



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС  
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО  
ENGINEERING AND ENGINEERING

МАТЕРИАЛТАНУ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
MATERIALS SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212\_2025\_1\_101  
MPHTI 29.19.16

**В.М. Юров<sup>1</sup>, К.Н. Жангозин<sup>1</sup>, Т.К. Жанабергенов<sup>1</sup>, Д.Б. Каргин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ТОО «ТСК-Восток», Астана, г. Караганда, Казахстан

E-mail: [exciton@list.ru](mailto:exciton@list.ru)\*

E-mail: [4kzh@mail.ru](mailto:4kzh@mail.ru)

E-mail: [4tkz@bk.ru](mailto:4tkz@bk.ru)

<sup>2</sup>НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан

E-mail: [kargin\\_db@enu.kz](mailto:kargin_db@enu.kz)

## К ВОПРОСУ О КОРОБЛЕНИИ ГРАФЕНОВЫХ ЛИСТОВ ГРАФЕН ПАРАҚТАРЫНЫҢ ОРАЛУ МӘСЕЛЕСІ ТУРАЛЫ TO THE QUESTION OF WARPING OF GRAPHENE SHEETS

**Аннотация.** В статье анализируется вопрос о короблении листов графена в подвешенном состоянии. Были предложены различные механизмы образования гофр, морщин и складок на листах графена. Предложена новая модель коробления графена. Суть ее заключается в том, что графен получается в большинстве случаев из графита, где присутствуют значительные внутренние напряжения, а в нанослое графита меняются все физические (тепловые и т.д.) и химические (адсорбция и т. д.) параметры графена.

**Ключевые слова:** графит; графен; нанослой; мезослой; коробление.

**Аңдатпа.** Мақалада тоқтатылған күйдегі графен парақтарының деформациялану мәселесі талданады. Графен парақтарында гофр, әжімдер және қатпарлардың пайда болуының әртүрлі механизмдері ұсынылды. Графеннің тоқырауының жаңа моделі ұсынылды. Оның мәні мынада: графен көп жағдайда айтарлықтай ішкі кернеулер болатын графиттен алынады, ал графит наноқабатында графеннің барлық физикалық (термиялық және т.б.) және химиялық (адсорбциялық және т.б.) параметрлері болады. өзгерту.

**Түйін сөздер:** графит; графен; наноқабат; мезоқабат; деформация.

**Abstract.** The article analyzes the issue of warping of graphene sheets in a suspended state. Various mechanisms for the formation of corrugations, wrinkles and folds on graphene sheets have been proposed. A new model of graphene warping has been proposed. Its essence lies in the fact that graphene is obtained, in most cases, from graphite, where significant internal stresses are present, and in the graphite nanolayer all physical (thermal, etc.) and chemical (adsorption, etc.) parameters of graphene change.

**Keywords:** graphite; graphene; nanolayer; mesolayer; warping.

**Введение.** Графен, открытый 20 лет назад (Novoselov K.S. et al., 2004; Новоселов К.С., 2011), представляет собой удивительный материал, применяемый в различных областях человеческой деятельности (рис. 1) (Баимова Ю.А. и др., 2018; Zhang T., 2022; Gupta R.K., 2023). На сегодня мировой рынок графена только формируется (рис. 2, а) и представлен компаниями в различных странах (рис. 2, б), где лидерство занимают Китай и США. Методы получения графена довольно разнообразны. Обзор их проведен в

работах (Новоселов К.С., 2011; Баимова Ю.А. и др., 2018; Zhang T., 2022; Gupta R.K., 2023). В работах (Жангозин К.Н. и др., 2021; Юров В.М., Жангозин К.Н. и др., 2024) предложена оригинальная инновационная методика для получения графена микрокластерной водой в сочетании с ультразвуком и электрическим полем. **Однако получить графен большого размера не удастся из-за коробления листов графена.**

**Целью** настоящей статьи является рассмотрение предыдущих работ по короблению графена и предложение своего механизма развития этого процесса.

**Обзор предыдущих работ.** В работе (Meyer J.C. et al., 2007) исследованы отдельные листы графена, свободно подвешенные на микрокаркасе в вакууме или воздухе. Результаты демонстрируют коробление, поверхностную шероховатость, а деформации вне плоскости достигают 1 нм.

