

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТАНДАРТНОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

© 2023 г. **А. Г. Артюх^а**, Г. А. Кононенко^{а,*}, А. В. Саламатин^а, Ю. М. Середа^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: Kononenko@jinr.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принята к публикации 17.10.2022 г.

Разработаны прецизионные источники высокого напряжения для детекторов ядерного излучения (полупроводниковых детекторов, на основе фотоэлектронных умножителей и пр.). Вместо специализированного высоковольтного трансформатора использован распространенный сетевой (~220 В) трансформатор POL-12012 совместно с умножителем напряжения. Электрические параметры блоков: диапазон — от 0 до ± 2500 В; мощность ≤ 10 Вт; КПД — до 77%; пульсации при нагрузке 2 МОм (2 кВ) — 1 мВ; частота преобразования — до 150 кГц; управление ручное/внешнее; плавный рост/спад напряжения; отключение при перегрузке; температурный дрейф $\leq 0.004\%/^{\circ}\text{C}$; рабочая температура — от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$. Исполнение: евромеханика 3U или автономный блок $80 \times 80 \times 40$ мм. Источники используются в ряде экспериментов и промышленных установках, где обеспечивают качество, надежность, температурный диапазон и необходимый функционал.

DOI: 10.31857/S0032816223020027, EDN: UXLWZ

ВВЕДЕНИЕ

Источники высокого напряжения (ИВН) являются естественными элементами измерительных установок экспериментальной ядерной физики. Как правило, они используются для питания разнообразных детекторов радиоактивного излучения [1–5]. В экспериментах, в зависимости от решаемой задачи, количество детекторов может сильно различаться (от единиц до нескольких тысяч) [6]. В большинстве случаев потребности в ИВН удовлетворяются фирменными предложениями (<https://www.ortec-online.com>; ntnk.ru; camberra.ru; www.caen.it). Тем не менее, часто возникает необходимость в индивидуальном изготовлении ИВН при создании ядерно-физических установок [1] или специализированных приборных комплексов прикладного характера [2–4], особенно портативного типа [5]. Разработки направлены на удовлетворение специальных требований к уровню шумов и пульсаций выходного напряжения или температурной и временной неустойчивости, к величине электромагнитных наводок, к возможности плавного подъема и снижения напряжения, к повышению КПД, а также к конструкционному исполнению прибора, его габаритам и массе.

Высоковольтные источники индивидуальной разработки выполняются, как правило, по типу DC-DC-преобразователей [7], и можно выделить три основных варианта формирования в них высокого напряжения.

1. Применение специальной высоковольтной сборки. Данный подход предполагает использование уже готовых ИВН в виде модулей, которые производят ряд фирм (www.tracopower.com, www.emco-highvoltage.com, mantigora.ru, www.spellmanhv.com). Однако для получения качественных характеристик ИВН модули приходится дополнять необходимыми элементами с целью улучшения параметров выходного напряжения (уменьшения пульсаций и шумов, повышения стабильности [8]); расширять их функциональные возможности (модули рассчитаны, как правило, на одну полярность выходного напряжения). Также рассмотренные устройства не обслуживаются, не ремонтно-пригодны, не всегда доступны при замене и в приобретении.

2. Использование высоковольтного трансформатора. Подходящее промышленное изделие (ТВС-70П1 [9]) уже не производится и замены ему практически нет. Но даже специальная конструкция [10] и тщательное изготовление трансформатора не снижают его общую емкость и ин-

