

УДК 621.96.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ ВНУТРИ СПЛОШНОЙ  
ЗАЩИТЫ В ФОРМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА  
ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ

Панюшкин А.Н.<sup>1</sup>, Панюшкин Н.Н.<sup>2</sup>, Бирюкова И.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научное конструкторско-технологическое бюро  
«Феррит»»

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический  
университет им. Г.Ф. Морозова»

<sup>3</sup>Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение  
высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и  
Ю. А. Гагарина»» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации  
E-mail: [nnpan@yandex.ru](mailto:nnpan@yandex.ru)

**Аннотация:** Предложена модель для расчета локальной поглощенной дозы на основе лучевого метода. Модель предназначена для определения локальных дозовых нагрузок элементов бортовой аппаратуры на поверхности космических аппаратов внутри защиты в форме прямоугольного параллелепипеда. Входными параметрами являются значения годовых локальных поглощённых доз для «эталонных» моделей защит в форме сплошной сферы и в форме полубесконечной плоскости, которые приводятся в техническом задании на разработку аппаратуры. Проведенные численные эксперименты показали, что эффективная толщина защиты равна толщине его стенок только для защиты в форме сплошной сферы. Для плоской ограниченной защиты эффективная толщина возрастает по мере увеличения линейных размеров. Для защиты в форме куба это превышение составляет 28 %. Для практически используемых сплошных защит в форме параллелепипеда эффективная толщина граней может превышать их физическую толщину примерно на порядок. Разработанная модель позволяет трансформировать значения локальных поглощенных доз для «эталонных» защит в локальные дозовые нагрузки внутри защит в форме параллелепипеда в зависимости от его размеров. Практическая реализация модели на стадии проектирования позволит более точно определять эффективность защит в зависимости от геометрии, толщины и материала стенок, гарантируя, таким образом, безотказную работу элементов бортовой аппаратуры.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, доза, экран, электрон, протон, космическое пространство.

MODELING OF DOSE LOAD INSIDE A CONTINUOUS PROTECTION IN THE FORM OF A RECTANGULAR PARALLELEPIPED BY THE RAY METHOD

Panyushkin A.N.<sup>1</sup>, Panyushkin N.N.<sup>2</sup>, Biryukova I.P.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company «Scientific Design and Technology Bureau «Ferrit»»

<sup>2</sup>Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»

<sup>3</sup>Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education «Military Training and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»» (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation

E-mail: [nnpan@yandex.ru](mailto:nnpan@yandex.ru)

**Summary:** A model for calculating the local absorbed dose based on the radiation method is proposed. The model is designed to determine the local dose loads of elements of onboard equipment on the surface of spacecraft inside the protection in the form of a rectangular parallelepiped. The input parameters are the values of annual local absorbed doses for "reference" models of protection in the form of a continuous sphere and in the form of a semi-infinite plane, which are given in the terms of reference for the development of equipment. Numerical experiments have shown that the effective thickness of the protection is equal to the thickness of its walls only for protection in the form of a continuous sphere. For flat limited protection, the effective thickness increases as the linear dimensions increase. For cube-shaped protection, this excess is 28 %. Used for almost continuous protection in the form of a parallelepiped effective thickness of edges may be larger than the physical thickness approximately on the order. The developed model allows to transform the values of local absorbed doses for "reference" protections into local dose loads inside the protections in the form of a parallelepiped depending on its size. The practical implementation of the model at the design stage will allow more accurately determine the effectiveness of protection depending on the geometry, thickness and material of the walls, thus ensuring trouble-free operation of the elements of the onboard equipment.

**Keywords:** ionizing irradiated, doze, screen, electron, proton, space environment.

Прогнозирование стойкости электрорадиоизделий (ЭРИ) бортовой аппаратуры (БА) к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП) по дозовым эффектам рекомендуется проводить по методике, приведенной в приложении к ОСТ 134-1034-2012 [1]. По требованию этого документа должен проводиться расчет локальных дозовых нагрузок (ЛДН) для каждого ЭРИ с целью определения коэффициента запаса. По величине коэффициента запаса принимается решение о достаточности защиты экраном. Для расчета ЛДН рекомендуется использование лучевого метода или метода секторирования.