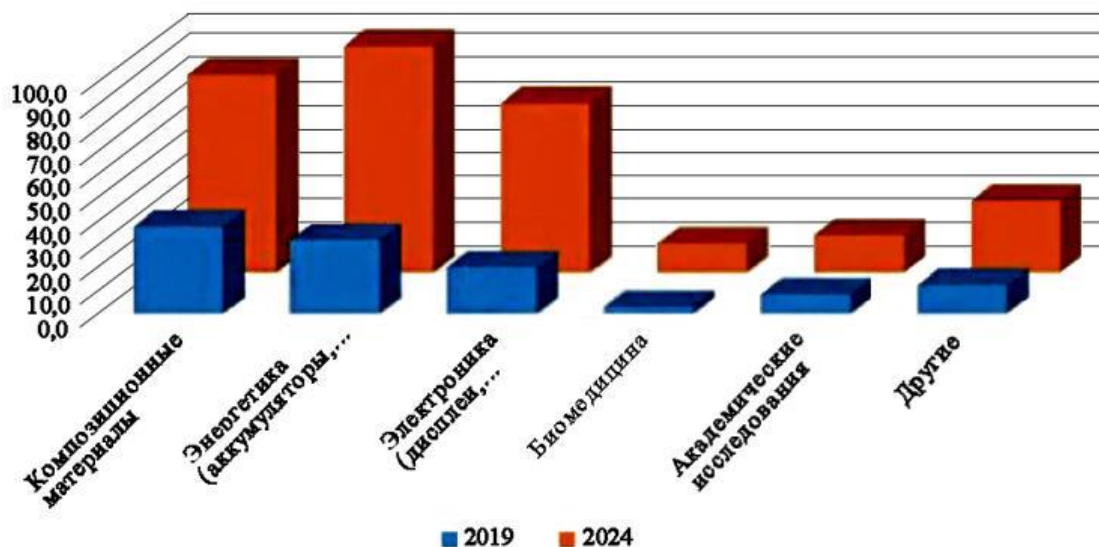


Рисунок 1. Потребление графена в зависимости от сферы применения в 2019 и 2024 годах (\$ млн)

Примечание – на основе (Гаршев А.В., 2019)

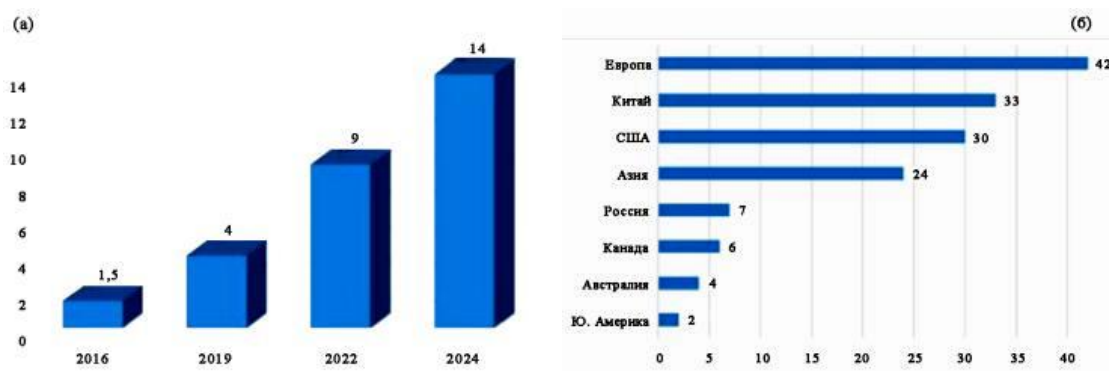
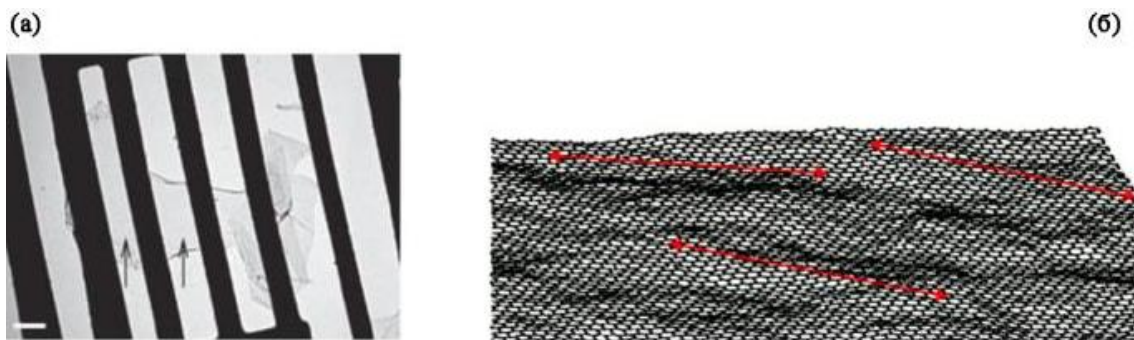


Рисунок 2. Мировое производство графена в 2016-2024 годах, тысяч тонн (а); страны, где производят графен, компании, штук (б)

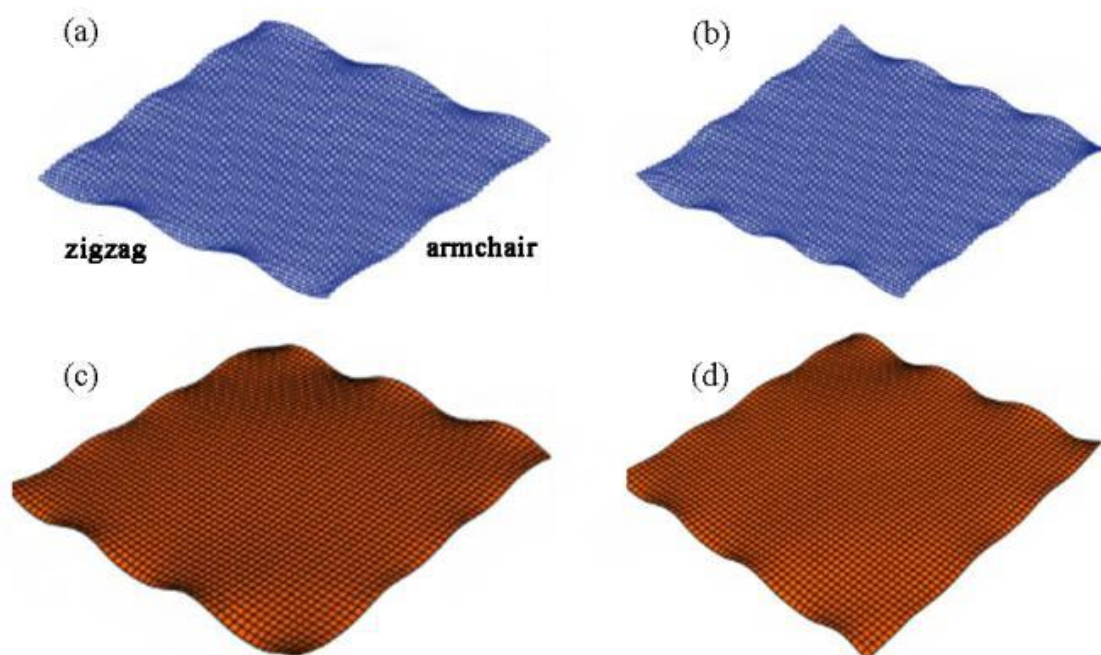
Примечание – на основе (Гаршев А.В., 2019)

