

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.913; 539.8

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.009

## **ЭНЕРГООБМЕН ВНУТРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ КРАУДИН-ФОКУСОННЫХ ПАР В 3D КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛА Cu**

**Николай Николаевич Медведев<sup>1†</sup>, Михаил Дмитриевич Старостенков<sup>2</sup>,  
Сергей Владимирович Дмитриев<sup>3,4</sup>, Павел Васильевич Захаров<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. Ползунова», ул. Трофимова, 27, 65933, Бийск, Россия

<sup>2</sup> Алтайский государственный технический университет им. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, РБ, Россия.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, Томск, Россия.

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, 195251, Санкт-Петербург, Россия

<sup>†</sup> nnm42@rambler.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>

<sup>2</sup> genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

<sup>3</sup> dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>

<sup>4</sup> zakharovpv1@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>

**Аннотация.** Методом молекулярной динамики с использованием модифицированного потенциала Морзе рассмотрен вопрос о взаимодействии краудиона и фокусона внутри краудион-фокусонной пары в модельном кристалле меди. Показано, что два атома, находящиеся друг от друга на некотором расстоянии в одном плотноупакованном ряду и запущенные с одной скоростью, на порядок и более превышающей пороговую скорость образования пары Френкеля, образуют краудион-фокусонную пару, внутри которой в процессе движения происходит обмен энергией.

Сначала краудион перемещаясь со сверхзвуковой скоростью оставляет за собой след из атомов с более высокой потенциальной энергией по сравнению с той, что была у них до его прохождения. Фокусон, движущийся вслед за краудионом ускоряется относительно краудиона за счёт потенциальной энергии атомов следа, догнав краудион, он передаёт ему часть своей кинетической энергии. После чего происходит увеличение расстояния между краудионом и фокусоном до первоначального. Затем фокусон снова догоняет краудион и передаёт ему энергию. Эти процессы повторяются несколько раз до полной остановки краудиона. Благодаря такому взаимодействию краудион-фокусонная пара перемещается за заметно большее расстояние в кристалле по сравнению с одиночным краудионом. Характер взаимодействия краудиона и движущегося за ним фокусона даёт основание считать эту пару единым целым – неким тандемом.

**Ключевые слова:** метод молекулярной динамики, фокусон, краудион, n-краудион, краудион-фокусонная пара, кристаллическая решётка.

---

**Для цитирования:** Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Дмитриев С.В., Захаров П.В. Энергообмен внутри сверхзвуковых краудион-фокусонных пар в 3D компьютерной модели кристалла Cu // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2026. Т. 23, № 1. С. 80-87. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.009.

---

Original article

## ENERGY EXCHANGE INSIDE SUPERSONIC CROWDION-FOCUSON PAIRS IN 3D COMPUTER MODEL OF Cu CRISTAL

Nikolay N. Medvedev<sup>1†</sup>, Mikhail D. Starostenkov<sup>2</sup>, Sergey V. Dmitriev<sup>3,4</sup>, Pavel V. Zakharov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Trofimov St. Biysk, 659305, Russia

<sup>2</sup>I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

<sup>3</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS, Khalturin Str., 39, Ufa, 450001, Russia

<sup>4</sup>National Research Tomsk State University, 36 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia

<sup>5</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politeknicheskaya Str., 29, St. Petersburg, 195251, Russia  
<sup>†</sup>nnm42@rambler.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>

<sup>2</sup>genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

<sup>3</sup>dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>

<sup>4</sup>zakharovpvl@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6410-1594>

**Abstract.** By the method of molecular dynamics using the modified Morse potential, the question of the interaction of crowdion and focuson inside the crowdion-focuson pair in a model copper crystal is considered. It is shown that two atoms located at some distance from each other in one tightly packed row and launched at the same speed, an order of magnitude or more exceeding the threshold rate of formation of a Frenkel pair, form a crowdion-focuson pair, inside which energy is exchanged during movement.