В соответствии с этими методами для каждого вида ИИ КП производят расчет величины ЛДН  $D_j$ . Суммарная доза от всех видов ИИ определяется по формуле:

$$D = \sum_{j=1}^M D_j, \quad (1)$$

где  $M$  – количество видов ИИ (в случае ИИ КП  $M = 2$  – электроны и протоны);  $D_j$  – ЛДН для  $j$ -го вида ИИ.

Расчет ЛДН  $D_j$  для каждого вида ИИ производят в центре защитного экрана, полагая его форму сферической. Из расчетной точки проводят  $N$  лучей, равномерно распределенных в пространстве. Количество лучей  $N$  должно быть таким, что в пределах каждого телесного угла, ограниченного лучами, толщину поверхности (защиты)  $\delta_{0i}$  можно было считать постоянной. Для каждого из таких лучей полная радиальная толщина защиты  $\delta_{0i}$  (если экранов несколько) вычисляется как сумма толщин защитных экранов, пересекаемых лучами. Величины элементарных телесных углов полагаются одинаковыми и определяются по формуле:

$$\Delta\Omega_i = \frac{4\pi}{N}. \quad (2)$$

Исходя из полной радиальной толщины защиты  $\delta_{0i}$ , требований технического задания (ТЗ) и коэффициентов ослабления экранов для  $j$ -го вида ИИ определяют удельную локальную дозу  $D_{удi,j}$ , поступающую в расчетную точку через единицу площади поверхности каждого из  $N$  телесных углов. Для определения  $D_{удi,j}$  с учетом вида ИИ, геометрии и материала экрана используют модели на основе метода Монте-Карло и его различных модификаций [2-7], которые позволяют проводить прогнозирование радиационных условий для БА КА, включая ЛДН в объеме БА. На основе результатов численного и физического экспериментов разработаны зависимости ЛДН от массовой толщины в центре

сплошного экрана сферической формы и экрана в форме полубесконечной плоскости для электронов и протонов. Эти данные приводятся в ТЗ на разработку в виде таблиц для годового срока эксплуатации РЭА КА [8] и рекомендованы к применению.

Если бы толщина защиты была постоянной для всей сферы, то  $D_{удj}$  –  $D_{удj}$  и общая доза для  $j$ -го вида ИИ –  $D_j$  равнялась бы произведению  $D_{удj}$  на площадь поверхности всей сферы:

$$D_j = D_{удj} 4\pi R^2, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус телесного угла. Значение этой дозы для электронов и протонов в зависимости от массовой толщины защиты даётся в таблицах приложения к ТЗ. Если толщина защиты различна для каждого из телесных углов, то локальная доза  $D_{i,j}$ , поступающая в расчетную точку через поверхность  $i$ -го телесного угла от  $j$ -го вида ИИ, будет определяться как доля от общей дозы  $D_j$ , которая прямо пропорциональна величине площади поверхности, вырезаемой данным телесным углом  $\Delta\Omega_i$  (относительно всей поверхности сферы  $S = 4\pi R_i^2$ )

$$D_{i,j} = D_{удj} \frac{\Delta\Omega_i R_i^2}{4\pi R_i^2} = D_{удj} \frac{\Delta\Omega_i}{4\pi}. \quad (4)$$

Для определения локальной дозы  $D_j$  необходимо сложить все локальные дозы от  $N$  телесных углов:

$$D_j = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N D_{удj} \cdot \Delta\Omega_i. \quad (5)$$

Если толщина защитного экрана в  $i$ -ом телесном угле  $\Delta\Omega_i$  не равна заданному значению  $\delta_{0i}$ , то ЛДН для экрана этой толщины находят методом интерполяции по значениям ЛДН для двух ближайших заданных значений толщин стенки экрана: большей и меньшей данной.