На рисунке 3, *a* показано светлопольное изображение ПЭМ подвешенной графеновой мембраны. Ее центральная часть (однородная и невыразительная область, обозначенная стрелками) представляет собой монослойный графен. Электронно-дифракционные изображения с разных участков чешуйки показывают, что это монокристалл без доменов. В работе отмечаются прокрученные верхние и нижние края графена. Отмечается коробление (возникновение эластичных гофр) листов графена, которое связывается с высокой подвижностью носителей заряда в графене. Теоретический расчет этого коробления листов графена с помощью метода Монте-Карло показал (Fasolino A. et al., 2007), что рябь (гофры) (рис. 3, *b*) появляется из-за тепловых флуктуаций с распределением по размерам около 80 Å, что совместимо с выводами (50-100 Å) работы (Meyer J.C. et al., 2007).



**Рисунок 3.** Подвешенная графеновая мембрана (а) (Meyer J.C. et al., 2007); конфигурация образца N = 8640 при T = 300 К. Красные стрелки имеют длину ~ 80 Å (б)  
*Примечание – на основе (Fasolino A. et al., 2007)*

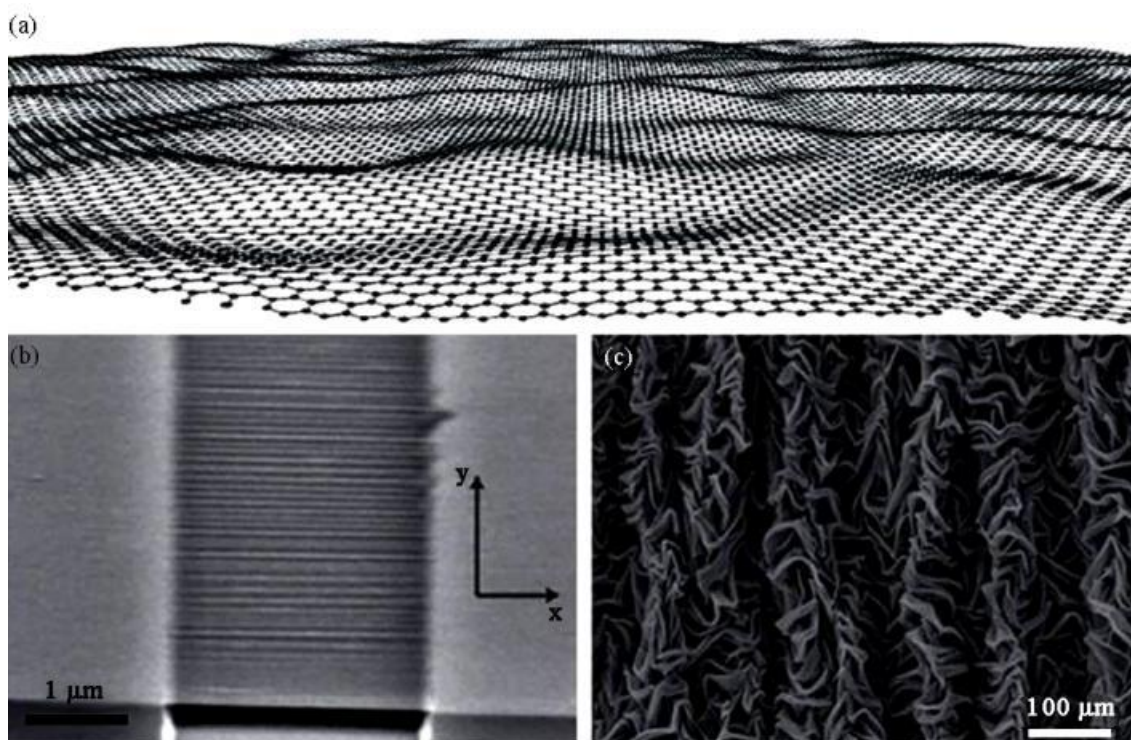
**Однако выводы работы** (Fasolino A. et al., 2007) были подвергнуты критике в работе (Shenoy V.B. et al., 2008), где теоретически было показано, что краевые напряжения вносят внутреннюю рябь (коробление) в отдельно стоящие графеновые листы (Meyer J.C. et al., 2007) даже при отсутствии каких-либо тепловых эффектов (рис. 4).