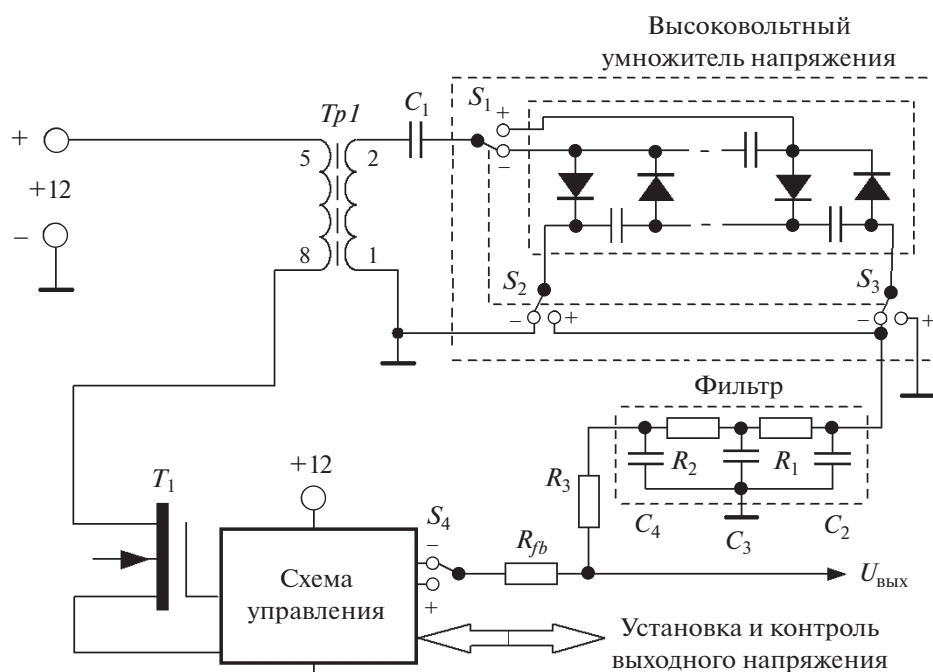


Рис. 1. Блок-схема источника высокого напряжения. $Tr1$ – POL12012 (KST-POL-12012); T_1 – IRF540N; C_2 – C_4 – $3 \times \times 3.3$ нФ, 3 кВ; $R_1 = R_2 = 11$ кОм; $R_3 = 1$ кОм; $R_{fb} = 40$ МОм.

дуктивность рассеяния, что ограничивает частоту преобразования DC-DC-конвертора диапазоном 20–30 кГц [9, 10].

3. Применение двухступенчатой схемы получения высокого напряжения, состоящей из повышающего трансформатора (с выходным напряжением 300–500 В) совместно с емкостно-диодной системой умножения напряжения [11]. Здесь трансформатор работает при более низком выходном напряжении, и коэффициент трансформации небольшой. Общая емкость и индуктивность рассеяния такого трансформатора в разы меньше, чем у высоковольтного, и рабочая частота может быть гораздо выше при тех же потерях при преобразовании. Это позволяет получить высокие технические характеристики устройства и существенно уменьшить габариты трансформатора и фильтра. Однако качественно изготовить трансформатор небольших размеров возможно лишь на специализированном оборудовании, поэтому лучше использовать повышающий трансформатор промышленного производства.

В настоящей работе предлагается простое решение – использование готовых импульсных понижающих трансформаторов от AC-DC-источников питания при индивидуальной разработке регулируемых высоковольтных блоков питания небольшой мощности. К таким трансформаторам относится, например, трансформатор POL-12012 фирмы PremierMagnetics, имеющий отечественный аналог KST-POL-12012 [12]. Трансформатор

предназначен для 15-ваттного импульсного обратноходового AC-DC-преобразователя, в котором входное переменное напряжение электросети (85–265 В) преобразуется в 12 В на выходе. Его первичная обмотка рассчитана на выпрямленное AC-напряжение, число витков в ней в несколько раз больше, чем во вторичной [12]. Если вторичную обмотку подключить на входе DC-DC-преобразователя, а первичную использовать как выходную, то такой трансформатор можно использовать как повышающий.

ИСТОЧНИК ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОМ POL-12012 (KST-POL-12012)

Блок-схема высоковольтного источника напряжения приведена на рис. 1. Она представляет собой обратноходовую схему, в которой постоянное входное напряжение +12 В преобразуется в стабилизированное выходное с регулировкой от 0 до ± 2500 кВ.