At first, the crowdion, moving at supersonic speed, leaves a trail of atoms with a higher potential energy compared to what they had before it passed. The focuson moving after the crowdion accelerates relative to the crowdion due to the potential energy of the trace atoms, catching up with the crowdion, it transfers part of its kinetic energy to it. Then there is an increase in the distance between the crowdion and the focuson to the original. Then the focuson again catches up with the crowdion and transfers energy to it. These processes are repeated several times until the crowdion is completely stopped. Due to this interaction, the crowdion-focus pair moves a noticeably greater distance in the crystal compared to a single crowdion. The nature of the interaction of the crowdion and the focuson moving behind it gives reason to consider this pair as a single whole - a kind of tandem

**Keywords:** molecular dynamics method, focuson, crowdion, n-crowdion, crowdion-focuson pair, crystal lattice.

**For citation:** Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Dmitriev S.V., Zakharov P.V. (2026). Energy exchange inside supersonic crowdion-focuson pair in 3D computer model of Cu crystal. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 80-87. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.009.

### Введение

Краудион - это локальное сгущение атомов в плотноупакованном ряду, вызванное междоузельным атомом [1-3]. Этот дефект кристаллической решётки, обладая большой подвижностью, играет заметную роль в переносе массы и энергии в неравновесных процессах. Прежде всего в таких как термическое воздействие на металлы и сплавы [4], их пластическая деформация [5], радиационное облучение поверхности кристалла [6-11].

Относительно недавно была предложена и развита концепция n-краудиона [12 - 18]. Этот дефект образуется не одним, а несколькими междоузельными атомами, находящимися в одном плотноупакованном ряду. Он также обладает высокой подвижностью и рассматрива-

ется как один из механизмов, вызывающих эффект дальнего действия, и эффект «малых доз» [19], например, в ионно-имплантированных металлических материалах [20, 21].

Как нетрудно видеть, процессы, в которых фигурируют краудионы довольно часто рассматриваются в современной научной литературе. Тематика, связанная с краудионами на протяжении многих лет остаётся актуальной.

Фокусоны – это эстафетная передача импульса налетевшей частицы атомам кристалла с фокусировкой импульса вдоль плотноупакованного ряда [22 - 24]. Этому эффекту, несмотря на давность момента его открытия практически не уделяется внимания в современных научных публикациях. Из публикаций, посвящённых фокусонам следовало, что атомы, передающие импульс своим соседям вдоль плот-

ноупакованного ряда не обладают достаточной энергией для образования пары Френкеля – вакансии и краудиона.

В работе [25] показано, что фокусоны могут играть не менее важную роль чем краудионы в процессах массопереноса. Переносят энергию выше пороговой образования пары Френкеля; порождаются краудионом и при этом существуют в паре с впереди движущимся краудионом.

Настоящая публикация является продолжением работы [25]. Данная статья посвящена взаимодействию фокусона и краудиона внутри образованной ими пары.

### Методы

Для изучения процесса обмена энергией между фокусомом и краудионом внутри краудион – фокусонной пары, методом молекулярной динамики был построен расчётный блок моделирующий 3D кристалл меди размером  $84 \times 12 \times 9$  частиц.

Взаимодействие между атомами осуществлялось посредством модифицированного потенциала Морзе, к которому был добавлен отталкивающий потенциал Борна-Майера. Необходимость модификации потенциала Морзе вызвана тем, что при больших кинетических энергиях он занижает диаметры молекул.

$$U(r) = D\beta(\beta e^{-2ar} - 2e^{-ar}) + \frac{cD a_0}{\delta} \exp\left(-\delta \frac{(r - a_0)}{a_0}\right) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i U_{V=V_0} = E_s \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{V=V_0} = 0 \\ -V_0 \left( \frac{\partial P_s}{\partial V} \right)_{x=0} = K_0 \\ \frac{1}{3} + \frac{V}{2} \cdot \left( \frac{\partial^2 (P_s \cdot V^{\frac{2}{3}})}{\partial V^2} \right) / \left( \frac{\partial (P_s \cdot V^{\frac{2}{3}})}{\partial V} \right) = -\gamma_0, \end{array} \right. \quad (2)$$

В формуле (1)  $r$ -расстояние между атомами;  $a_0$ - минимальное расстояние между атомами в невозмущённом кристалле;  $c = 1 \text{ \AA}^{-1}$  - размерный коэффициент, который в дальнейшем изложении опущен. Все коэффициенты (1) находятся из системы уравнений (2), где  $\eta_i$  – число атомов в  $i$  – координационной сфере;  $z$  – количество учитываемых сфер;  $E_s$  – энергия сублимации атомов кристалла при нуле Кель-

вин;  $K_0$  – объёмный модуль упругости;  $P_s$  – давление изоэнтропического сжатия;  $V_0$  и  $V$  – удельные объёмы в начальном и деформированном состояниях;  $\gamma_0$  – постоянная Грюнайзена.