**Рисунок 4.** Формы деформированных листов графена

*Примечание – на основе* (Shenoy V.V. et al., 2008)

**В обзоре** (Deng S., Berry V., 2016) описываются различные механизмы образования морщин, ряби и складок (рис. 5), а также взаимодействие между атрибутами морщин и ряби (длина волны/ширина, амплитуда/высота, длина/размер и радиус изгиба) и электронными свойствами графена и другими механическими, оптическими, поверхностными и химическими свойствами.



**Рисунок 5.** Гофрированный (а); сморщенный (b) и смятый (с) графен

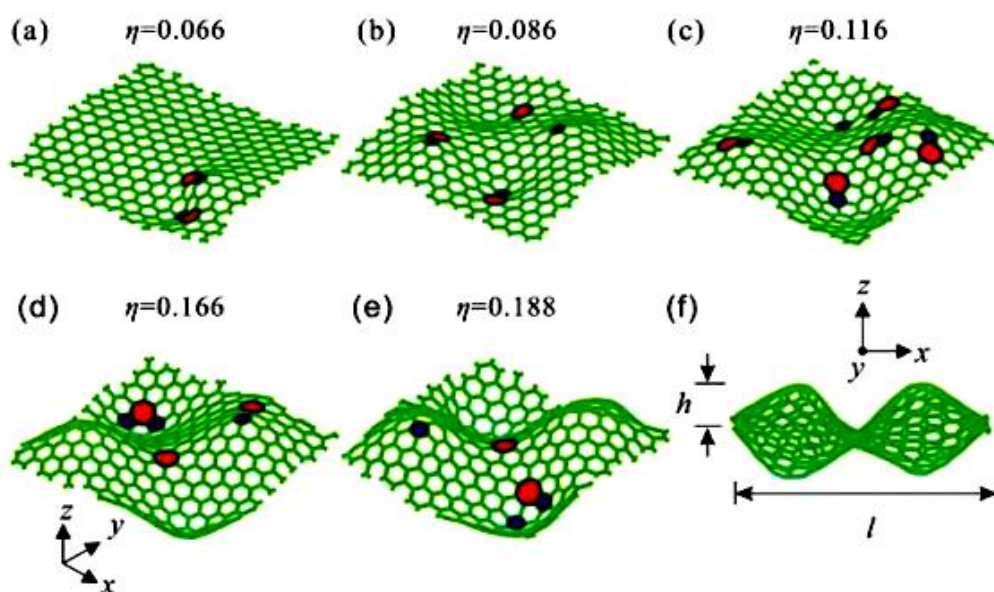
*Примечание – на основе (Deng S., Berry V., 2016)*

В обзоре (Deng S., Berry V., 2016) описаны различные механизмы образования морщин, ряби и складок в графене, такие как (a) – тепловые колебания двумерной решетки, (b) – краевая нестабильность, дефекты и дислокации, (c) – отрицательное тепловое расширение (в отличие от положительного теплового расширения для подложки); (d) – испарение/удаление захваченного растворителя, (e) – релаксация предварительно напряженной подложки, (f) – закрепление на подложке, (g) – поверхностный потенциал подложки и (h) – поверхностное натяжение растворителя.

Деформация графена регулируется его механическими свойствами (модулем Юнга, межфазной энергией и числом слоев), а возникающие гофры изменяют его электронную структуру (раскрытие запрещенной зоны (потенциально  $> 1$  эВ), псевдомагнитное поле в бислоях, образование электронно-дырочных луж и транспорт носителей заряда). Они, в свою очередь, могут быть использованы для изменения смачиваемости графена, пропускания, химического потенциала, расширения для хранения энергии и проводимости. В недалеком будущем важно: (a) обеспечить контроль физических свойств этих гофр; (b) тщательно изучить влияние складок на электронные, оптические, механические и химические свойства и (в) изучить эти эффекты на других двумерных наноматериалах.

В работе (Qin H. et al., 2017) проведено моделирование молекулярной динамики (МД) для изучения влияния ряби на коэффициент Пуассона графена. Из-за толщины графена в атомном масштабе внеплоскостные ряби генерируются в свободно стоящем графене с топологическими дефектами (например, семиугольниками и пятиугольниками) для высвобождения энергии деформации в плоскости. С помощью моделирования МД обнаружено, что коэффициент Пуассона рябого графена уменьшается при увеличении его

соотношения сторон  $\eta$  (амплитуда по длине волны). Для рябого листа графена  $\eta = 0,188$  наблюдается отрицательный коэффициент Пуассона  $= 0,38$  для деформации растяжения до 8%, тогда как коэффициент Пуассона для  $\eta = 0,066$  почти равен нулю. При одноосном растяжении рябь постепенно становится плоской, поэтому коэффициент Пуассона рябого графена определяется конкурирующими факторами собственного положительного коэффициента Пуассона графена и отрицательного коэффициента Пуассона из-за эффекта разглаживания морщин. Кроме того, рябой графен демонстрирует превосходную прочность на разрыв и ударную вязкость. Благодаря сочетанию его акустических и превосходных механических свойств рябой графен может обладать потенциалом для применения в наноразмерных устройствах и наноматериалах. Иллюстрации пяти гофрированных листов графена показаны на рис. 6.