Суммарная доза от всех видов ИИ определяется по формуле (1). В случае, если экран имеет правильную форму, величины телесных углов могут быть выбраны достаточно большими, а их количество  $N$ , наоборот, будет малым. Тогда лучевой метод сведется к методу секторирования и для расчетов ЛДН можно использовать простые инженерные формулы с достаточной для практических целей точностью. В самом простом случае, когда форма экрана близка к сферической и полный телесный угол  $4\pi$  поделен равномерно между всеми направлениями ( $N = 6$ ), то  $\Delta\Omega_i = 2\pi/3$ . Тогда для расчета полной ЛДН получим простые выражения

$$D_e = 1/6 \sum D_{ie}, D_p = 1/6 \sum D_{ip}, D = D_e + D_p, \quad (6)$$

где  $D_{ie}$ ,  $D_{ip}$  – дозы электронов и протонов для  $i$ -го телесного угла;  $D_e$ ,  $D_p$  – полные дозы электронов и протонов в расчетной точке.

Однако экраны сферической формы практически не используются. Наиболее распространены экраны в виде прямоугольного параллелепипеда, имеющие плоские боковые поверхности, отличающиеся между собой по площади и по толщине (рис. 1). Различие в геометрических размерах граней приводит к изменению ЛДН вследствие влияния двух факторов:

1. изменяется величина телесного угла  $\Delta\Omega_i$ ;
2. изменяется «эффективная толщина» грани.

Зависимость ЛДН ( $D$ ) от геометрических размеров граней определяется выражением [9]

$$D = \frac{D_{+x} + D_{-x} + (D_{-y} + D_{+y})\frac{a}{b} + (D_{-z} + D_{+z})\frac{a}{d}}{2\left[1 + a\left(\frac{1}{b} + \frac{1}{d}\right)\right]}, \quad (7)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $d$  – размеры рёбер прямоугольного параллелепипеда:  $a = AD = A_1D_1 = BC = B_1C_1$ ,  $b = AB = A_1B_1 = DC = D_1C_1$ ,  $d = AA_1 = BB_1 = CC_1 = DD_1$ ;  $D_{+x}$ ,  $D_{-x}$ ,  $D_{+y}$ ,  $D_{-y}$ ,  $D_{+z}$ ,  $D_{-z}$  – составляющие ЛДН за счет ИИ, проникающих через грани

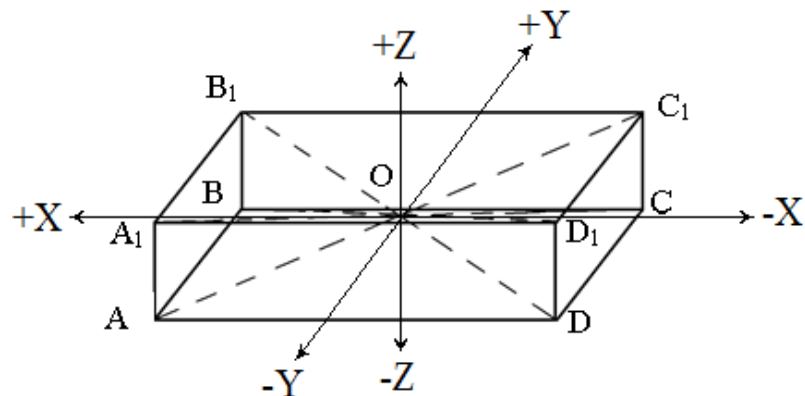


Рисунок 1 – Применение метода секторирования к экрану в форме прямоугольного параллелепипеда

параллелепипеда  $AA_1B_1B$ ,  $DD_1C_1C$ ,  $BB_1C_1C$ ,  $AA_1D_1D$ ,  $A_1B_1C_1D_1$  и  $ABCD$  соответственно. Толщина всех граней параллелепипеда  $\delta_0$  принята одинаковой, а расчетная точка расположена в его геометрическом центре (точка  $O$ ).