Схема состоит из трансформатора POL-12012 (KST-POL-12012), соединенного с шестикаскадной емкостно-диодной системой умножения для однополярной последовательности импульсов (умножитель напряжения собран на элементах поверхностного монтажа: диоды US1M, конденсаторы 100 нФ, 1 кВ), выходного RC-фильтра (R_1, R_2 ; C_2 – C_4) и схемы управления с мощным полевым МОП (металл–оксид–полупроводник) тран-

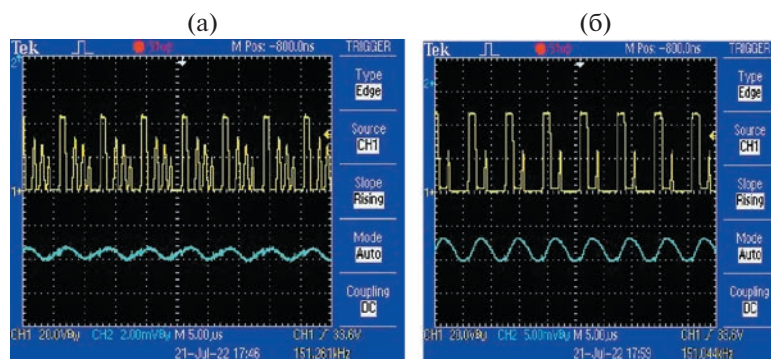


Рис. 2. Напряжение на стоке транзистора IRF540N (верхние графики) и пульсации выходного напряжения 2 кВ (нижние графики): **а** — нагрузка 2 МОм, частота 150 кГц; **б** — нагрузка 400 кОм, частота 150 кГц.

зистором T_1 (инвертор), рассчитанным на напряжение стока до 100 В. Вторичная обмотка (согласно паспорту [12]) выполнена в тройной изоляции. Одним выводом она подключена к стоку транзистора T_1 , а на второй — подается напряжение +12 В. В качестве выходной используется обмотка с выводами 1 и 2, имеющая наибольшее число витков. Между обмотками проложен двойной слой изоляции, обеспечивающий гальваническую развязку до 3000 В [12]. Число витков первичной обмотки больше, чем вторичной, в 7.71 раза [12]. Небольшая величина соотношения витков обмоток компенсируется умножителем напряжения и свойством обратного преобразователя повышать импульсное напряжение на инверторе во время обратного хода по отношению к напряжению питания (12 В) в несколько раз. В результате на выходной обмотке трансформатора формируется во столько же раз более высокий импульс напряжения, что позволяет снизить количество каскадов умножения. Их число выбирается в зависимости от необходимого максимального выходного напряжения. Так, шесть каскадов умножения вполне обеспечивают выходное напряжение 2500 В при токе нагрузки 2 мА для указанных на рис. 1 параметров фильтра. Напряжение на стоке инвертора при этом не превышает 60 В.

Для удобной смены полярности выходного напряжения умножитель выполнен в виде съемной кассеты из двух плат одинаковых размеров 21 × 90 мм. На первой собран умножитель, а на второй установлены угловые штыревые разъемы (на рис. 1 они указаны как переключатели S_1 – S_3). Платы совмещены плоскостями с зазором между ними на толщину угловых разъемов. Отводы от разъемов соединены жесткими проволоочными перемычками с платой умножителя в соответствии с рис. 1. Для удобства перевода умножителя на обратную полярность конденсатор C_1 размещен отдельно на основной плате. Для положительной полярности кассета вставляется в ответные разъемы на основной плате высоковольтного