**Рисунок 6.** Иллюстрации пяти гофрированных листов графена с соотношениями сторон  $\eta = (h/l) = 0,066$  (a),  $\eta = 0,086$  (b),  $\eta = 0,116$  (c),  $\eta = 0,166$  (d),  $\eta = 0,188$  (e)

*Примечание – на основе (Qin H. et al., 2017)*

На рис. 6 семиугольные и пятиугольные дефекты отмечены красным и синим цветами. (f) Боковой вид  $\eta = 0,188$ , где  $h$  – амплитуда, а  $l$  – длина волны.

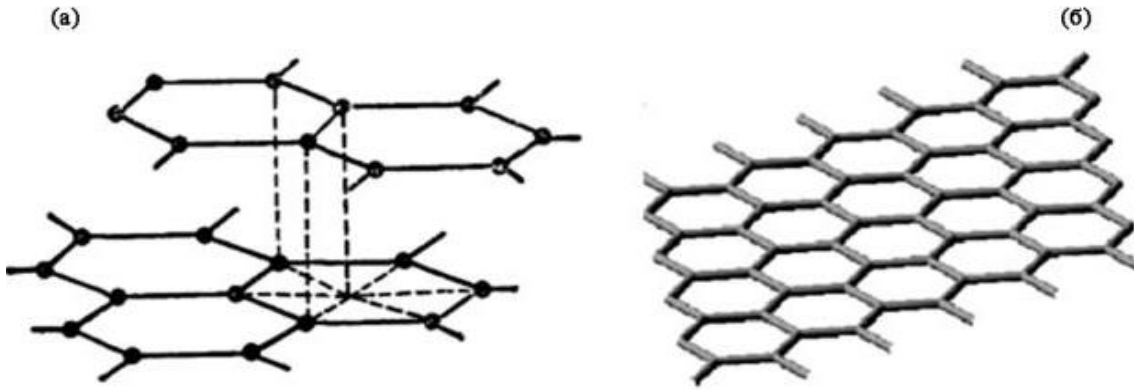
**Отметим последнюю работу** (Ахунова А.Х., Баимова Ю.А., 2023) по графену по подобному вопросу. При помощи метода МД проанализированы особенности деформационного поведения и процесс разрушения графена, содержащего дислокационные диполи с различным плечом. Учтено коробление графена в процессе деформации, что сильно понижает его прочность.

Установлено, что механические свойства графена, содержащего дислокационные диполи, слабо зависят от температуры по сравнению с графеном, который не содержит дефекты либо содержит дефекты Стоуна-Уэльса. Показано, что изменение расстояния между дислокациями в диполе не оказывает заметного влияния на модуль упругости и прочность графена, однако наличие дислокационных диполей может влиять на коробление графена в процессе растяжения.

*Наша модель*

В основе нашей модели лежит работа (Юров В.М., 2019). Начнем с графита, который

является аллотропной модификацией углерода (рис. 7, а). Если отщепить у графита один монослой, то получается графен (рис. 7, б).



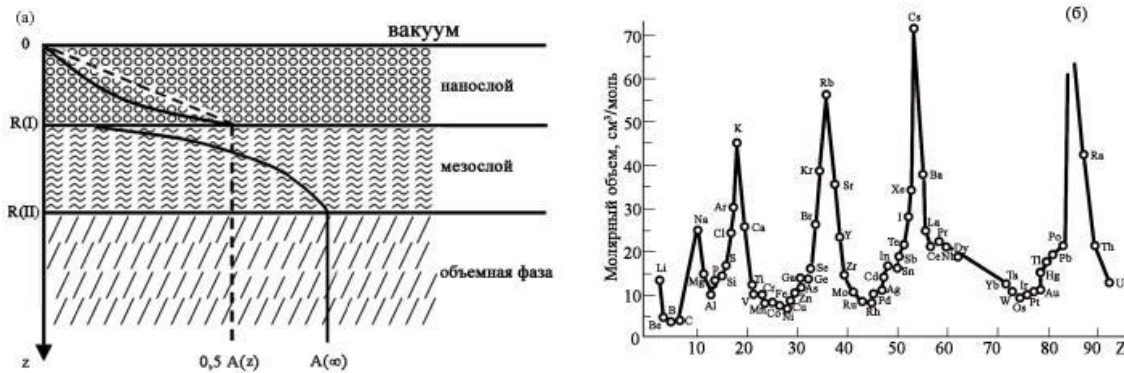
**Рисунок 7.** Кристаллическая структура графита (а) и графена (б)

*Примечание – составлено авторами*

Толщину слоя поверхности R(I) графита определим по эмпирической формуле, приведенной в работах (Юров В.М., 2019; Yurov V., Zhangozin K., 2024):

$$R(I) = \alpha \cdot \frac{v}{S} \quad (1)$$

Модель графита представлена на рис. 8, а. Толщина поверхностного слоя R(I), определяемая формулой (1), показывает, что она зависит от молярного объема кристалла –  $v = M/\rho$ , M – молярная масса (кг/моль),  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>), от площади  $S = 1 \text{ м}^2$  и коэффициента  $\alpha = 0,17 \cdot 10^{-9} \text{ моль}^{-1} = \text{const}$ . Молярный объем элемента изменяется с зарядовым числом Z в табл. Менделеева Д.И. (рис. 8, б).



**Рисунок 8.** Модель графита (а); атомный объем в таблице Менделеева Д.И. (б)

*Примечание – составлено авторами*

Толщина поверхностного слоя графита и графена приведена в табл. 1.