Значения составляющих ЛДН определяется по таблицам ТЗ исходя из массовой толщины защиты, которая для каждой грани экрана определяются по

формуле

$$d_M = \rho k_{EFF} \delta_0, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность материала экрана. Как правило, используют Al,  $\rho_{Al} = 270 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\delta_0$  – толщина грани. По значению  $d_M$  определяют значение ЛДН от  $j$ -го вида ИИ, проходящим через  $i$ -ю грань прямоугольного параллелепипеда. Коэффициент эффективности  $k_{EFF}$  учитывает зависимость толщины поглощающего слоя экрана от угла падения частиц (электронов или протонов) на поверхность экрана (рис. 2). Из рисунка 2 видно, что для элемента экрана «эффективная» толщина  $d_{EFF}$  может быть определена по формуле

$$d_{EFF} = \frac{\delta_0}{\cos \alpha}, \quad (10)$$

где  $\delta_0$  – толщина поглощающего слоя;  $d_{EFF}$  – эффективная толщина поглощающего слоя;  $\alpha$  – угол падения заряженных частиц на экран.

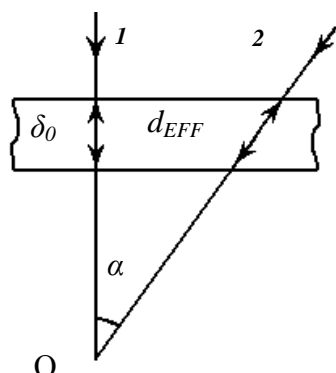


Рисунок 2 – Зависимость эффективной толщины элемента экрана  $d_{EFF}$  от угла падения  $\alpha$  частиц на экран: 1 – нормальное падение; 2 – падение под углом  $\alpha$

Эффективную толщину плоского экрана размером от 0 до  $x_{MAX}$  и от 0 до  $y_{MAX}$  определим как среднее значение толщины грани

$$d_{EFF} = \frac{1}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{x_{MAX}} \int_0^{y_{MAX}} d(x, y) dx dy, \quad (11)$$

где  $x_{MAX}$ ,  $y_{MAX}$  – максимальные линейные размеры экрана вдоль осей  $ox$  и  $oy$  соответственно. Получено выражение для  $d_{EFF}$  в виде

$$d_{EFF} = k_{EFF} \delta_0, \quad (12)$$

где

$$k_{EFF} = \frac{l_0^2}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{\alpha_{MAX}} \int_0^{\beta_{MAX}} \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} d\alpha d\beta, \quad (13)$$

$$\alpha_{MAX} = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_{MAX}}{l_0} \right);$$

$$\beta_{MAX} = \operatorname{arctg} \left( \frac{y_{MAX}}{l_0} \right).$$

Для расчетов целесообразно использовать программу алгебраических вычислений MathCAD, так как аналитическое решение полученной модели затруднительно. Результаты расчета представлены на рисунке 3 в виде зависимости  $k_{EFF}$  от отношения размеров экрана квадратной формы  $a$  к расстоянию от экрана до расчетной точки  $l_0$ . Из графика следует, что по мере увеличения  $a/l_0$  коэффициент эффективности возрастает. Стремление  $a/l_0$  к бесконечности соответствует случаю полубесконечного экрана. Стремление  $a/l_0$  к нулю соответствует случаю сферического экрана. Значение  $a/l_0 = 1$  соответствует экрану кубической формы, для которого  $k_{EFF} = 1,28$ . Следовательно, даже при максимальном приближении к экрану сферической формы относительная ошибка определения толщины плоского поглощающего слоя составляет 28 %.

