

07

Радиоизотопный источник питания на основе искусственного алмаза, активированного изотопом углерода, и InGaP-фотопреобразователя

© В.С. Калиновский¹, Б.Е. Бураков¹, Е.В. Контрош¹, С.Н. Бочаров², К.К. Прудченко¹,
И.А. Толкачев¹, М.В. Заморянская¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² ООО „Кристаллин“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 25 марта 2026 г.

Принято к публикации 28 марта 2026 г.

Создан макет радиоизотопного источника питания на основе самосветящегося (450–550 nm) монокристаллического алмаза $^{12}\text{C}:(^{14}\text{C})$, обогащенного изотопом углерода ^{14}C , и p - n -фотопреобразователя на основе InGaP. При плотности мощности самосвечения алмаза $\sim 0.8 \text{ nW/cm}^2$ фотопреобразователь обеспечил выходную электрическую мощность $16.5 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2$. Рассмотрены перспективы повышения интенсивности оптического излучения алмаза, которые обеспечат на выходе плотность электрической мощности до $\sim 1 \text{ nW/cm}^2$.

Ключевые слова: радиоизотопный источник питания, самосветящийся монокристаллический алмаз, изотоп углерода, p - n -фотопреобразователь на основе InGaP, интенсивность оптического излучения алмаза.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63140.20614

Разработка автономных источников питания для наноэлектроники [1] и микроэлектромеханических систем [2] с низким уровнем энергопотребления и длительным сроком эксплуатации является актуальной задачей энергетики слаботочных систем. Одним из возможных решений является создание долговременных радиоизотопных источников (РИ) электрического питания, преобразующих энергию радиоактивного распада в электрическую. По сравнению с традиционными химическими батареями [3] РИ [4,5] могут работать непрерывно в течение длительного времени в зависимости от периода полураспада радиоизотопа даже при экстремальных температурах. Имея относительно низкую плотность выходной мощности, подзаряжая аккумулятор (вторичный химический элемент или конденсатор), РИ может обеспечить импульсную выходную мощность в диапазоне от милливатт до ватт [6]. Это позволяет длительно питать такие удаленные электронные системы, как диагностические микрочипы и системы беспроводной связи, способные работать в космическом пространстве, морской воде и других агрессивных средах. РИ могут применяться в имплантируемых медицинских устройствах: кардиостимуляторах, дефибрилляторах, внутриглазных имплантатах [7]. Важной задачей для таких РИ является повышение времени их активного существования и плотности электрической мощности на выходе.

Принято различать два типа РИ: прямого и непрямого преобразования радиоактивной энергии в электрическую. Принцип действия РИ первого типа основан на эффекте генерации радиационным излучением (чаще всего бета-излучением) электронно-дырочных пар в полупроводниковых p - n - и p - i - n -структурах, диодах

Шоттки [5,8]. К наиболее часто используемым источникам бета-изотопов относятся никель-63, гадолиний-148, стронций-90, имеющие период полураспада до 100 лет. Недостатком источников питания на основе данных изотопов является наличие сопутствующих проникающих излучений, требующих дополнительной радиационной защиты. Получение никеля-63 представляет собой сложную техническую задачу, включающую помимо длительного облучения в ядерном реакторе трудоемкую процедуру изотопного обогащения посредством центрифугирования в газовой форме с последующим восстановлением изотопа никеля в металлической форме. Срок службы таких источников питания ограничен прежде всего радиационной стойкостью полупроводниковых преобразователей. В качестве материала для полупроводниковых преобразователей бета-излучения используются Si, GaAs, InGaP, AlGaP, $4H$ -SiC, $2H$ -GaN, AlGaIn, $2H$ -AlN, ^{12}C , c -BN [8]. В работе [9] впервые сообщается о создании прототипа бета-вольтаической батареи, включающей 200 вертикально расположенных субэлементов на основе алмазных диодов Шоттки, с добавлением низкообогащенного изотопа (24%) ^{63}Ni . Сообщается о напряжении холостого хода 1.02 V и максимальной электрической выходной мощности $\sim 4 \mu\text{W/cm}^2$ при общем объеме конструкции источника $5 \times 5 \times 3.5 \text{ mm}^3$.

