

УДК 548.75: 539.216.2: 544.77

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>



## Кинетика коллоидной системы стабилизированного нитрида бора на водной субфазе

И. В. Локтионова<sup>1</sup> ✉, А. П. Кузьменко<sup>1</sup>, А. И. Жакин<sup>1</sup>, В. М. Емельянов<sup>1</sup>,  
П. В. Абакумов<sup>2</sup>, Ю. А. Неручев<sup>3</sup>, В. В. Филиппов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Курский государственный медицинский университет  
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

<sup>3</sup> Курский государственный университет,  
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

<sup>4</sup> Липецкий государственный педагогический университет им. П. П. Семенова-Тян-Шанского  
ул. Ленина, д. 42, г. Липецк 398020, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Резюме

**Цель.** Получение коллоидного раствора, стабилизированного стеариновой кислотой наночастиц гексагонального нитрида бора, анализ и визуализация структурообразования и его пространственных характеристик, создание и исследование плавающих монослоев на водной поверхности.

**Методы.** Определение химической структуры проводилось с помощью ИК-спектроскопии; моделирование кристаллической структуры и процессов синтеза коллоидного раствора осуществлялось с использованием программного пакета Materials Studio 2020 с модулями CASTEP, Forsite, Blends Calculation и Dmol3; исследование процесса формирования монослоя проводилось на установке для формирования и исследования монослоев методом Ленгмюра – Блоджетт KSV Nima 2002, располагающей весами Вильгельми; брюстеровская микроскопия и термостабилизация.

**Результаты.** Синтезирована коллоидная система стабилизированных стеариновой кислотой наночастиц гексагонального нитрида бора. С помощью моделирования из первых принципов показано отсутствие химических реакций и молекулярных деформаций стеариновой кислоты в дисперсионной среде коллоидной системы (хлороформ), а также деформации кристаллических и молекулярных структур при пассивировании молекул стеариновой кислоты на поверхности наночастиц гексагонального нитрида бора. Методами ИК-спектроскопии установлено полное испарение дисперсионной среды и факт устойчивой стабилизации наночастиц. Полученные результаты ИК-спектроскопии хорошо согласуются с данными ab-initio моделирования, показывающими присоединение молекул стеариновой кислоты к поверхности наночастиц гексагонального нитрида бора полярными группами, содержащими атомы кислорода, так как в этом случае достигается минимальное значение энергии данной системы.

**Заключение.** В работе показана возможность устойчивой стабилизации наночастиц гексагонального нитрида бора молекулами стеариновой кислоты и последующего создания из них монослоя для осаждения бездефектных тонких пленок методом Ленгмюра – Блоджетт с востребованными механическими, электрическими, оптическими и термическими свойствами.

**Ключевые слова:** метод Ленгмюра – Блоджетт; гексагональный нитрид бора; ИК-спектроскопия.

**Финансирование:** Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

© Локтионова И. В., Кузьменко А. П., Жакин А. И., Емельянов В. М., Абакумов П. В., Неручев Ю. А., Филиппов В. В., 2023

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Кинетика коллоидной системы стабилизированного нитрида бора на водной субфазе / И. В. Локтионова, А. П. Кузьменко, А. И. Жакин, В. М. Емельянов, П. В. Абакумов, Ю. А. Неручев, В. В. Филиппов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 211–223. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>

Поступила в редакцию 20.07.2023

Подписана в печать 28.08.2023

Опубликована 29.09.2023

## Kinetics of the Colloidal System of Stabilized Boron Nitride in the Aqueous Subphase

Inna V. Loktionova<sup>1</sup> ✉, Alexander P. Kuzmenko<sup>1</sup>, Anatoly I. Zhakin<sup>1</sup>,  
Victor A. Emelyanov<sup>1</sup>, Pavel V. Abakumov<sup>2</sup>, Anatoly Yu. Neruchev<sup>3</sup>,  
Vladimir V. Filippov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Kursk State Medical University  
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

<sup>3</sup> Kursk State University  
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

<sup>4</sup> Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky  
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Abstract

**Purpose.** Preparation of a colloidal solution stabilized with stearic acid of hexagonal boron nitride nanoparticles, analysis and visualization of structure formation and its spatial characteristics, creation and study of floating monolayers on the water surface.

**Methods.** The determination of the chemical structure was carried out using IR spectroscopy; modeling of the crystal structure and processes of colloidal solution synthesis was carried out using the Materials Studio 2020 software package with CASTEP, Forsite, Blends Calculation and Dmol3 modules; study of the formation of a monolayer on a setup for the formation and study of monolayers by the Langmuir-Blodgett method KSV Nima 2002, equipped with a Wilhelmy balance, Brewster microscopy and thermal stabilization.

**Results.** A colloidal system of hexagonal boron nitride nanoparticles stabilized with stearic acid has been synthesized. The absence of chemical reactions and molecular deformations of stearic acid in the dispersed medium of a colloidal system (chloroform), as well as deformations of crystalline and molecular structures during passivation of stearic acid molecules on the surface of hexagonal boron nitride nanoparticles are shown using first-principles modeling. IR spectroscopy methods have established the complete evaporation of the dispersion medium and the fact of stable stabilization of nanoparticles. The obtained IR spectroscopy results are in good agreement with ab-initio modeling data showing the attachment of stearic acid molecules to the surface of hexagonal boron nitride nanoparticles by polar groups containing oxygen atoms, since in this case the minimum energy value of this system is achieved.

**Conclusion.** The paper shows the possibility of stable stabilization of hexagonal boron nitride nanoparticles by stearic acid molecules and subsequent creation of a monolayer from them for deposition of defect-free thin films by the Langmuir-Blodgett method with demanded mechanical, electrical, optical and thermal properties.