блока в одном положении, а для отрицательной полярности кассету необходимо вставить в эти же разъемы с поворотом на 180°. Положительное выходное напряжение через разъем S_2 или отрицательное — через S_3 (согласно рис. 1) поступает на вход RC-фильтра и через резистор R_3 — на выходной разъем блока. Через сопротивление обратной связи R_{fb} и переключатель S_4 (в виде переставляемой перемычки) это же напряжение подается на вход схемы управления. Схема содержит узел формирования напряжения обратной связи и контроля выходного напряжения, микроконтроллер с широтно-импульсным преобразованием (TL494 [13]) и буферный усилитель мощности, который соединяет выход микроконтроллера с затвором транзистора T_1 . Назначение переключателя S_4 состоит в обеспечении постоянной полярности сигнала обратной связи на входе микроконтроллера независимо от полярности напряжения на выходе умножителя. Узел формирования вырабатывает на своем выходе сигнал, пропорциональный высоковольтному напряжению с коэффициентом деления 1: 1000. Далее этот сигнал разветвляется и через ограничивающие резисторы поступает на неинвертирующий вход усилителя ошибки микроконтроллера и на разъем для контроля выходного напряжения. Схема включения контроллера TL494 соответствует техническому паспорту [13].

Трансформатор POL-12012(KST-POL-12012) предназначен для работы с ШИМ (широтно-импульсная модуляция) контроллером в трехвыводном корпусе TOP202YAL с замкнутой архитектурой и фиксированной частотой преобразования 100 кГц [13].

Мы рассмотрели зависимость эффективности работы источника питания от частоты преобразования до 150 кГц и нагрузки от 0 до 10 Вт. Собственная мощность потребления блоком в отсутствие нагрузки при $U_{\text{вых}} = 2$ кВ возрастает от 0.7 Вт для 80 кГц до 0.9 Вт для 150 кГц. Максимальная

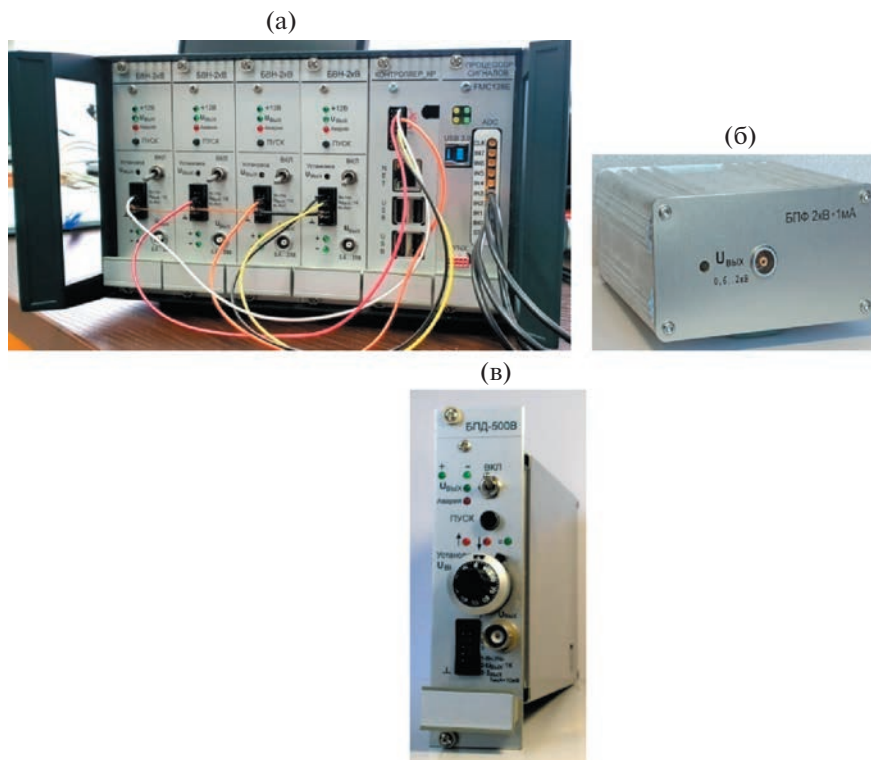


Рис. 3. Высоковольтные блоки: **а** — блоки питания фотоумножителей (БВН-2 кВ) в крейте управления установки ВУК; **б** — автономный высоковольтный модуль (БПФ-2 кВ $\times$ 1 мА); **в** — блок питания кремниевых полупроводниковых детекторов (БПД-500 В).