РИ второго типа представляют собой источники, где энергия радиоактивного альфа- или бета-распада преобразуется в радиолуминесцентное излучение, а затем с помощью полупроводниковых структур в электрическую энергию [10,11]. В этом случае с учетом длины пробега частиц и свойств радиолуминесцентного материала фотопреобразователи не подвергаются

прямому радиационному воздействию. Таким образом, они могут иметь минимальные размеры, более высокую надежность, экологическую безопасность и максимальный срок службы. Период полураспада используемого изотопа и время спинопального распада твердого раствора полупроводникового соединения A^3B^5 фотопреобразователя [12,13] определяют срок службы РИ. Радиолюминесцентные источники излучения могут быть выполнены, например, на основе ортосиликата циркония (циркона) $ZrSiO_4:Eu, Tb, \dots / (^{238}Pu)$, фосфата иттрия (ксенотима) $YPO_4:Eu, \dots / (^{238}Pu)$, активированных альфа-излучающими радионуклидами [10,11], или в виде люминофора в комбинации с бета-радиоактивным тритием [14]. В зависимости от спектра оптического излучения радиолюминесцентного источника в фотопреобразователях могут быть использованы полупроводниковые соединения $A^3B^5:Ga(Al)As, InGaP$ и т.д.

В настоящей работе проведены исследования по созданию радиоизотопного источника питания непрямого преобразования радиоактивной энергии в электрическую. Источником оптического излучения в данном случае является искусственный кристаллический алмаз, обогащенный изотопом ^{14}C . Изотоп углерода ^{14}C является источником бета-излучения с энергией 156 keV и периодом полураспада более 5700 лет. Бета-излучение в алмазе приводит к возбуждению центров легирования с последующей люминесценцией в оптическом диапазоне.

Впервые была разработана отечественная технология выращивания алмаза, легированного азотом и бором и обогащенного изотопом ^{14}C , с использованием прекурсора $Ba^{14}CO_4$ [15,16]. Рост осуществлялся методом температурного градиента при высоком давлении и температуре (high pressure and high temperature, HPHT) на установках типа БАРС (беспредварительный аппарат „Разрезная сфера“). Содержание изотопа ^{14}C составило 0.008 mass%. Люминесценция такого алмаза связана с донор-акцепторным переходом димера азот–бор [17] с излучением преимущественно в сине-зеленой области спектра.

Спектр излучения исследуемого алмаза, обогащенного ^{14}C и легированного бором [18], приведен на рис. 1 (кривая 1). Измерения спектра самосвечения были проведены на специально разработанном оптическом стенде. Для эффективного преобразования радиолюминесцентного излучения алмаза в электричество необходимо обеспечить оптимальное согласование спектров люминесценции с внешней квантовой эффективностью фотопреобразователя (кривая 2 на рис. 1) с минимальным коэффициентом отражения (кривая 3 на рис. 1). Кроме того, важно обеспечить минимизацию объемных и латеральных токов утечки, которые характеризуются токами насыщения туннельно-ловушечного (Есаки) и рекомбинационного (Саа, Нойса, Шокли) [19,20] механизмов транспорта. По этой причине и в связи с тем, что наиболее интенсивное излучение самосвещающегося алмаза наблюдается в диапазоне 450–550 nm, был использован фотопреобразователь (ФП) на основе