**Keywords:** Langmuir-Blodgett method; ferroelectrics; barium titanate; ferroelectric polarization.

**Funding:** The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).

**Conflict of interest:** The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Loktionova I. V., Kuzmenko A. P., Zhakin A. I., Emelyanov V. M., Abakumov P. V., Neruchev A. Yu., Filippov V. V. Kinetics of the Colloidal System of Stabilized Boron Nitride in the Aqueous Subphase. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 211–223. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>

Received 20.07.2023

Accepted 28.08.2023

Published 29.09.2023

\*\*\*

## Введение

Создание и исследование регулярных пленочных структур в нанометровом диапазоне продиктовано последними тенденциями развития многофункциональной элементной базы электроники и оптоэлектроники [1–3]. В этой связи нарастает востребованность метода Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ), который формирует бездефектные молекулярные моно- и мультиструктуры с заданной архитектурой. В классическом методе ЛБ на твердую подложку переносится сформированный на водной поверхности слой амфифильного вещества, однако многие материалы, представляющие интерес как в прикладном, так и в фундаментальном аспекте, данной дифильностью не обладают.

Одним из таких веществ является гексагональный нитрид бора (ГНБ), который привлекает внимание благодаря уникальным механическим, тепловым, электрическим, пьезоэлектрическим и оптическим свойствами [4–17]. Методом наноиндендирования в работах [18; 19] исследовались механические свойства монослойных и малослойных (1–4 слоев) пленок ГНБ, прочность которых на разрыв составила 70,5 ГПа, модуль Юнга  $0,865 \pm 0,073$  ТПа, при дальнейшем увеличении толщины никаких изменений физических свойств не наблюдалось [20; 21].

Нанопленки нитрида бора проявляют выраженную устойчивость к окислению на воздухе при температуре выше  $800^\circ\text{C}$ , эта превосходная термостойкость делает

их отличным барьером для защиты металлов от окисления при высоких температурах [22]. Значительная ширина запрещенной зоны  $\sim 6$  эВ позволяет использовать нанопленки ГНБ как самый тонкий электроизоляционный материал, подходящий для диэлектрических подложек [23].

Проблема ограниченности выбора наносимых систем в ЛБ методе решается искусственной стабилизацией веществ. Однако получение пленок функционализированных материалов невозможно без понимания процессов, происходящих в интерфейсе «нитрид бора – стабилизатор», которые являются источником изменений свойств нитрида бора [24].

## Материалы и методы

Коллоидная система (КС) стабилизированного гексагонального нитрида бора  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$  была синтезирована методом химической конденсации с 10%-ной концентрацией наночастиц нитрида бора при наличии в среде стабилизатора, в роли которого выступала стеариновая кислота  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ . Для приготовления данного КС х.ч. стеариновая кислота предварительно растворялась в х.ч. хлороформе  $\text{CHCl}_3$ , после добавления наночастиц ГНБ полученный раствор обрабатывался в ультразвуковой ванне 5 мин при мощности 50 Вт.

Пленки  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$  на водной поверхности исследовались на установке KSV NIMA 2002 с ванной объемом 176 мл. В качестве жидкой подложки – субфазы использовалась деионизированная вода ( $\sim 18$  МОм). После заполнения ванны ее

поверхность очищалась вакуумным аспиратором с контролем поверхностного натяжения весами Вильгельми с чувствительностью 4 мкН/м. При нанесении КС  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$  на водную субфазу хлороформ испарялся, а на поверхности оставался тонкий слой стабилизированных частиц ГНБ. Для изучения процесса испарения применялся ИК-Фурье-спектрометр (Nicolet iS50) в среднем инфракрасном диапазоне. На алмазный кристалл приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) устанавливалась жидкостная ячейка, в которую помещалось 5 мкл  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$ . Испарение хлороформа производилось на открытом воздухе при комнатной температуре. Накопление 32 ИК-спектров со спектральным разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$  в каждом измерении производилось с интервалом 2 минуты.

Для моделирования кристаллической структуры и процессов синтеза КС  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$  применялся программный пакет Materials Studio 2020 с модулями CASTEP, Forcite и Dmol<sup>3</sup>. CASTEP – модуль для анализа геометрии и свойств кристаллических материалов, основанный на квантово-механических расчетах, применяющий метод псевдопотенциала в плосковолновом приближении, что приводит к кубической зависимости времени, необходимого для вычислений от количества атомов в модели. При этом оптимизация геометрии кристаллической структуры происходит на основе уравнения состояния Берч – Мурнагана третьего порядка

$$P = \frac{3}{2}B \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{7/3} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{5/3} \right] \times \left\{ 1 + \frac{3}{4} \left( 4 - \frac{dB}{dP} \right) \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{2/3} - 1 \right] \right\},$$

где  $P$  – давление;  $B$  – модуль объемного сжатия материала;  $V_0$  – равновесный объем.

Модуль Dmol<sup>3</sup> для ab-initio расчетов использует теорию функционала плотности (DFT) для отдельных атомов, что значительно повышает точность производимых с его помощью расчетов. Согласно этой модели в адиабатическом приближении многоэлектронные системы описываются следующим выражением для гамильтониана:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \sum_i \nabla_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{e^2}{|r_i - r_j|} - \sum_{i,l} \frac{Ze^2}{|r_i - R_l|} = T + V_{ee} + V_{ext},$$

где  $H$  – гамильтониан системы;  $T$  – кинетическая энергия системы;  $V_{ee}$  – кулоновское взаимодействие между электронами;  $V_{ext}$  – потенциал внешнего возмущения.

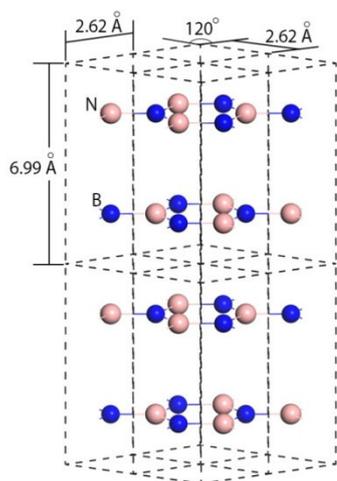
Forcite – модуль, применяемый для быстрой оптимизации геометрии кристаллической структуры за счет схем суммирования Эвальда, учитывающих короткодействующие и дальнедействующие компоненты электростатического взаимодействия.