Последнее уравнение в системе (2) необходимо для нахождения  $\delta$ , и следует из формулы Дугдала – Мак – Дональда с учётом равенств между первым и вторыми производными от изоэнтропической зависимости давления при  $V = V_0$  и изотермической, при нуле Кельвин [26, 27]. Подробности о том, из каких соображений получена система (2) и о том, какие получают уравнения для расчёта коэффициентов потенциала (1) можно найти в работе [28].

Используемый потенциал не является универсальным и предназначен только для моделирования процессов столкновения атомов обладающих большой кинетической энергией внутри кристалла.

В начальный момент времени температура ячейки задавалась равной нулю. На границы расчётной ячейки накладывались периодические условия.

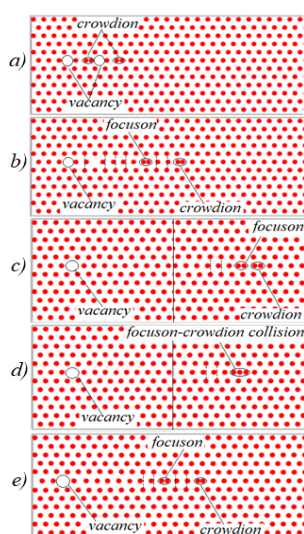
Параметры потенциала Морзе были следующими,  $D = 0.459 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 0.393 \text{ \AA}^{-1}$ ,  $\beta = 0.496$ ,  $a = 3.6 \text{ \AA}$ ,  $\delta = 14.74$ . Визуализировалась одна из плоскостей (111) кристалла Си имеющего ГЦК решётку.

### Результаты и обсуждения

Для рассмотрения процессов взаимодействия краудиона и фокусона внутри краудион-фокусонной пары в компьютерных экспериментах двум соседним атомам, находящимся в одном плотноупакованном ряду и на некотором расстоянии друг от друга сообщалась одинаковая по модулю и по направлению скорость. Расстояние варьировалось в пределах от 2 до 10 межатомных расстояний, скорость от  $100 \text{ \AA/ps}$  до  $150 \text{ \AA/ps}$ . Для данного потенциала и рассматриваемого ГЦК кристалла Си пороговая скорость образования пары Френкеля, приблизительно,  $68 \text{ \AA/ps}$ . (что соответствует  $\approx 29 \text{ эВ}$ ).

Наблюдалось следующее развитие событий. Как и ожидалось [25], сначала распространялись два краудиона (см. рис.1 а)), затем один из них рекомбинировал с вакансией и превратился в фокусон. На рис.1 б) уже фокусон и краудион, первый движется вслед за вторым. При этом расстояние между ними постоянно

сокращалось см. рис.1 b), c). Через некоторое время фокусон догнал краудион и передал ему часть своего импульса. Этот момент показан на рис.1 d). После чего краудион удалялся от фокусона на расстояние, которое было между атомами, инициирующими краудион-фокусонную пару в начальный момент времени см. рис.1 e). Затем процесс повторялся. Фокусон снова догонял краудион, передавал ему свой импульс, отставал от него, снова догонял и так повторялось до полной остановки краудиона.

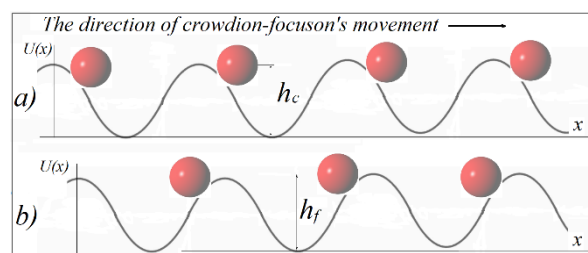


**Рис.1.** Процесс образования краудион-фокусонной пары и процесс их взаимодействия. Начальная скорость атомов 150 А/пс. Первоначальное расстояние между атомами, которым сообщили скорость вдоль плотноупакованного ряда – 3 межатомных расстояния; a) движение двух краудионов; b) движение краудион-фокусонной пары; c) сближение краудиона и фокусона до одного межатомного расстояния; d) столкновение фокусона и краудиона; e) фокусон отстал от краудиона до исходного расстояния. Вертикальная линия – место соединения двух частей изображения расчётного блока. Вертикальная пунктирная линия – перевал потенциала Пайерлса-Набарро