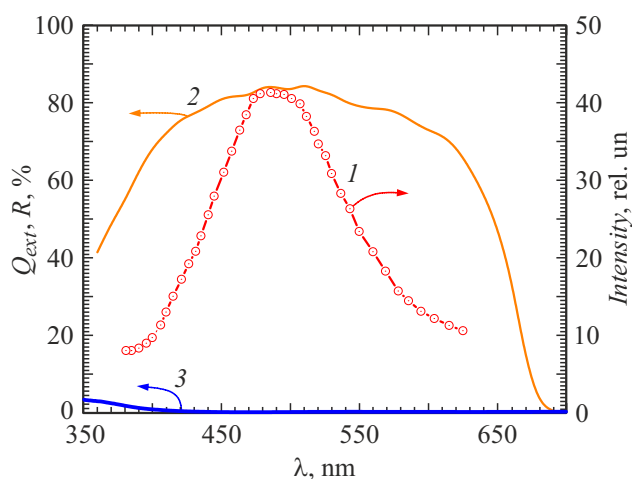


Рис. 1. Экспериментальные спектральные зависимости интенсивности люминесцентного излучения алмаза (1), внешней квантовой эффективности (2) и коэффициента отражения InGaP-фотопреобразователя (3).

полупроводникового материала InGaP. ФП был выращен методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы (metalorganic chemical vapour deposition, MOCVD) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Измерения спектральной характеристики внешней квантовой эффективности и спектра отражения ФП были выполнены с использованием монохроматора МСД-1 и спектрометра S100.

На рис. 2, а приведена экспериментальная прямая темновая вольт-амперная характеристика (ВАХ) ФП, которая описывается трехкомпонентным экспоненциальным выражением

$$J = J_{0t} \left(e^{\frac{qV_j}{A_t kT}} - 1 \right) + J_{0r} \left(e^{\frac{qV_j}{A_r kT}} - 1 \right) + J_{0d} \left(e^{\frac{qV_j}{A_d kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

где $qV_j = (F_n - F_p)$ — разность электронного и дырочного квазиуровней Ферми на границах области пространственного заряда p – n -перехода, $V_j = V - JR_s$ — безрезистивное напряжение, не зависящее от последовательного сопротивления структуры R_s (V — напряжение на всей p – n -структуре, J — плотность темнового тока). Величины J_{0t} ($A_t > 2$), J_{0r} ($A_r = 2$) и J_{0d} ($A_d = 1$) — плотности токов „насыщения“ и диодные коэффициенты идеальности, соответствующие туннельно-ловушечному, рекомбинационному и диффузионному механизмам транспорта носителей заряда в p – n -переходе.

Измерение ВАХ ФП выполнялось с использованием зондовой станции MDC и источника-измерителя Keithley 2635A. В зависимости от уровня интенсивности оптического излучения параметры каждой из компонент в выражении (1) влияют на коэффициент полезного действия (КПД) преобразования оптического излучения в электричество. Уровень интенсивности самосвечения алмаза (рис. 1), согласно данным измерителя Newport 843-R

