunkov, *J. Phys.: Condens. Matter* **21**, 164201 (2009).
15. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 164210 (2010).
16. Y. Bunkov, *J. Low Temp. Phys.* **185**, 399 (2016).
17. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, Yu. M. Mukharskiy, and D. A. Sergatskov, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 1631 (1989).

18. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, *Spin superfluidity and magnon Bose-Einstein condensation*, ed. by K. H. Bennemann and J. B. Ketterson, *International Series of Monographs on Physics* **156**, 253 (2013).
19. Yu. M. Bunkov, *Phys.-Uspekhi* **53**, 848 (2010).
20. Yu. M. Bunkov, E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Klochkov, V. V. Kuzmin, T. R. Safin, and M. S. Tagirov, *JETP Lett.* **94**, 68 (2011).
21. Yu. M. Bunkov, A. V. Klochkov, T. R. Safin, K. R. Safiullin, and M. S. Tagirov, *JETP Lett.* **106**, 677 (2017).
22. L. V. Abdurakhimov, M. A. Borich, Yu. M. Bunkov, R. R. Gazizulin, D. Konstantinov, M. I. Kurkin, and A. P. Tankeyev, *Phys. Rev. B* **97**, 024425 (2018).
23. Yu. M. Bunkov, A. V. Klochkov, T. R. Safin, K. R. Safiullin, and M. S. Tagirov, *JETP Lett.* **109**, 40 (2019).
24. Yu. M. Bunkov and D. Konstantinov, *JETP Lett.* **112**, 95 (2020).
25. Ю. М. Буньков, П. М. Ветошко, А. Н. Кузмичев, Г. В. Мамин, С. Б. Орлинский, Т. Р. Сафин, В. И. Белотелов, М. С. Тагиров, *Письма в ЖЭТФ* **111**, 52 (2020).
26. P. M. Vetoshko, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, A. A. Kholin, V. I. Belotelov, and Yu. M. Bunkov, *JETP Lett.* **112**, 299 (2020).
27. D. A. Bozhko, A. A. Serga, P. Clausen, V. I. Vasyuchka, F. Heussner, G. A. Melkov, A. Pomyalov, V. S. L'vov, and B. Hillebrands, *Nature Phys.* **12**, 1057 (2016).
28. O. Dzyapko, I. Lisenkov, P. Nowik-Boltyk, V. E. Demidov, S. O. Demokritov, B. Koene, A. Kirilyuk, T. Rasing, V. Tiberkevich, and A. Slavin, *Phys. Rev. B* **96**, 064438 (2017).
29. D. A. Bozhko, A. A. Serga, A. Pomyalov, V. S. L'vov, and B. Hillebrands, *Nature Comm.* **10**, 2460 (2019).
30. Yu. M. Bunkov and V. L. Safonov, *Journal MMM* **452**, 30 (2018).
31. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 164210 (2010).
32. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, *J. of Low Temp. Phys.* **150**, 135 (2008).
33. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, N.Y. (1965).
34. А. С. Боровик-Романов, Ю. М. Буньков, В. В. Дмитриев, Ю. М. Мухарский, Е. В. Поддьякова, О. Д. Тимофеевская, *ЖЭТФ* **96**, 956 (1989).
35. Yu. Bunkov, *Appl. Mag. Res.* **51** (2020).
36. C. Vittoria, S. D. Yoon, and A. Widom, *Phys. Rev. B* **81**, 1 (2010).
37. A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, G. A. Knyazev, V. I. Belotelov, and Yu. M. Bunkov, *JETP Lett.* **112**, 749 (2020).
38. Yu. M. Bunkov, *JETP* **158**, 24 (2020).
39. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, and V. I. Belotelov, *Opt. Express* **30**, 1737 (2022).
40. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, and V. I. Belotelov, *Opt. Express* **31**, 8335 (2023).
41. G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. E. Petrov, I. V. Savochkin, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, and Yu. M. Bunkov, *arXiv:2301.10725* (2023).
42. Yu. M. Bunkov, A. N. Kuzmichev, T. R. Safin, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, and M. S. Tagirov, *Sci. Rep.* **11**, 7673 (2021).
43. O. V. Misochko, M. Hase, K. Ishioka, and M. Kitajima, *Phys. Lett. A* **321**, 5 (2004).
44. D. A. Bozhko, V. I. Vasyuchka, V. Chumak, and A. A. Serga, *Fizika Nizkikh Temperatur* **46**, 462 (2020).