**Fig.1:** The process of formation of a crowdion-focuson pair and the process of their interaction. The initial velocity of the atoms is 150 A/ps. The initial distance between atoms that began to move at the same speed along a tightly packed series is 3 interatomic distances; a) movement of two crowdions; b) movement of the crowdion-focuson pair; c) convergence of crowdion and focuson to one interatomic distance; d) collision of focuson and crowdion; e) the focuson lagged behind the crowdion to the original distance. The vertical line is the junction of two parts of the image of the calculation

unit. Vertical dotted line - Peierls-Nabarro potential pass.

В результате в первом и во втором случае атомы следа обладают потенциальной энергией, зависящей от величин  $h_c$  и  $h_f$  соответственно см. рис. 2.



**Рис.2.** Позиции атомов в потенциальном поле плотноупакованного ряда сразу после прохождения a) краудиона; b) фокусона.

Параметры  $h_f$  и  $h_c$  характеризующие потенциальную энергию атомов в следе краудиона и фокусона соответственно.

**Fig.2:** The positions of the atoms in the potential field of the close-packed series immediately after passing a) the crowdion; b) focuson. The  $h_f$  and  $h_c$  parameters characterizing the potential energy of the atoms in the trail of crowdion and focuson, respectively.

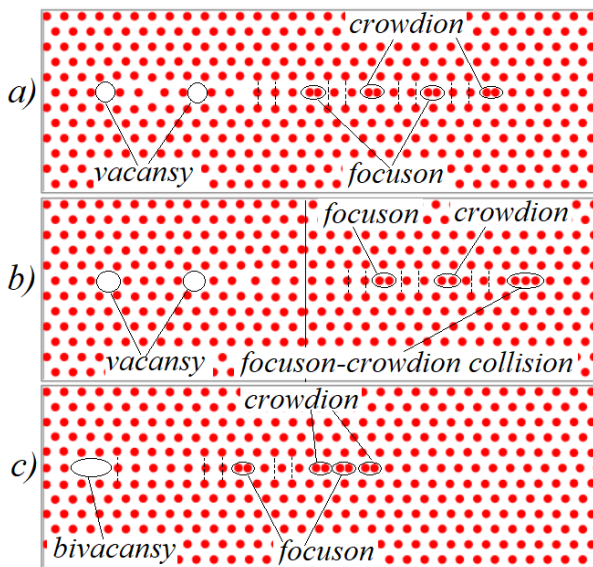
Возможно три случая, когда  $h_c > h_f$ ,  $h_c < h_f$  и  $h_c \approx h_f$ . Очевидно, что если  $h_c > h_f$ , то фокусон будет разгоняться, за счёт потенциальной энергии атомов следа краудиона. Если же  $h_c < h_f$ , то фокусон следующий за краудионом будет отставать от него.

Ясно, что краудион при движении постоянно теряет свою энергию, в том числе сообщая потенциальную энергию атомам своего следа и соответственно частично передаёт часть своей рассеянной энергии фокусону. Фокусон в свою очередь догнав краудион передаёт ему часть своего импульса и энергии, т.е. в процессе движения они постоянно обмениваясь энергией образуют нечто единое целое, тандем.

В рассматриваемом случае выполняется неравенство  $h_c > h_f$ , поэтому скорость фокусона выше чем у краудиона.

Если запустить в одном направлении не пару, а четвёрку атомов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, то фокусон движется быстрее краудиона только если они инициированы первой парой атомов. Инициированные второй парой атомов фокусон и

краудион со временем отдаляются друг от друга, за счёт отставания фокусона, либо движутся на некотором относительно постоянном расстоянии друг от друга. Иллюстрацией этого случая является рис.3. На рис.3 *a*) позиции вакансий, краудионов и фокусонов почти сразу после запуска четвёрки атомов. На рис. 3 *b*) показано столкновение фокусона и краудиона инициированных первой двойкой атомов. Фокусон и краудион инициированные второй парой атомов не сближаются.