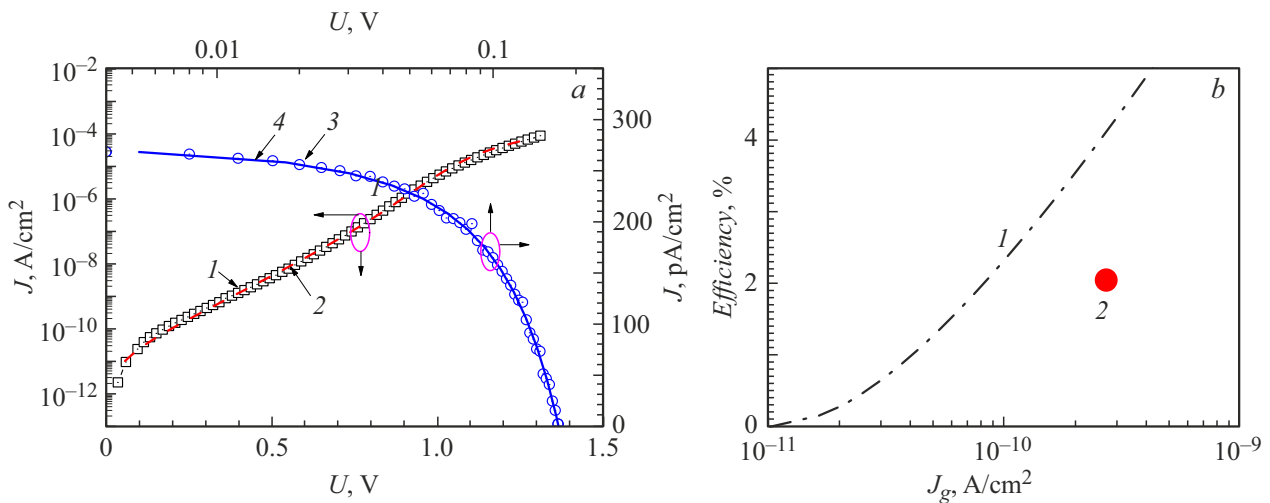


Рис. 2. *a* — прямые темновые (1, 2) и нагрузочные (3, 4) ВАХ InGaP-фотопреобразователя. 1, 3 — эксперимент, 2, 4 — расчет ($T = 300$ K). *b* — расчетная зависимость потенциального КПД InGaP-фотопреобразователя от плотности тока генерации (1) при возбуждении монохроматическим излучением ($\lambda = 490$ nm) и экспериментальное значение КПД InGaP-фотопреобразователя (2) при возбуждении радиоизотопным источником $^{12}\text{C}:(^{14}\text{C})$.

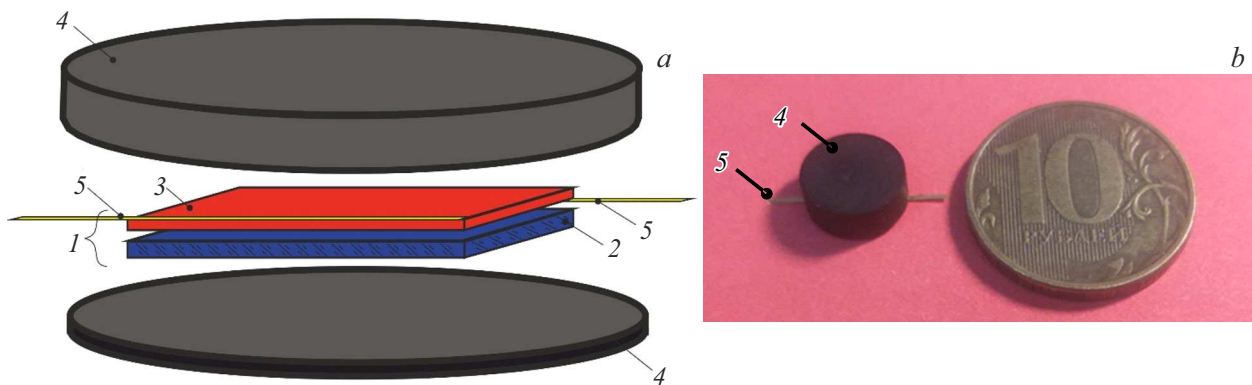


Рис. 3. *a* — схема радиоизотопного источника питания на основе самосветящегося алмаза $^{12}\text{C}:(^{14}\text{C})$ и InGaP-фотопреобразователя; *b* — фотография радиоизотопного источника питания (РИП-С14) на основе самосветящегося кристалла алмаза $^{12}\text{C}:(^{14}\text{C})$ и InGaP-фотопреобразователя (в центре) и монета достоинством 10 рублей (для сравнения). Цифрами обозначены электрогенерирующая часть источника (1), включающая в себя самосветящийся алмаз (2) и ФП (3); корпус источника (4); электрические выводы на ФП (5).

с сенсором 918D, составил около $P_{\text{opt}} \sim 0.8 \text{ nW/cm}^2$. В этом случае основными механизмами токопрохождения, определяющими эффективность фотопреобразования в электричество в ФП, являются туннельно-ловушечный с током „насыщения“ J_{0t} ($A_t > 2$) и рекомбинационный с J_{0r} ($A_r = 2$). Значения J_{0i} (A_i) определялись из расчета экспериментальной темновой ВАХ (кривые 1, 2 на рис. 2) и составили $J_{0t} = 10 \text{ pA/cm}^2$ ($A_t > 2$) и $J_{0r} = 10^{-2} \text{ pA/cm}^2$ ($A_r = 2$). Последовательное сопротивление ФП составило $R_s = 2.4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$.