выходная мощность источника составляет 10 Вт (нагрузка 400 кОм, $U_{\text{вых}} = 2$ кВ). При частоте преобразования 150 кГц пульсации и шум не превышают 1 мВ для нагрузки 2 Вт ($U_{\text{вых}} = 2$ кВ) и менее 4 мВ для нагрузки 10 Вт (рис. 2). При максимальной мощности потребления КПД прибора достигает 75% для частоты преобразования 150 кГц и 77% для частоты 100 кГц.

На рис. 2 приведены осциллограммы пульсаций выходного напряжения (нижние графики) с фильтром в соответствии с рис. 1 для частоты преобразования 150 кГц и двух значений мощности потребления: 2 кВ $\times$ 1 мА (рис. 2а) и 2 кВ $\times$ 5 мА (рис. 2б). Также на рисунке приведены осциллограммы напряжений на стоке транзистора T_1 (IRF540N) высоковольтного блока (верхние графики). Максимальное значение амплитуды импульса напряжения при обратном ходе преобразователя, согласно рис. 2, не превышает 50 В для напряжения на выходе блока 2 кВ. Измерение пульсаций выполнено на осциллографе TDS2004. Сигнал снимался с резистора сопротивлением 10 кОм, который подключался к основной нагрузке через высоковольтную емкость 3300 пФ. Резистор был зашунтирован встречно включенными диодами US1M.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе распространенных электронных элементов для использования в экспериментальных установках [1, 2, 5, 14, 15] были разработаны прецизионные высоковольтные источники питания для фотоумножителей и полупроводниковых детекторов ядерного излучения. Блоки представляют собой обратноходовые DC-DC-преобразователи. Основным элементом схемы является силовой узел, который построен на основе доступного и недорогого трансформатора POL-12012 с емкостно-диодным умножителем напряжения. Частота работы преобразователей до 150 кГц. Такая схема обеспечила напряжение на выходе до 2500 В, низкие пульсации с незначительным шумом и высокий КПД приборов, до 77%.

Конструктивно источники питания изготовлены в двух вариантах. В виде модулей-кассет закрытого типа системы Евромеханика (3U) для установок, описанных в статьях [1, 2, 14, 15], и в виде автономного модуля размерами 80 $\times$ 80 $\times$ 40 мм для установки, описанной в статье [5]. Регулировка выходного напряжения осуществляется или внутренним многооборотным потенциометром, или внешним сигналом через разъем на передней панели. Напряжение питания блоков 12 В (11–24 В).

Таблица 1.

Тип блока	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$P_{\text{max}}, \text{Вт}$	Ток срабатывания защиты, мА	Мощность в нагрузке $U_{\text{н}} I_{\text{н}}, \text{кВ мА}$	Пульсации выходного напряжения пик-пик $\Delta U_{\text{p-p}}, \text{мВ}$	Частота преобразования $F, \text{кГц}$
БВН-2 кВ	$\pm(600-2000)$	10	1500*	1.5×1 2×1 2×5	<1 1 <4	150
БПФ-2 кВ	$\pm(600-2000)$	2	1500*	2×1	<1	150
БПД-500 В	0 ± 500	0.5	1500* (0.01–1)**	0.5×1	<1	100

*Ток срабатывания защиты по питанию; **по нагрузке.

На рис. 3а представлена фотография крейта спектрометра ВУК (возмущенных угловых γ -корреляций) [1] с установленными в нем четырьмя источниками высокого напряжения БВН-2 кВ для питания ФЭУ. В спектрометре ВУК [1, 14] используются четыре современных высокоточных и быстродействующих сцинтилляционных детектора с кристаллами LaBr_3 с энергетическим разрешением $<3\%$ по ^{137}Cs и временным <400 пс по ^{60}Co . Загрузка на каждом детекторе достигает 50–60 тысяч/с, обычное время экспозиции 2–3 сут. В крейте также расположен блок 8-канального цифрового процессора сигналов (14 бит, 250 МГц) и блок контроллера крейта с процессором Linux. Они обеспечивают регистрацию сигналов ФЭУ, управление и мониторинг выходного напряжения высоковольтных блоков. Разработанные источники высокого напряжения эксплуатируются в спектрометре на протяжении нескольких лет, они показали свою надежность, стабильность и обеспечили необходимую точность измерений [14]. Аналогичные блоки использовались для двух сцинтилляционных детекторов с кристаллами ВГО в установке [5].