Кинетика формирования монослоев КС  $\text{BN}/\text{CHCl}_3$  на водной поверхности исследовалась с помощью  $\pi$ -A изотерм и гистерезиса сжатия-растяжения, совмещенных с брьюстеровской микроскопией KSV Nima MicroBAM с разрешением 12 мкм и полем зрения  $3600 \times 4000$  мкм.

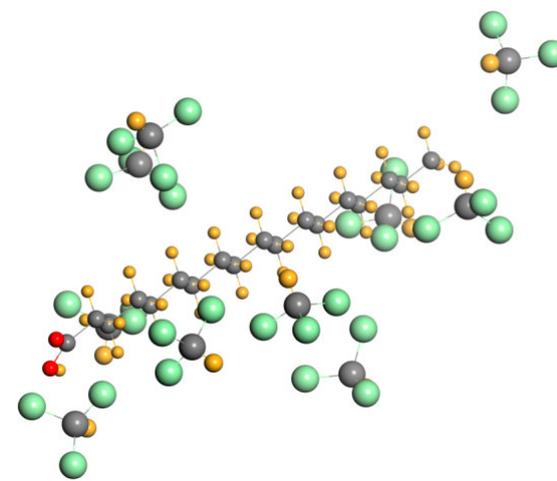
## Результаты и их обсуждение

Модель кристалла гексагонального нитрида бора при нормальных условиях, состоящая из жестко связанных атомов бора и азота, представлена на рисунке 1, а. Геометрия кристаллической структуры ГНБ принадлежит пространственной группе  $R\bar{6}_3/mmc$  в стандартной установке с параметрами  $a = b = 2,62 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,99 \text{ \AA}$ . При этом кристаллографические координаты для атомов бора и атомов азота выглядят следующим образом:  $(1/3, 2/3, 1/4)$

и (1/3, 2/3, 3/4) соответственно. После оптимизации кристаллической геометрии с помощью модуля Forcite расстояние между плоскостями составило 3,497 Å. Данное значение отличается от табличного на 0,002 Å (3,495 Å) или 0,06%, т. е. обладает хорошей сходимостью.



а



б

**Рис. 1.** Структура кристалла нитрида бора (а) и системы хлороформ – стеариновая кислота (б) по данным моделирования Materials Studio

**Fig. 1.** Structure of boron nitride crystal (а) and chloroform - stearic acid system (б) by modeling data Materials Studio

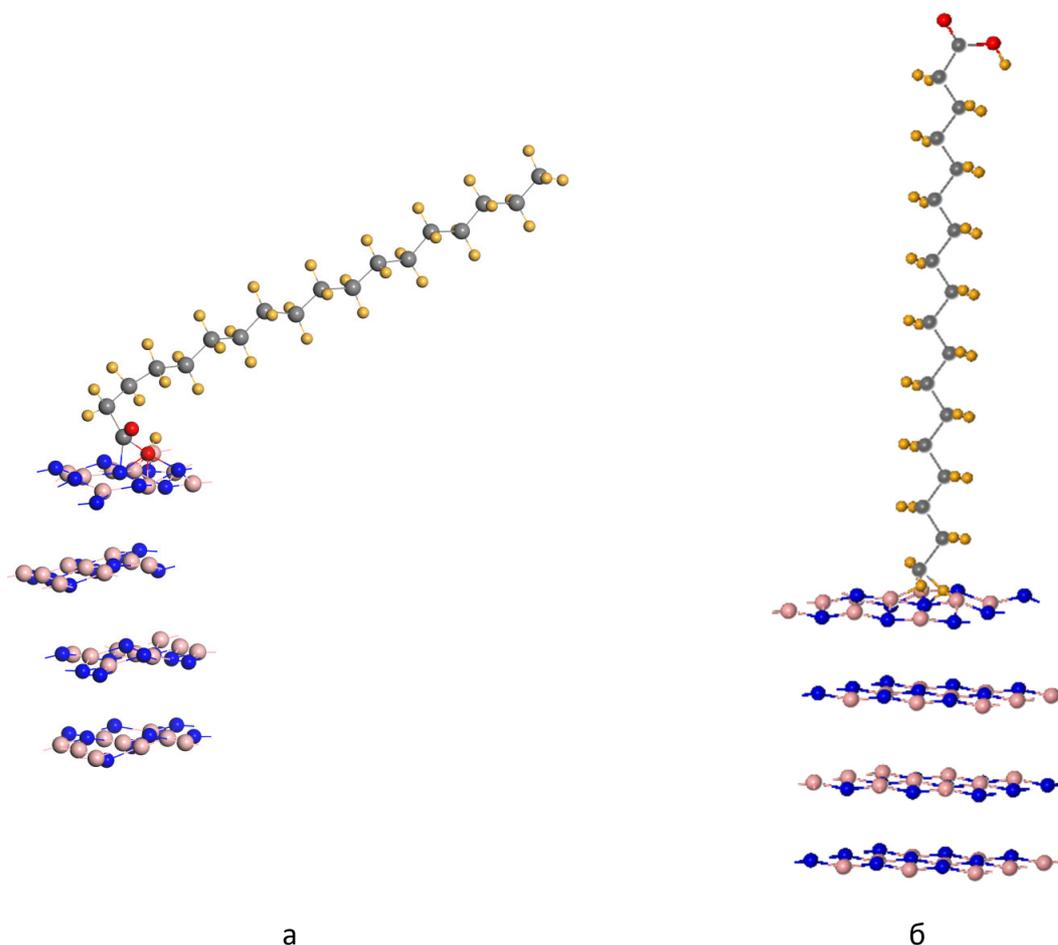
При добавлении к такой среде наночастиц нитрида бора происходит образование лиофильной системы, для которой характерно сильное межмолекулярное взаимодействие стеариновой кислоты и нитрида бора. На рисунке 2 показаны возможные конфигурации стабилизации молекулы BN: полярной группой молекулы  $C_{18}H_{36}O_2$  (а) и ее углеводородным радикалом (б). Расчеты показывают, что гамма-функция в первом случае составляет 9,9 МДж/моль, что ниже, чем во втором (10,4 МДж/моль), т. е. такая система оказывается термодинамически более устойчивой. Образование такого соединения приводит к деформации как самой молекулы стеариновой кислоты, так и кристаллических слоев нитрида бора. Верхние