При математических оценках КПД ФП использовались уравнения непрерывности и Пуассона, модель рекомбинации Шокли–Рида–Холла, статистика Ферми–Дирака. Выполнялся учет подвижности носителей заряда в зависимости от концентрации неравновесных носителей заряда, оптической рекомбинации, а

также модели сужения ширины запрещенной зоны в зависимости от уровня легирования.

Экспериментальная и расчетная нагрузочные ВАХ представлены на рис. 2, *a* (кривые 3, 4), а экспериментальное значение и расчетная зависимость КПД от плотности фототока — на рис. 2, *b*. Плотность тока короткого замыкания, определенная из экспериментальной и расчетной кривой, составляет $J_{sc} = 273 \text{ pA/cm}^2$, а напряжение холостого хода $U_{oc} = 0.172 \text{ V}$. Плотность вырабатываемой электрической мощности в точке оптимальной нагрузки составила $16.5 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2$.

Таким образом, впервые создан макет ядерной батарейки (рис. 3) на основе самосветящегося радиоизотопного источника $^{12}\text{C}:(^{14}\text{C})$ с плотностью мощности оптического излучения $P_{\text{opt}} \sim 0.8 \text{ nW/cm}^2$ и ФП. Ток „насыщения“ (10 pA/cm^2) туннельно-ловушечного меха-

низма токопрохождения ФП обеспечивал напряжение холостого хода $U_{oc} = 0.172$ В, выходную электрическую мощность $16.5 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² и КПД 2%. При достигнутой в работе интенсивности самосвечения алмаза получены расчетный КПД 4% и экспериментальный КПД 2% (рис. 2, б). Для соответствия расчета и эксперимента требуется повысить эффективность сбора излучения самосветящегося алмаза путем оптимизации его формы и габаритных размеров, оптимизировать форму контактной сетки и конструкцию ФП. Необходимо снизить влияние туннельно-ловушечного и рекомбинационного механизмов транспорта, оказывающих значительное влияние на КПД при пико- и нановаттных оптических сигналах. Поскольку период полураспада изотопа ¹⁴С составляет более 5700 лет, а содержание изотопа углерода в нем ничтожно мало (~ 0.008 mass%), разработанная ядерная батарейка является безопасным источником электрической энергии в течение длительного периода времени. При этом необходимо учитывать спинодальный распад тройного твердого раствора InGaP.