**Рис.3.** Процесс образования двух краудион-фокусонных пар и процесс взаимодействия краудионов и фокусонов внутри этих пар.

*a*) инициация двух краудион-фокусонных пар; *b*) столкновение фокусона и краудиона первой пары, дистанция между краудионом и фокусонном во второй паре; *c*) отставание фокусона от своего краудиона во второй краудион-фокусонной паре. Начальная скорость атомов 140 А/пс. Начальное расстояние между атомами *a*), *b*) 3 межатомных расстояния; *c*) 0 межатомных расстояний.

**Fig.3:** The process of formation of two crowdion-focion pairs and the process of interaction of crowdions and foci within these pairs. *a*) initiation of two crowdion-focions pairs; *b*) collision of focion and crowdion of the first pair, distance between crowdion and focion in the second pair; *c*) the lag of the focion from its crowdion in the second crowdion-focion pair. Initial atom velocity 140 А/ps. Initial distance between atoms *a*), *b*) 3 interatomic distances; *c*) 0 interatomic distances.

Если запустить четвёрку атомов плотноупакованного ряда которая состоит из ближайших соседей, то в отличие от предыдущего

случая фокусон во второй паре отстаёт от своего краудиона см. рис.3 *c*).

Возвращаясь к вопросу об обмене энергией между движущимися солитонами ситуация на рис. 3 *b*) *c*) наталкивает на мысль что энергию от впереди движущегося краудиона может получать не только следующий за ним фокусон, но и следующий за ним краудион. Эту гипотезу мы намерены проверить в будущем.

Очевидно также, что краудион-фокусонная пара, обменивающаяся энергией, является единым целым или нужно признать, что краудион имеет возможность возвращать рассеянную им энергию, что противоречит законам термодинамики

### Заключение

Методом молекулярной динамики с использованием модифицированного потенциала Морзе показано, что два атома, находящиеся друг от друга на некотором расстоянии в одном плотноупакованном ряду и запущенные с одной скоростью, на порядок и более превышающей пороговую скорость образования пары Френкеля, образуют краудион-фокусонную пару, внутри которой в процессе движения происходит обмен энергией.

Краудион перемещаясь со сверхзвуковой скоростью оставляет за собой атомы в плотноупакованном ряду с более высокой потенциальной энергией по сравнению с той, что была у них до его прохождения. Фокусон, за счёт этой потенциальной энергии ускоряется относительно краудиона. Передав часть своего импульса краудиону, фокусон отстаёт от краудиона до стартового расстояния. Затем он снова догоняет его передаёт ему часть своей кинетической энергии. Эти процессы повторяются несколько раз до полной остановки краудиона. В этих процессах краудион и фокусон представляют собой нечто единое целое – тандем.

### Список литературы

1. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Potekatev A.I., Kalugina V.V., Medvedev N.N., Neverova T.I., Barchuk A.A. The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials // Russian Physics Journal. - 2012 – V. 54. (11). P. 1241-1248.
2. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Захаров П.В. Фокусирую-