Для расчета ЛДН выбран полый алюминиевый экран с толщиной стенки  $\delta_0 = 4$  мм в форме прямоугольного параллелепипеда. Размеры всех горизонтальных ребер (вдоль осей  $+X-X$  и  $+Y-Y$ ) приняты одинаковыми  $a = b = 100$  мм. Размер вертикальных ребер  $d$  (вдоль оси  $+Z-Z$ ) одновременно менялся в диапазоне от 10 мм до 1000 мм, при этом отношение  $a/d$  изменялось в пределах от 0,1 до 10. Расчет годовой ЛДН производился в центре экрана для случая совместного воздействия электронов и протонов  $D = De + Dp$ . Расчет проводился с использованием MathCAD. Сначала для каждой грани параллелепипеда по формулам (13) проводился расчет коэффициента эффективности  $k_{EFF}$ . Затем по формуле (12) определялась массовая толщина защиты. По таблице ТЗ определялась годовая ЛДН для экрана в форме сплошной сферы отдельно для электронов и протонов ( $D_{+X}$ ,  $D_{-X}$ ,  $D_{+Y}$ ,  $D_{-Y}$ ,  $D_{+Z}$ ,  $D_{-Z}$ ). Расчет годовой ЛДН в центре параллелепипеда проводился отдельно для электронов и протонов по формуле (7). Полная годовая ЛДН определялась по формуле  $D = De + Dp$ .

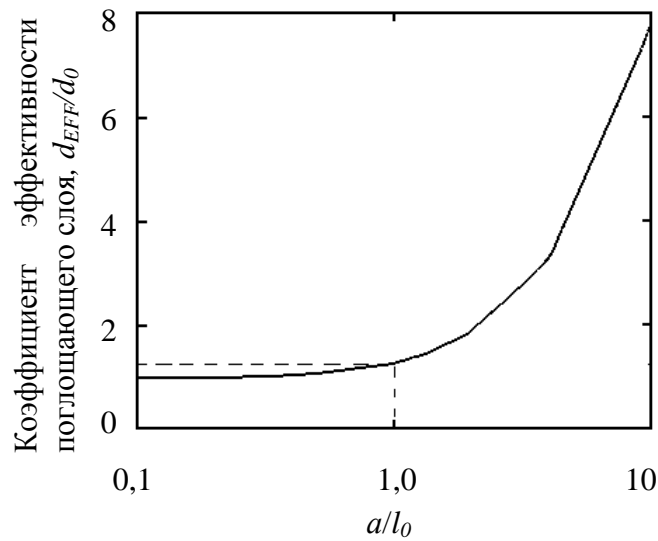


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента эффективности плоского поглощающего слоя от отношения линейных размеров экрана квадратной формы к расстоянию от экрана до расчетной точки

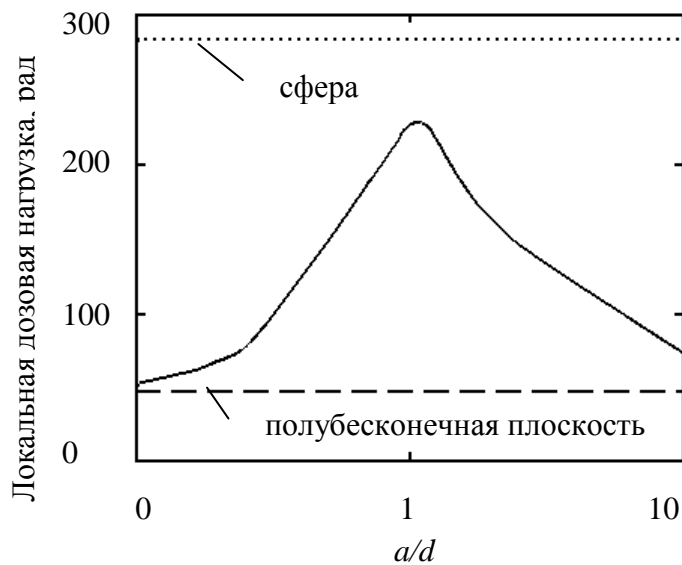


Рисунок 4 – Зависимость локальной дозовой нагрузки в центре прямоугольного параллелепипеда от отношения его длины (ширины) к высоте