слои нитрида бора из-за большего взаимодействия с молекулой  $C_{18}H_{36}O_2$  искажаются сильнее, среднее расстояние между ними составляет 3,585 Å, что на 0,088 Å (2,5%) больше, чем в исходной кристаллической решетке. Бор-азотные гексагоны второго слоя смещаются относительно первого слоя. Последующие слои остаются неизменными.

ИК-спектр коллоидной системы (рис. 3) практически совпадает со спектром хлороформа и имеет линии низкой интенсивности, соответствующие ГНБ и стеариновой кислоте. Это соответствует преобладающей концентрации хлороформа, т. к. он является дисперсионной средой. Однако при испарении с течением

времени спектр изменяется, и относительная интенсивность линий хлороформа снижается ввиду его испарения. Через 30 минут хлороформ полностью испаря-

ется из жидкостной ячейки приставки НПВО и получаемый ИК-спектр является аддитивным результатом спектров ГНБ и стеариновой кислоты.



**Рис. 2.** Моделирование процесса стабилизации нитрида бора молекулой стеариновой кислоты: а – полярной группой; б – неполярным углеводородным радикалом

**Fig. 2.** Modeling of the process of stabilization of boron nitride by a stearic acid molecule: а – polar group; б – nonpolar hydrocarbon radical

Применение модуля DMol<sup>3</sup> программного комплекса Materials Studio 2020 позволило рассчитать линии ИК-спектра данной системы. Линия 716 см<sup>-1</sup> соответствует вертикальным колебаниям внутренних атомных слоев ГНБ. Последующие линии относятся к смещениям атомов в молекуле стеариновой кислоты. Широкий спектральный пик 1382 см<sup>-1</sup> является объединением линий, относящихся к изгибным колебаниям связей С-Н в молекуле стеариновой кислоты и плоскостным смещениям растяжения связей В-Н.

Таким образом, данный спектр показывает наличие прочной связи наночастиц ГНБ с их стабилизирующей оболочкой из стеариновой кислоты.

Изотермическая зависимость поверхностного давления ( $\pi$ ) от удельной молекулярной площади ( $A$ ), представленная на рисунке 4 для стеариновой кислоты, имеет классический вид изотермы амфифильного вещества, на которой хорошо просматриваются структурные перестройки фазовых состояний. В начальный момент сжатия монослой Ленгмюра находится в

газообразном состоянии, при этом площадь, приходящаяся на одну частицу, составляет  $A \sim 40\text{--}30 \text{ \AA}^2$ , частицы располагаются далеко друг от друга и не взаимодействуют между собой, удовлетворяя уравнению  $\pi \cdot A = k \cdot T$ . При дальнейшем сближении барьеров расстояние между ними уменьшается, и монослой переходит в

жидкую ( $A \sim 27\text{--}20 \text{ \AA}$ ), а затем в твердую ( $A \sim 2\text{--}16 \text{ \AA}$ ) фазу. Дальнейшее сжатие монослоя в твердом состоянии приводит к его коллапсу, молекулы стеариновой кислоты покидают границу раздела, монослой Ленгмюра превращается в подсубфазную и/или надмонослойную трехмерную систему.