**В табл. 1:**  $T_m$  – температура плавления;  $\gamma$  – величина поверхностной энергии в направлении а и с.

**Таблица 1.** Толщина поверхностного слоя графита и графена

Углерод	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_m$ , К	$R(I)_a$ , нм	$R(I)_c$ , нм	$\gamma_a$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\gamma_c$ , Дж/м <sup>2</sup>
Графит	2260	3970	0,90 (3)	2,46 (3)	2,779	0,591
Графен	2230	4510	0,246 (1)	0,14 (1)	3,157	-

*Примечание – составлено авторами*

Поверхностная энергия кристалла  $\gamma_2$  равна (Рехвиашвили С.Ш. и др., 2007):

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m \text{ [} \text{Å} \times \text{Å}^{-2} \text{]}. \quad (2)$$

В уравнении (2) введено обозначение  $T_m$ , которое означает температуру плавления кристалла в кельвинах. Здесь также нужно учитывать в слое  $R(I)$  размерный эффект, так что вместо  $\gamma_2$  мы получаем  $\gamma_1$  (Юров В.М., Гончаренко В.И. & Олешко В.С., 2023):

$$\gamma_1 = \gamma_2 (1 - R(I) / (R(I) + h)) \approx 0,5 \gamma_2. \quad (3)$$

В уравнении (3) величину  $\gamma_{12}$  считают равной нулю. Чтобы сместить фазу  $\gamma_1$  относительно фазы  $\gamma_2$ , нужно затратить энергию адгезии (Зимон А.Д., 1977):

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \gamma_1 + \gamma_2. \quad (4)$$

Из-за релаксации или реконструкции поверхности кристалла возникают напряжения между фазами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , которые определяются соотношением (Зимон А.Д., 1977):

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot \text{Å} / R(I)}, \quad (5)$$

Здесь  $E$  представляет модуль Юнга. Из формул (1) – (5) определяем энергетические параметры исходных величин и представляем их в табл. 2. Добавим к этому, что деформация графена даже около 10% приводит к его короблению (Катин К.П., 2020).

**Таблица 2.** Энергетические и упругие свойства графена и графита

Углерод	$W_{aa}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$W_{ac}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{isa}$ , МПа	$\sigma_{isc}$ , МПа	$E_a$ , ГПа	$E_c$ , ГПа
Графит	2853	1690	4900	136	7,59	3,48
Графен	3448	-	118400		1000	-

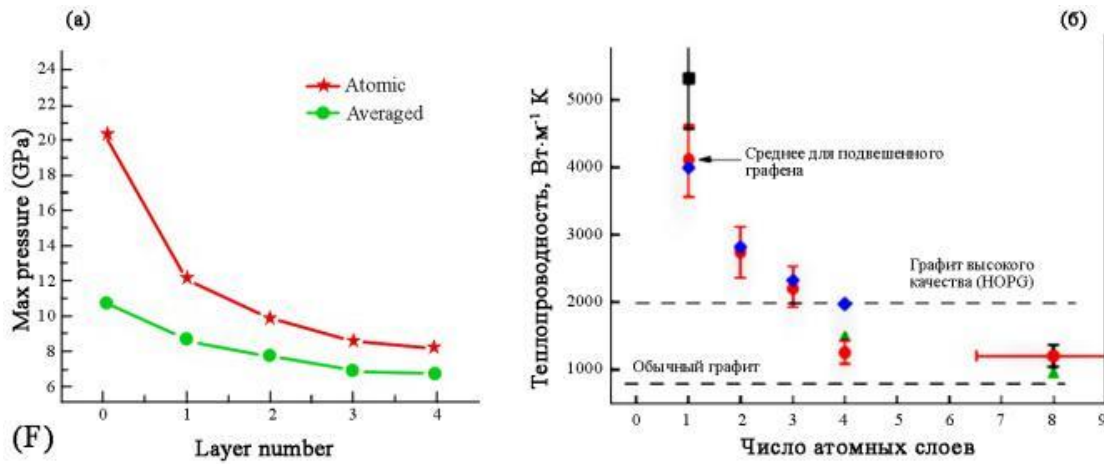
*Примечание – составлено авторами*

Из табл. 2 вытекает, что большие напряжения  $\sigma_{is}$  в графене однозначно приводят к появлению гофр (морщин) на его поверхности. Иными словами, происходит коробление листов графена без прикладывания стороннего напряжения.

Коробление поверхности графена за счет внутренних напряжений приводится в работе (Голоудина С.И. и др., 2019). Там показано АСМ-изображение поверхности графена, из которого видно, что поверхность состоит из доменов размером (20×50) нм, ориентированных в одном направлении и образующих «складки» на поверхности графена высотой 1 нм. Шероховатость на площади (0,5×0,5) мкм составляет  $R_a = 0,25$  нм.

В табл. 1 в скобках дано число монослоев  $n = R(I)/a$  ( $a$  – постоянная кристаллической решетки), для графита  $n = 3$ , для графена  $n = 1$ . Итак, графит обладает тремя монослоями, которые экспериментально подтверждены в работах (Xu Q. et al., 2017; Елецкий А.В. и др., 2011) (рис. 9).