В корпусе Евромеханика (3U) для кремниевых детекторов фрагмент-сепаратора КОМБАС [15], а также для многоканальных кремниевых детекторов, встроенных в капсулу нейтронного генератора, установок с использованием метода меченых нейтронов [2, 5] были разработаны блоки питания с регулируемым напряжением от 0 до ± 500 В и максимальным током 1 мА (БПД-500 В, см. рис. 3в).

Для сцинтилляционного детектора инспекционного модуля [5] был разработан источник питания в виде автономного модуля, см. рис. 3б. Работа источников питания для сцинтилляционного и кремниевых детекторов проходила в более неблагоприятных условиях замкнутого объема $740 \times 510 \times 410$ мм. Детекторы совместно с блоками питания работали при высоких радиационных активностях и температуре порядка 50°C . Источ-

ники питания также показали свою надежность и стабильность.

Основные характеристики блоков приведены в табл. 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brudanin V.B., Tsvyashchenko A.V., Salamatin A.V., Kochetov O.I., Velichkov A., Fomicheva L.N., Budzinski M., Wiertel M., Sorokin A.A., Rysniy G.K., Komissarova B.A., Milanov M. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A. 2005. V. 547. P. 389. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.04.002>
2. Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Рапацкий В.Л., Рогов Ю.Н., Романов И.В., Садовский А.Б., Саламатин А.В., Сапожников М.Г., Сафонов М.В., Сленев В.М., Филиппов А.В. // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 5 (182). С. 722.
3. Тетерев Ю.Г., Гикал Б.Н., Иванов О.И., Кононенко Г.А., Миронов В.И. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 9.
4. Тетерев Ю.Г., Кононенко Г.А. // ПТЭ. 2011. № 4. С. 148.
5. Aleksakhin V.Yu., Bystritskii V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., Krasnoperov A.V., Rapatskii V.L., Rogachev A.V., Rogov Yu.N., Sadovskii A.B., Salamatin A.V., Sapozhnikov M.G., Slepnev V.M. // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2013. V. 10. Iss. 7. P. 860. <https://doi.org/10.1134/S154747711401004X>
6. Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
7. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. М.: Додэка-XXI, 2008.
8. Григорьев А.В., Храпко А.Н. // Труды международной конференции “Современные проблемы оптики естественных вод”. Т. 8. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2015. С. 259–262.
9. Черепин В.Т., Красовский Т.А., Василенко В.И., Твердохлеб А.Ф. // ПТЭ. 2014. № 2. С. 57. <https://doi.org/10.7868/S0032816214020050>
10. Трубицын А.А., Грачев Е.Ю., Морозов Д.А., Полонский Б.А., Серебряков А.Е. // ПТЭ. 2019. № 5. С. 52. <https://doi.org/10.1134/S003281621904030X>

11. *Tamuri A.R., Bidin N., Daud Y.M.* // International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJR-RAS). 2010. V. 3. Iss. 2. P. 143.
12. <http://www.premiermag.com>; <https://kodo-trans.ru>
13. <http://www.ti.com>. TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Texas Instruments Data Sheet, 2017.
14. *Salamatin D.A., Tsvyashchenko A.V., Salamatin A.V., Velichkov A., Magnitskaya M.V., Chchelkatchev N.M., Sidorov V.A., Fomicheva L.N., Mikhin M.V., Kozin M.G., Nikolaev A.V., Romashkina I.L., Budzynski M.* // Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 850. P. 156601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156601>
15. *Кононенко Г.А., Артюх А.Г., Воронцов А.Н., Кислуха Д.А., Клыгин С.А., Ковтун В.Е., Осташко В.В., Павленко Ю.Н., Середа Ю.М., Эрдэмчимэг Б.* // ПТЭ. 2015. № 3. С. 35. <https://doi.org/10.7868/S0032816215020202>