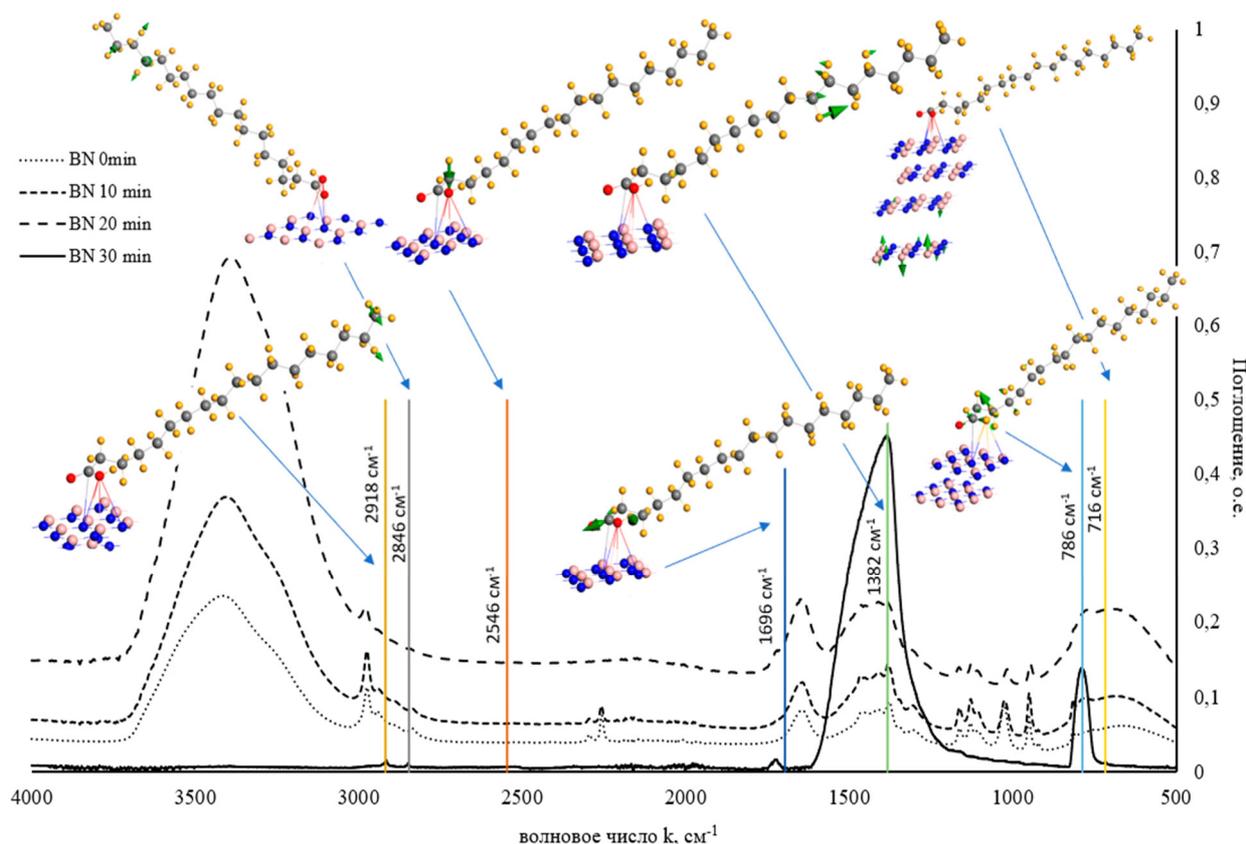


Рис. 3. ИК-спектр при испарении хлороформа

Fig. 3. IR spectrum during chloroform evaporation

У изотермы КС BN/ $\text{CHCl}_3$  отсутствует фазовый переход «газообразное состояние – жидкость», который отчетливо наблюдается в виде плато у стеариновой кислоты, указывая на термодинамический переход первого рода.

Совмещенные изотермы сжатия с изображениями поверхности пленки в микроскопе Брюстера показывают, что в области малых давлений поверхность водной подложки заполнена стабилизированными частицами ГНБ незначительно. При

давлении 3 мН/м наблюдаются домены, разделенные большими водными промежутками. Дальнейшее сжатие приводит к слиянию этих структурных образований, а при 15 мН/м на Брюстеровском изображении начинается отчетливое формирование пленки. Адсорбция стабилизированного нитрида бора достигает максимального значения на водной поверхности, формируя сплошной монослой при давлении 30 мН/м.

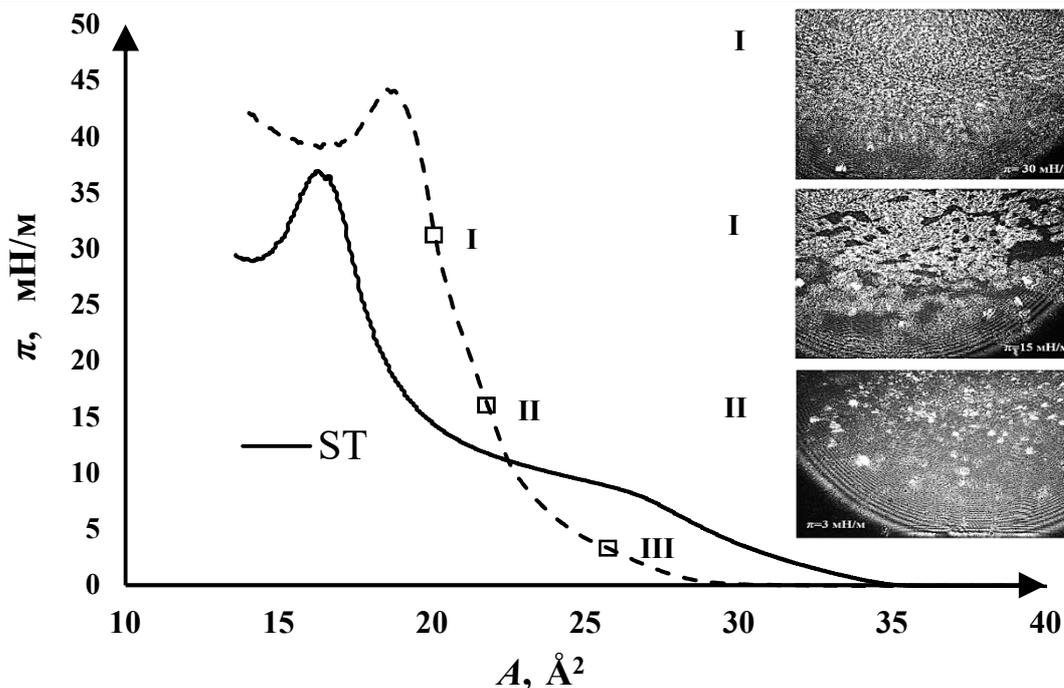


Рис. 4.  $\pi$ - $A$  изотермы стеариновой кислоты и стабилизированного стеариновой кислотой нитрида бора, совмещенные с брьюстерской микроскопией

Fig. 4.  $\pi$ - $A$  isotherms of stearic acid and stearic acid-stabilized boron nitride combined with Brewster microscopy

Изотермы сжатия-растяжения имеют гистерезис (рис. 5), что вызвано десорбцией стабилизированных наночастиц ГНБ в объём субфазы на прямом ходе и сопро-

вождаемым уменьшением площади, приходящейся на одну частицу, оставшихся частиц на границе раздела на обратном ходе барьеров.