Результаты расчета представлены на рисунке 4 в виде зависимости полной годовой ЛДН от относительной высоты параллелепипеда  $a/d$ . На этом же графике представлены значения ЛДН, соответствующие сплошному сферическому экрану и полубесконечной плоскости, приведённые в ТЗ. Из рисунка 4



видно, что ЛДН имеет максимум при  $a = d$ , что соответствует экрану в форме куба. При этом ЛДН для сферического экрана превышает ЛДН для прямоугольного параллелепипеда в форме куба примерно на 28 %. При увеличении или уменьшении относительной высоты параллелепипеда ЛДН снижается, стремясь к значению, соответствующему полубесконечной плоскости. Результаты расчета ЛДН соответствуют результатам, приведенным в ТЗ для сферического экрана и для полубесконечной плоскости.

Таким образом, была разработана модель для определения локальной дозовой нагрузки внутри экрана в форме полого прямоугольного параллелепипеда. Модель позволяет определять эффективность экрана в зависимости от его геометрии. Полученные результаты показали хорошее совпадение с известными результатами в случае использования экранов в форме сплошной сферы и полубесконечной плоскости. ЛДН возрастает по мере приближения прямоугольного параллелепипеда к кубу. Наибольшее значение ЛДН имеет сферический экран, для которого её значение на 28 % больше, чем для куба. Таким образом, использование модели сферического экрана даёт наиболее консервативную оценку ЛДН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ОСТ 134-1034-2003. Аппаратура, устройства, приборы и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронных и протонных излучений космического пространства по дозовым эффектам.

2 Halbleib, J. A. ETRAN2. A user-oriented version of the ETRAN-18b electron-photon Monte-Carlo technique. SLA-73-0834 [Text] / J. A. Halbleib, W. H. Vandevender. – USA : Sandia National Laboratories, 1973.

3 Halbleib, J. A. ITS Version 3.0. The integrated TIGER series of coupled electron/photon Monte-Carlo transport codes. SAND91-1634. UC-405. [Text] / J. A. Halbleib [et al.]. – USA : Sandia National Laboratories, 1992.

4 Seltzer, S. M.. Electron, electron – bremsstrahlung and proton depth-dose data for space-shielding applications [Text] / S. M. Seltzer // IEEE Trans. on Nucl. Sc. – 1979. – Vol. NS-26. – № 6. – P. 21-60.

5 Прогнозирование локальных дозовых нагрузок в критических узлах

аппаратуры космических объектов [Текст] / В. Ф. Зинченко, В. Д. Шиян, А. Д. Артемов, С. А. Соболев // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – Вып. 2. – С. 3-6.

6 Космическая экология : моделирование радиационной обстановки на борту космических аппаратов [Текст] / А. А. Маклецов [и др.] // Инженерная экология. – 1997. – № 1. – С. 39-51.

7 Зинченко, В. Ф. Комплекс программ для расчета характеристик ионизирующих излучений космического пространства после прохождения защиты различной геометрии [Текст] / В. Ф. Зинченко, А. А. Романенко, В. М. Ужegov // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2012. – В. 1. – С. 9-15.

8 Панюшкин, А. Н. Отчет о ОКР «Аппаратура управления НА «Пыль-УФ», «Расчет радиационной стойкости», ЦСКЛ.411734.006PP5 [Текст] / А. Н. Панюшкин, Н. Н. Панюшкин. – Воронеж : АО НКТБ «Феррит», 2018. – 51 с.

9 Панюшкин, Н. Н. Расчет локальной поглощенной дозы элементами изделия с учетом экранирования [Текст] / Н. Н. Панюшкин, А. Н. Панюшкин // Арктика : инновационные технологии, кадры, туризм : материалы международной науч.-практ. Конференции, 19-21 ноября 2018 г. / грант РФФИ 18-08-20133 ; под общ. ред. В. И. Прядкина ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2018. – С.118-124.