**Рисунок 9. Внутренние напряжения (линия красным цветом) и максимум давления (линия зеленым цветом) от числа графеновых слоев (Xu Q. et al., 2017); изменение тепловых свойств графеновых листов от их числа (б)**

*Примечание – на основе (Елецкий А.В. и др., 2011)*

Из рис. 9 следует, что число графеновых слоев в поверхностном нанослое R(I) графита равно трем, что отвечает модели (1) и табл. 1. Как только число графеновых слоев становится больше трех, система переходит в объемный графит. Это видно на рис. 9, когда зависимости перестают изменяться от числа графеновых слоев.

Первый монослой графита – графен, представляет собой одноатомный лист углерода. Графен обладает превосходными физическими и химическими свойствами, и он становится незаменимым в медицине, биологии, сельском хозяйстве и многих других областях. Его широкое применение сдерживается из-за высокой стоимости расслоения графита на графен. Обзор по графену дан в работе (Zhang T., 2022).

Отличие двухслойного графена от графита и графена заключается в том, что у него может меняться ширина запрещенной зоны от приложенного электрического или магнитного поля (Rozhkov A.V. et al., 2016). Если рассматривать двухслойный графен как систему «однослойный графен + графен Стоуна-Уэльса», то мы получим структуру, которая стабильнее однослойного графена (Подливаев А.И., 2022).

Отличие трехслойного графена от двух- и однослойного графена заключаются в том, что у него отличные величины проводимости и теплопроводности (Craciun M.F. et al., 2009). У трехслойного графена, свернутого под магическим углом, возникает сверхпроводимость с температурой около 3 К (Devakul T. et al., 2023).

Уравнение (1) вместе с рисунком 8а дают систему уравнений (Юров В.М., 2019):

$$\begin{aligned}
 A(r) &= A_0 \left( 1 - \frac{R(I)}{r} \right), \quad R(I) < r < R(II) \\
 A(r) &= A_0 \left( 1 - \frac{R(I)}{R(I) + r} \right), \quad 0 < r < R(I),
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В уравнении (6) величина A(r) представляет собой свойство нанослоя и мезослоя; A<sub>0</sub> – это свойство объемной фазы; r = z (рис. 8, а).

Наблюдаемые в нанослое R(I) размерные эффекты присущи коллективу частиц (атомам, ионам, электронам и т.д.), то есть мы имеем коллективные процессы. Подобные процессы существуют в наноструктурах либо в наночастицах (Уваров Н.Ф., Болдырев В.В.,

2001). Перестройка поверхности графита в слое R(I) сопровождается реконструкцией атомных слоев (Оура К. и др., 2006).

Это один из вариантов коробления графена. Поверхностный слой R(I) представляет собой синергетическую систему, фундаментальные свойства которой подвержены саморегулированию и самоорганизации. При  $h = R(I)$  происходит фазовый переход II рода (по Эренфесту), где происходит скачок теплоемкости (рис. 8, а). Этот эффект рассмотрен нами в работе (Yurov V.M., Guchenko S.A. et al., 2019).

В слое R(II), называемом нами мезоструктурой, наблюдаются размерные эффекты кинетического типа, связанные с длиной свободного пробега квазичастиц, и прочее. Размер слоя  $R(II) \approx 9 R(I)$ , и в нем происходят фликкер-шумы (Машкина Е.С., 2020). В слое R(II) должно быть много размерных эффектов, связанных с температурой (Buffat P., Borel J.P., 1976), магнетизмом (Юров В.М., Лауринас В.Ч. & Гученко С.А., 2019), оптикой (Юров В.М., 2020) и другими свойствами. В нанослое R(I) меняются все его физические параметры, включая и монослой графена. Они приводят к нарушению основных закономерностей, в частности к нарушению закона Видемана-Франца (рис. 10), (Yurov V.M., Goncharenko V.I. & Oleshko V.S., 2024). Если за физическое свойство  $A(h)$  принять число Лоренца  $L(h)$ , входящее в уравнение (6), то мы получим дискретную структуру, показанную на рисунке 10, а, и непрерывную зависимость в мезослое – рис. 10, б.

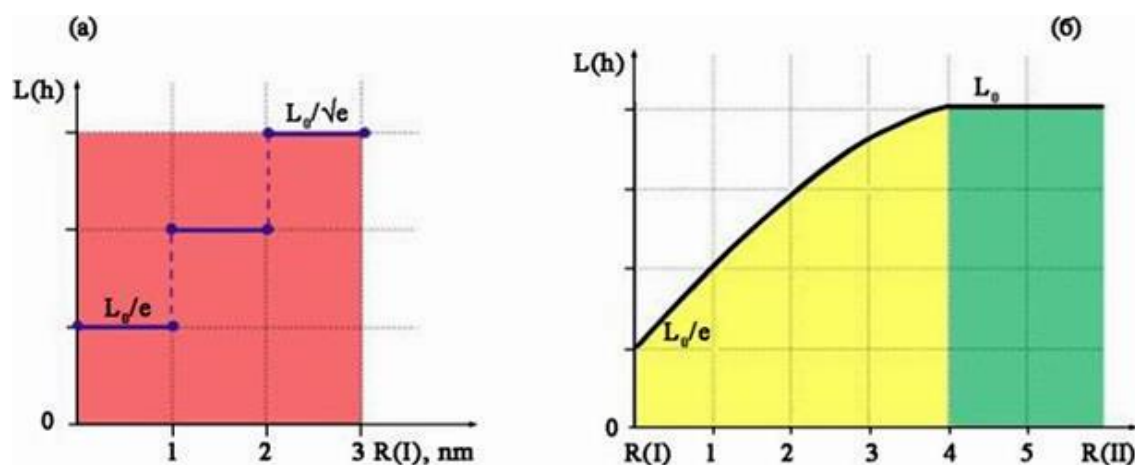


Рисунок 10. Величина числа Лоренца в нано- (а) и мезослое (б)

Примечание – на основе (Yurov V.M., Goncharenko V.I. & Oleshko V.S., 2024)

Рис. 10, а показывает, что число Лоренца в нанослое R(I) уменьшается ступенчатым способом, доказывая его квантовую структуру.