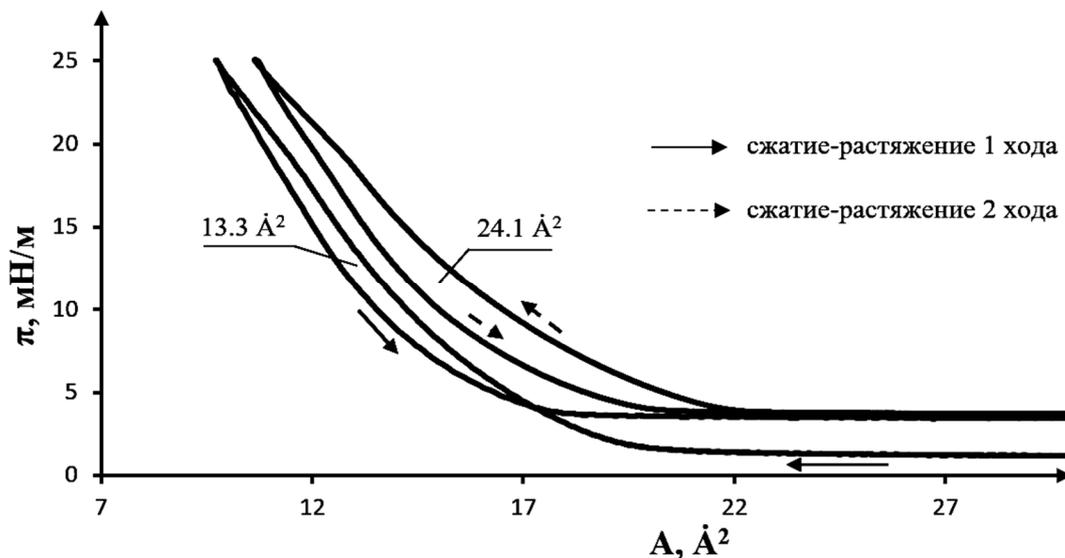


Рис. 5.  $\pi$ - $A$  изотермы сжатия-растяжения стабилизированного стеариновой кислотой нитрида бора

Fig. 5.  $\pi$ - $A$  compression-stretching isotherms of boron nitride stabilized with stearic acid

Монослой на водной поверхности сохраняет свою конфигурацию в первом цикле сжатия-растяжения, на это указывает незначительный гистерезис с площадью  $13,3 \text{ \AA}^2$ . На втором ходе при сжатии проявляются межмолекулярные взаимодействия между доменами, что приводит к их агрегации, однако эти связи непрочные и надмолекулярные структуры распадаются при растяжении пленки. Площадь гистерезиса второго цикла  $24,1 \text{ \AA}^2$ .

## Выводы

Методом химической конденсации синтезирован коллоидный раствор стабилизированного стеариновой кислотой гексагонального нитрида бора, с кристаллической структурой, принадлежащей пространственной группе  $R\bar{6}_3/m$  с параметрами элементарной ячейки  $a = b = 2,62 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,99 \text{ \AA}$ , в котором, как показано с использованием модуля Blends Calculation Materials Studio, не происходят химические реакции и не возникают нарушения молекулярной структуры стеариновой кислоты в дисперсионной среде.

Структурное моделирование процессов синтеза показало, что молекула стеариновой кислоты своей полярной группой присоединяется к нитриду бора. При этом

происходит деформация как самой молекулы стеариновой кислоты, так и верхних слоев наночастиц гексагонального нитрида бора. Расстояние между первым и вторым слоем увеличивается на 2,5% от исходного межплоскостного расстояния в кристаллической решетки.

ИК-спектры подтвердили испарение хлороформа из капли, что согласуется с данными моделирования об отсутствии химических реакций между хлороформом и стеариновой кислотой. Анализ полученных спектров указывал на успешное пасивирование нитрида бора, о чем свидетельствовал аддитивный характер спектра и возникновение незначительного смещения линии, соответствующей колебаниям атомов кислорода в молекуле стеариновой кислоты из-за установившейся связи с поверхностью наночастиц ГНБ.

Совмещение изотерм  $\pi$ - $A$  с изображениями поверхности пленки в брюстеровском микроскопе позволило определить давление, при котором формировался сплошной монослой на водной поверхности – 30 мН/м. Исследование плавающих слоев при сжатии и растяжении показали стабильность монослоя в первом цикла и агрегирование частиц на втором цикле.

## Список литературы

1. Caldwell photonics with hexagonal boron nitride / J. D. Caldwell, I. Aharonovich, G. Cassaboies [et al.] // *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4, no. 8. P. 552–67. <https://doi.org/10.3390/ma16052005>.
2. Naclerio A. E., Kidambi P. R. A review of scalable hexagonal boron nitride (h-BN) synthesis for present and future applications // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, no. 6. P. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>.
3. Hexagonal boron nitride for next-generation photonics and electronics / Seokho Moon, Jiye Kim, Jeonghyeon Park [et al.] // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, no. 4. P. 2204161. <https://doi.org/10.1002/adma.202204161>.
4. Thermally conductive composites based on hexagonal boron nitride nanosheets for thermal management: fundamentals to applications / Wentong Wu, Mingsheng Zheng, Kejian Lu [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023. Vol. 169. P. 107533. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107533>.
5. Ogawa S., Fukushima S., Shimatani M. Hexagonal boron nitride for photonic device applications: A review // *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 2005. <https://doi.org/10.3390/ma16052005>.