Расчеты показывают, что при повышении на порядок интенсивности оптического излучения ¹²С : (¹⁴С) КПД ФП составит $\sim 10\%$ с возможностью обеспечения на выходе плотности электрической мощности $P_{max} = 7.2 \cdot 10^{-10}$ Вт/см². Ядерная батарейка, собранная, например, из 200 последовательно включенных таких субэлементов [21], обеспечит пропорциональное увеличение напряжения с лучшей радиационной безопасностью в сравнении с другими бета-вольтаическими аналогами. Направление дальнейших исследований будет связано с разработкой технологии получения алмаза с более эффективными центрами люминесценции и повышением КПД ФП, работающих в фотовольтаическом режиме.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Gupta, A. Khandelwal, S. Maheshwari, IEEE Sensors J., **23**, 27096 (2023). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3318574
- [2] Y. Zhou, M. Shen, X. Cui, Y. Shao, L. Li, Y. Zhang, Nano Energy, **84**, 105887 (2021). DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.10
- [3] N.A.A. Qasem, G.A.Q. Abdulrahman, Int. J. Energy Res., **2024**, 7271748 (2024). DOI: 10.1155/2024/7271748
- [4] S.I. Maximenko, AIP Adv., **13**, 105021 (2023). DOI: 10.1063/5.0162635
- [5] M.V. Zamoryanskaya, E.V. Dementeva, K.N. Orekhova, V.A. Kravets, A.N. Trofimov, G.A. Gusev, I. Ipatova, B.E. Burakov, Mater. Res. Bull., **142**, 111431 (2021). DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111431
- [6] G.H. Miley, B. Ulmen, P.D. Desai, S. Moghaddam, R.I. Masel, in Proc. of 7th Int. Energy Conversion Engineering Conf. (Denver, Colorado, 2009), p. 25. DOI: 10.2514/6.2009-4601
- [7] E.B. Agyekum, J. Energy Storage, **122**, 116701 (2025). DOI: 10.1016/j.est.2025.116701
- [8] S.I. Maximenko, J.E. Moore, C.A. Affouda, P.P. Jenkins, Sci. Rep., **9**, 10892 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-47371-6
- [9] V.S. Bormashova, S.Yu. Troschiev, S.A. Tarelkin, A.P. Volkov, D.V. Teteruk, A.V. Golovanov, M.S. Kuznetsov, N.V. Kornilov, S.A. Terentiev, V.D. Blank, Diam. Relat. Mater., **84**, 41 (2018). DOI: 10.1016/j.diamond.2018.03.006
- [10] К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, Е.В. Контрош, Е.А. Силантьева, В.С. Калиновский, ЖТФ, **92** (12), 1875 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53754.199-22 [K.K. Prudchenko, I.A. Tolkachev, E.V. Kontrosh, E.A. Silantjeva, V.S. Kalinovskii, Tech. Phys., **67** (12), 1632 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.12.55199.199-22].
- [11] M.V. Zamoryanskaya, E.V. Dementeva, K.N. Orekhova, V.A. Kravets, A.N. Trofimov, G.A. Gusev, I. Ipatova, B.E. Burakov, Mater. Res. Bull., **142**, 111431 (2021). DOI: 10.1016/j.materresbull.2021.111431
- [12] А.Ю. Маслов, О.В. Прошина, ФТП, **43** (7), 873 (2009). [A.Y. Maslov, O.V. Proshina, Semiconductors, **43** (7), 841 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609070033].
- [13] П.В. Середин, Изв. Самар. науч. центра РАН, **11** (3), 46 (2009).
- [14] В.П. Хвостиков, В.С. Калиновский, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, В.М. Андреев, Письма в ЖТФ, **45** (23), 30 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48716.17941n [V.P. Khvostikov, V.S. Kalinovskii, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, V.M. Andreev, Tech. Phys. Lett., **45** (12), 1197 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019120083].
- [15] B.E. Burakov, S.N. Bocharov, S.V. Shulepov, patent RU 2660872 C1 (2018). <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2018222083&tab=PCTBIBLIO>
- [16] V.A. Kravets, S.N. Bocharov, B.E. Burakov, K.N. Orekhova, E.V. Dementeva, G.A. Gusev, P.A. Dementev, B.Ya. Ber, D.Yu. Kasantsev, M.V. Tokarev, E.A. Vasilev, M.V. Zamoryanskaya, Diam. Relat. Mater., **164**, 113492 (2026). DOI: 10.1016/j.diamond.2026.113492
- [17] T. Shao, F. Lyu, X. Guo, J. Zhang, H. Zhang, X. Hu, A.H. Shen, Carbon, **167**, 888 (2020). DOI: 10.1016/j.carbon.2020.05.061
- [18] S.N. Bocharov, B.E. Burakov, A.I. Isakov, K.N. Orekhova, E.V. Dementeva, M.V. Zamoryanskaya, P.A. Dementev, B.Y. Ber, D.Yu. Kasantsev, M.V. Tokarev, Y.Yu. Petrov, Diam. Relat. Mater., **141**, 110650 (2024). DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110650
- [19] W. Shockley, H.J. Quesser, J. Appl. Phys., **32**, 510 (1961). DOI: 10.1063/1.1736034
- [20] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков, ФТП, **43** (5), 671 (2009). [V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.S. Kalinovskii, V.M. Lantratov, V.P. Khvostikov, Semiconductors, **43** (5), 644 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050200].
- [21] С.Н. Бочаров, Б.Е. Бураков, Г.А. Гусев, Е.В. Дементьева, М.В. Заморянская, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, В.А. Кравец, К.Н. Орехова, К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, А.Н. Трофимов, В.М. Андреев, патент на изобретение RU (11) 2 854 307 (13) C1 (2025).