- щиеся и краудионные столкновения атомов в трёхмерной модели упорядоченного сплава CuAu со сверхструктурой  $L_{11}$  // Перспективные Материалы. – 2011. - №12 – С. 321 – 326.
3. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Zakharov P.V., Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel // Computational Materials Science. – 2009. V.47(2). P 429-431.
  4. Mehrer H., Diffusion in Solids / Springer-Verlag, Berlin 2007. 645 p.
  5. Indenbom V.L. Interstitial (crowdion) mechanism of plastic deformation and failure // JETP Lett. – 1970. – V.12. – P. 369–371.
  6. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V., Pokropivny A.V. Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock // Model. Simul. Mater. Sc. – 1997. – 5. – P. 579.
  7. Нацик В.Д., Смирнов С.Н. Дислокации и краудионы в двумерных кристаллах. Часть III: пластическая деформация кристалла как результат перемещения дефектов и их взаимодействие с полем напряжений // Физика Низких Температур – 2016 – Т. 42 (3) – С. 268-282.
  8. Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // J. Nucl. Mater. – 2000. – 276. – P. 41.
  9. Salehinia I., Bahr D.F. The impact of a variety of point defects on the inception of plastic deformation in dislocation free metals // Scripta Mater. – 2012. – 66. – P. 339.
  10. Kononenko V.G., Bogdanov V.V., Turenko A.N., Volosyuk M.A., Volosyuk A.V. // Probl. At. Sci. Tech. – 2016. – 104. – P. 15.
  11. Korbil A., Bochniak W. Stratified plastic flow in metals // Int. J. Mech. Sci. – 2017. – 128. – P. 269.
  12. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В., Многочастичные краудионные столкновения // ФПСМ. – 2016. – Т. 13. - № 3. – С. 321-325
  13. Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Chetverikov A.P., Zhou K., Velarde M.G. Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions // Phys. Status Solidi - RRL. – 2017. – V.11. – P. 1700298.
  14. Korznikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A., Dmitriev S. Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions // Letters on Materials. – 2019. – V.9. – P. 386–390.
  15. Bayazitov A.M., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Shepelev I.A., Fomin S.Y., Korznikova E.A. Features of mass transfer by N-crowdions in fcc Ni3Al lattice // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. – 2019. – P. 012033.
  16. Korznikova E.A., Shepelev I.A., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V., Fomin S.Y., Zhou K. Dynamics and Stability of Subsonic Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal // J. Exp. Theor. Phys. – 2018. – V.127. – P. 1009–1015.
  17. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // Phys. Lett. A. – 2020. – V.384. – P. 126032.
  18. Сунгатова И.Р., Семёнов А.С., Баязитов А.М., Корзникова Е.А. Динамика сверхзвуковых 2-краудионов в нелинейных двумерных решетках // ФПСМ. – 2019. – Т.16, №4. С 482 – 488.
  19. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. – М.: Энергоатомиздат, 2001. - 286 с.
  20. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. / НТЛ, Томск - 2004. - 326 с.
  21. Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Kadyrov R.I., Rudenski G.E., Sharkeev Yu.P. The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation // Technical Physics Letters. - 1999. - V. 25 (3). - P. 209 -211.
  22. Silsbee R.H. Focusing in Collision Problems in Solids // Journal of Applied Physics. – 1957. – V.28 (11) – P. 1246 – 1250.
  23. Гарбер Р.И., Федоренко А.И. Фокусировка атомных столкновений в кристаллах // УФН. – 1964. – Т. 83 (3). – С 185 -432.
  24. Wehner G. K. Sputtering of Metal Single Crystals by Ion Bombardment // Journal of Applied Physics, 1955. – V. 26. (8) – P. 1056-1057.
  25. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Дмитриев С.В., Сверхзвуковые краудион-фокусонные тандемы в 3D компьютерной модели кристалла Cu // Фундаментальные проблемы современного материаловедения (в печати).
  26. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Физматгиз, Москва 1963. 632 с.

27. Попов А.Г., Бородай В.Э., О построении уравнений состояния твёрдых тел с использованием потенциалов межатомного взаимодействия // Изв. Вуз. Физика. - 2005 Т. 48 (3). – С.3 - 8.

28. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Шайхутдинова Т.А. Модификация потенциала Морзе для моделирования взаимодействия атомов, обладающих высокой энергией // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т.8 (1). – С. 99 – 104.

### Информация об авторах

*Н. Н. Медведев – доктор физико-математических наук, профессор Бийского технологического института.*

*М. Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*С.В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник института проблем сверхпластичности металлов РАН; профессор Национального исследовательского Томского государственного университета.*

*П. В. Захаров – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.*

### References

1. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Potekatev A.I., Kalugina V.V., Medvedev N.N., Neverova T.I., Barchuk A.A. The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials // Russian Physics Journal. - 2012 – V. 54. (11). P. 1241-1248.
2. Medvedev N.N., Starostenkov M. D., Markidonov A.V., Zakharov P.V. (2011) Self-focusing and crowding collisions of atoms in a three-dimensional model of an ordered CuAu alloy with superstructure  $L_{11}$  // Perspektivnye Materialy (Promising materials). – №12 – P. 321 – 326. (In Russ.).
3. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Zakharov P.V., Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel // Computational Materials Science. – 2009. V.47(2). P 429-431.

4. Mehrer H., Diffusion in Solids / Springer-Verlag, Berlin 2007. 645 p.

5. Indenbom V.L. Interstitial (crowdion) mechanism of plastic deformation and failure // JETP Lett. – 1970. – V.12. – P. 369–371.

6. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V., Pokropivny A.V. Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock // Model. Simul. Mater. Sc. – 1997. – 5. – P. 579.

7. Natsik V.D., Smirnov S.N. Dislocations and crowdions in two-dimensional crystals. Part III: Plastic deformation of the crystal as a result of defect movement and defect interaction with the field of elastic stresses // Physica nizkikh temperatur (Physics of Low Temperatures). – 2016. – V. 42 (3) – P. 268 - 282.

8. Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // J. Nucl. Mater. – 2000. – 276. – P. 41.

9. Salehinia I., Bahr D.F. The impact of a variety of point defects on the inception of plastic deformation in dislocation free metals // Scripta Mater. – 2012. – 66. – P. 339.

10. Kononenko V.G., Bogdanov V.V.,

Turenko A.N., Volosyuk M.A., Volosyuk A.V. // Probl. At. Sci. Tech. – 2016. – 104. – P. 15.

11. Korbel A., Bochniak W. Stratified plastic flow in metals // Int. J. Mech. Sci. – 2017. – 128. – P. 269.

12. Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2016) Multi-particle crowdion collisions // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 13, 321–325. (In Russ.).

13. Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Chetverikov A.P., Zhou K., Velarde M.G. Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions // Phys. Status Solidi - RRL. – 2017. – V.11. – P. 1700298.

14. Korznikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A., Dmitriev S. Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions // Letters on Materials. – 2019. – V.9. – P. 386–390.

15. Bayazitov A.M., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Shepelev I.A., Fomin S.Y., Korznikova E.A. Features of mass transfer by N-crowdions in fcc

- Ni<sub>3</sub>Al lattice // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. – 2019. – P. 012033.
16. Korznikova E.A., Shepelev I.A., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V., Fomin S.Y., Zhou K. Dynamics and Stability of Subsonic Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal // J. Exp. Theor. Phys. – 2018. – V.127. – P. 1009–1015.
17. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // Phys. Lett. A. – 2020. – V.384. – P. 126032.
18. Sungatova I.R., Semenov A.S., Bajazitov A.V., Korznikova E.A. (2019) Dynamics of Supersonic 2-Crowdions in Nonlinear Two-Dimensional Lattices // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 16, 482–488. (In Russ.).
19. Mamontov A.P., Chernov I. P. Effect of small doses of ionizing radiation //Energoatomizdat, 2001. – 286 p. (In Russ.).
20. Didenko A.N., Shakreev Jy.P., Kozlov E. V., Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Long-range effects in ion-implanted metal materials. / NTL, Tomsk - 2004. - 326 p. (in Russ.).
21. Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Kadyrov R.I., Rudenski G.E., Sharkeev Yu.P. The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation // Technical Physics Letters. - 1999. - V. 25 (3). - P. 209 -211.
22. Silsbee R.H. Focusing in Collision Problems in Solids // Journal of Applied Physics. – 1957. – V.28 (11) – P. 1246 – 1250.
23. Garber R.I., Fedorenko A.I. Focusing of atomic collisions in crystals // Phys. Usp. – 1964. – V. 7 (4). – P. 479 – 507.
24. Wehner G. K. Sputtering of Metal Single Crystals by Ion Bombardment // Journal of Applied Physics, 1955. – V. 26. (8) – P. 1056-1057.
25. Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Supertonic crowdion-focuson complexes in 3D computer model of Cu crystal. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)), article in press.
26. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena / Dover Publications, INC. Mineola, New York 2002. 896 p.
27. Popov A.G., Borodai V.E. On the Construction of Equations of State For Solids with the Use of Interatomic Interaction Potentials // Russian Physics Journal. – 2005 V. 48 (7). – P. 665 – 670.
28. Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Shaihutdinova T.A. Modification of the Morse potential to simulate the interaction of atoms with high energy // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). – 2011. – T.8 (1). – C. 99 – 104. (In Russ.).

#### Information about the authors

*N. N. Medvedev* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University.

*M. D. Starostenkov* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

*S.V. Dmitriev* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences; National Research Toms State University.

*P. V. Zakharov* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, St. Petersburg Polytechnic University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 28 Jan.2026; approved after reviewing 23 Feb.2026; accepted for publication 02 Mar.2026.