6. Avasarala S., Bose S. 2D nanochannels and huge specific surface area offer unique ways for water remediation and adsorption: assessing the strengths of hexagonal boron nitride in separation technology // *Functional Composite Materials*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 5. <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00042-2>.
7. Hexagonal boron nitride-based composites: an overview of processing approaches and mechanical properties / Muhammad Ramzan Abdul Karim, Muhammad Awais Khan, Atteeq Uz Zaman, Azhar Hussain // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2023. Vol. 60, no. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00251-8>.
8. Atomically thin hexagonal boron nitride and its heterostructures / Jia Zhang, Biying Tan, Xin Zhang [et al.] // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33, no. 6. P. 2000769. <https://doi.org/10.1002/adma.202000769>.
9. Lin Y., Connell J. W. Advances in 2D boron nitride nanostructures: nanosheets, nanoribbons, nanomeshes, and hybrids with graphene // *Nanoscale*. 2012. Vol. 4, no. 22. P. 690–6939. <https://doi.org/10.1039/C2NR32201C>.
10. Вдовин Е. Е., Новоселов К. С., Ханин Ю. Н. Резонансно-туннельная спектроскопия ван-дер-ваальсовых гетеросистем // *Успехи химии*. 2019. Vol. 88, no. 11. P. 1081–1093. <https://doi.org/10.1070/RCR4907>.
11. Structure, properties and applications of two-dimensional hexagonal boron nitride / Soumyabrata Roy, Xiang Zhang, Anand B Puthirath [et al.] // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33, no. 44. P. 2101589. <https://doi.org/10.1002/adma.202101589>.
12. Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): synthesis, properties and applications / Kailiang Zhang, Yulin Feng, F. Wang [et al.] // *Journal of Materials Chemistry C*. 2017. Vol. 5, no. 46. P. 11992–12022. <https://doi.org/10.1039/C7TC04300G>.
13. Generation of spin defects in hexagonal boron nitride / M. Kianinia, S. White, J. E. Fröch [et al.] // *ACS photonics*. 2020. Vol. 7, no. 8. P. 2147–2152. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.0c00614>.
14. Lopes J. M. J. Synthesis of hexagonal boron nitride: From bulk crystals to atomically thin films // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2021. Vol. 67, no. 2. P. 100522. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100522>
15. Epitaxial single-crystal hexagonal boron nitride multilayers on Ni (111) / Kyung Yeol Ma, Leining Zhang, Sunghwan Jin [et al.] // *Nature*. 2022. Vol. 606, no. 7912. P. 88–93. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04745-7>.
16. Epitaxial growth of a 100-square-centimetre single-crystal hexagonal boron nitride monolayer on copper / Li Wang, Xiaozhi Xu, Leining Zhang [et al.] // *Nature*. 2019. Vol. 570, no. 7759. P. 91–95. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1226-z>.
17. Naclerio A. E., Kidambi P. R. A review of scalable hexagonal boron nitride (h-BN) synthesis for present and future applications // *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35, no. 6. P. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>.
18. Graphene analogues of BN: novel synthesis and properties / Angshuman Nag, Kalyan Raidongia, Kailash P. S. S. Hembram [et al.] // *ACS nano*. 2010. Vol. 4, no. 3. P. 1539–1544. <https://doi.org/10.1021/nn9018762>
19. Peng Q., Ji W., De S. Mechanical properties of the hexagonal boron nitride monolayer: Ab initio study // *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 56. P. 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.com-matsci.2011.12.029>
20. Progress on boron nitride nanostructure materials: properties, synthesis and applications in hydrogen storage and analytical chemistry / Patel Mayurkumar Revabhai, Rakesh Kumar Singhal, Hirakendu Basu [et al.] // *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 1–41. <https://doi.org/10.1007/s40097-022-00490-5>.
21. Лэй И. С., Янь Ю. П. Упрочнение поверхности алюминия нанолитами из нитрида бора // *Прикладная механика и техническая физика*. 2023, Т. 64, № 2. P. 174–181. <https://doi.org/10.15372/PMTF202215117>.
22. Перевислов С. Н. Структура, свойства и области применения графитоподобного гексагонального нитрида бора // *Новые огнеупоры*. 2019. № 6. P. 35–40. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-6-35-40>.

23. Петров Ю. В., Гогина О. А., Вывенко О. Ф. Ионно-лучевая модификация локальных люминесцентных свойств гексагонального нитрида бора // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 8. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52778.66-22>.

24. 2D boron nitride nanosheets for polymer composite materials / Md Golam Rasul, Alper Kiziltas, Babak Arfaei [et al.] // npj 2D Materials and Applications. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 56. <https://doi.org/10.1038/s41699-021-00231-2>.

## References

1. Caldwell J. D., Aharonovich I., Cassabois G., eds. Caldwell Photonics with hexagonal boron nitride. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, no. 8. P. 552–567. <https://doi.org/10.3390/ma16052005>

2. Naclerio A. E., Kidambi P. R. A Review of scalable hexagonal boron nitride (h-BN) synthesis for present and future applications. *Advanced Materials*, 2023, vol. 35, no. 6, pp. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>

3. Seokho Moon, Jiye Kim, Jeonghyeon Park, eds. Hexagonal boron nitride for next-generation photonics and electronics. *Advanced Materials*, 2023, vol. 35, no. 4, pp. 2204161. <https://doi.org/10.1002/adma.202204161>

4. Wentong Wu, Mingsheng Zheng, Kejian Lu, eds. Thermally conductive composites based on hexagonal boron nitride nanosheets for thermal management: fundamentals to applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, vol. 169, pp. 107533. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107533>

5. Ogawa S., Fukushima S., Shimatani M. Hexagonal boron nitride for photonic device applications: A review. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 2005. <https://doi.org/10.3390/ma16052005>

6. Avasarala S., Bose S. 2D nanochannels and huge specific surface area offer unique ways for water remediation and adsorption: assessing the strengths of hexagonal boron nitride in separation technology. *Functional Composite Materials*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 5. <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00042-2>

7. Muhammad Ramzan Abdul Karim, Muhammad Awais Khan, Atteeq Uz Zaman, Azhar Hussain. Hexagonal boron nitride-based composites: an overview of processing approaches and mechanical properties. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2023, vol. 60, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00251-8>

8. Jia Zhang, Biying Tan, Xin Zhang, eds. Atomically thin hexagonal boron nitride and its heterostructures. *Advanced Materials*, 2021, vol. 33, no. 6, pp. 2000769. <https://doi.org/10.1002/adma.202000769>

9. Lin Y., Connell J. W. Advances in 2D boron nitride nanostructures: nanosheets, nanoribbons, nanomeshes, and hybrids with graphene. *Nanoscale*, 2012, vol. 4, no. 22, pp. 6908–6939. <https://doi.org/10.1039/C2NR32201C>

10. Vdovin E. E., Novoselov K. S., Khanin Yu. N. Resonance tunneling spectroscopy of van der Waals heterosystems. *Advances in chemistry*, 2019, vol. 88, no. 11, pp. 1081–1093. <https://doi.org/10.1070/RCR4907>

11. Soumyabrata Roy, Xiang Zhang, Anand B Puthirath, eds. Structure, properties and applications of two-dimensional hexagonal boron nitride. *Advanced Materials*, 2021, vol. 33, no. 44, pp. 2101589. <https://doi.org/10.1002/adma.202101589>

12. Kailiang Zhang, Yulin Feng, F. Wang, eds. Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, vol. 5, no. 46, pp. 11992–12022. <https://doi.org/10.1039/C7TC04300G>

13. Kianinia M., White S., Fröch J. E., eds. Generation of spin defects in hexagonal boron nitride. *ACS photonics*, 2020, vol. 7, no. 8, pp. 2147–2152. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.0c00614>

14. Lopes J. M. J. Synthesis of hexagonal boron nitride: From bulk crystals to atomically thin films. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2021, vol. 67, no. 2, pp. 100522. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100522>

15. Kyung Yeol Ma, Leining Zhang, Sunghwan Jin, eds. Epitaxial single-crystal hexagonal boron nitride multilayers on Ni (111). *Nature*, 2022, vol. 606, no. 7912, pp. 88–93. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04745-7>

16. Li Wang, Xiaozhi Xu, Leining Zhang, eds. Epitaxial growth of a 100-square-centimetre single-crystal hexagonal boron nitride monolayer on copper. *Nature*, 2019, vol. 570, no. 7759, pp. 91–95. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1226-z>
17. Naclerio A. E., Kidambi P. R. A review of scalable hexagonal boron nitride (h-BN) synthesis for present and future applications. *Advanced Materials*, 2023, vol. 35, no. 6, pp. 2207374. <https://doi.org/10.1002/adma.202207374>
18. Angshuman Nag, Kalyan Raidongia, Kailash P. S. S. Hembram, eds. Graphene analogues of BN: novel synthesis and properties. *ACS nano*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 1539–1544. <https://doi.org/10.1021/nn9018762>
19. Peng Q., Ji W., De S. Mechanical properties of the hexagonal boron nitride monolayer: Ab initio study. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 56, pp. 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.comatsci.2011.12.029>
20. Patel Mayurkumar Revabhai, Rakesh Kumar Singhal, Hirakendu Basu, eds. Progress on boron nitride nanostructure materials: properties, synthesis and applications in hydrogen storage and analytical chemistry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1–41. <https://doi.org/10.1007/s40097-022-00490-5>
21. Lei I. S., Yan Yu. P. Uprochnenie poverkhnosti alyuminiya nanolistami iz nitrida bora [Hardening of the aluminum surface with boron nitride nanolists]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Applied mechanics and technical physics*, 2023, vol. 64, no. 2, pp. 174–181. <https://doi.org/10.15372/PMTF202215117>
22. Perevislov S. N. Struktura, svoistva i oblasti primeneniya grafitopodobnogo geksagonal'nogo nitrida bora [Structure, properties and applications of graphite-like hexagonal boron nitride]. *Novye ognepory = New refractories*, 2019, vol. 6, pp. 35–40. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-6-35-40>
23. Petrov Yu. V., Gogina O. A., Vyvenko O. F. Ionno-luchevaya modifikatsiya lokal'nykh lyuminestsentnykh svoistv geksagonal'nogo nitrida bora [Ion-beam modification of local luminescent properties of hexagonal boron nitride]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 2022, vol. 92, no. 8. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52778.66-22>
24. Md Golam Rasul, Alper Kiziltas, Babak Arfaei, eds. 2D boron nitride nanosheets for polymer composite materials. *npj 2D Materials and Applications*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 56. <https://doi.org/10.1038/s41699-021-00231-2>

---

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Локтионова Инна Владимировна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [ms.chuhaeva@mail.ru](mailto:ms.chuhaeva@mail.ru), ORCID: 0009-0005-7272-2939

**Inna V. Loktionova**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [ms.chuhaeva@mail.ru](mailto:ms.chuhaeva@mail.ru), ORCID: 0009-0005-7272-2939

**Кузьменко Александр Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: [apk3527@mail.ru](mailto:apk3527@mail.ru), ORCID: 0000-0001-7089-0692

**Alexander P. Kuzmenko**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: [apk3527@mail.ru](mailto:apk3527@mail.ru), ORCID: 0000-0001-7089-0692

**Жакин Анатолий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: zhakin@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-5635-8149

**Anatoly I. Zhakin**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: zhakin@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-5635-8149

**Емельянов Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: vmemelianov@yandex.ru

**Victor M. Emelaynov**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: vmemelianov@yandex.ru

**Абакумов Павел Владимирович**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

**Pavel V. Abakumov**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Teacher of the Physics, Informatics and mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

**Неручев Юрий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: yuan2003@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-8087-874X

**Yury A. Neruchev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics, Kursk State University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: yuan2003@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-8087-874X

**Филиппов Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики института естественных, математических и технических наук, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация,  
e-mail: wwfilippow@mail.ru,  
ORCID: 0000-0003-4323-351X

**Vladimir V. Filippov**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Institute of Natural, Mathematical and Technical Sciences, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: wwfilippow@mail.ru,  
ORCID: 0000-0003-4323-351X