Большие листы графена получены лишь осаждением его на чистые фольги из меди и никеля (Zhang T., 2022). Если учесть, что по формуле (1) для меди  $R(I) = 1,2$  (3) нм; для никеля  $R(I) = 1,1$  (3) нм, и сравнить эти значения с указанными значениями в таблице 1, то отсюда следует вывод, что у них близки значения R(I) и содержат также три нанослоя. Это соответствие открывает путь для создания больших размеров графена, что актуально для инженерии поверхности этого удивительного материала.

**Закключение.** Таким образом, коробление листов графена связано с тем, что он получен в большинстве случаев из графита, где присутствуют значительные внутренние напряжения, а в нанослое графита меняются все физические (тепловые и т.д.) и химические (адсорбция и т.д) параметры графена.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Благодарности.* Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН № АР32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется МОН РК).

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». «При подготовке данной работы авторы не использовали генеративный ИИ.

#### Список литературы

- Buffat P., Borel J.P. (1976) Size effect on the melting temperature of gold particles // *Phys. Rev. A.* – Vol. 13. – P. 2287-2294.
- Craciun M.F., Russo S., Yamamoto M., Oostinga J.B., Morpurgo A.F. and Tarucha S. (2009) Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap // *Nature Nanotechnology*, Vol. 4. – P. 383-388. DOI: [10.1038/nnano.2009.89](https://doi.org/10.1038/nnano.2009.89).
- Deng S., Berry V. (2016) Wrinkled, rippled and crumpled graphene: an overview of formation mechanism, electronic properties, and applications // *Mater. Today*, Vol. 19. – P. 197-212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.002>.
- Devakul T., Ledwith P.J., Xia L.-Q., Uri A., de la Barrera S., Jarillo-Herrero P., and Fu L. (2023) Magic-angle helical trilayer graphene // *Science Advances.* – Vol. 9 (36): eadi6063.
- Fasolino A., Los J.H., Katsnelson M.I. (2007) Intrinsic ripples in graphene // *Nature Mater.* – Vol. 6. – P. 858-861. <https://doi.org/10.1038/nmat2011>.
- Gupta R.K. (Editor) (2023) 3D Graphene. Fundamentals, Synthesis and Emerging Applications. – Springer. – 441 p.
- Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Booth T.J. & Roth S. (2007) The structure of suspended graphene sheets // *Nature*, Vol. 446. – P. 60-63. doi:10.1038/nature05545.
- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. (2004) Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science.* – V. 306, № 5696. – P. 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
- Qin H., Sun Y., Liu J.Z., Li M., Liu Y. (2017) Negative Poisson's ratio in rippled graphene // *Nanoscale*, Vol. 9. – P. 4135-4142. doi: 10.1039/c6nr07911c.
- Rozhkov A.V., Sboychakov A.O., Rakhmanov A.L., Noria F. (2016) Electronic properties of graphene-based bilayer systems // *Physics Reports.* – Vol. 648. – № 1. – P. 1-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.07.003>.
- Shenoy V.B., Reddy C.D., Ramasubramaniam A., Zhang Y.W. Edge-Stress-Induced Warping of Graphene Sheets and Nanoribbons // *Phys. Rev. Lett.*, 2008, Vol. 101, 245501. doi: 10.1103/PhysRevLett.101.245501.
- Zhang T. (2022) Graphene. From Theory to Applications. – Springer. – 142 p.
- Xu Q., Li X., Zhang J., Hu Y., Wang H., Ma T. (2017) Suppressing nanoscale wear by graphene/graphene interfacial contact architecture: a molecular dynamics study // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – Vol. 9, 40959. doi: 10.1021/acsami.7b11133.
- Yurov V., Zhangozin K. (2024) About the mechanism of graphite splitting // *International independent scientific journal.* – № 58. – P. 29-40.
- Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N. (2019) Structural phase transition in a surface layer of metals // *KarSU Bulletin. Physics.* No. 1. – P. 50-60. DOI 10.31489/2019Ph1/50-60/.
- Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. (2024) Deviations from the Wiedman-Franz law // *Proceedings of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration»*, April 26, Beijing, PRC. – P. 203-209. DOI 10.34660/INF.2024.27.51.198.
- Ахунова А.Х., Баимова Ю.А. (2023) Влияние дислокационных диполей с разным плечом на деформационное поведение графена: молекулярная динамика // *Журнал технической физики.* – Том 93. – Вып. 4. – С. 445-452 // Akhunova A.Kh., Baimova Yu.A. (2023) Influentia dislocationis dipoles cum diversis scapulis in deformatione morum graphenae: dynamica hypothetica // *Acta Physicae technicae.* – Vol. 4. – P. 445-452. DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55030.6-23.
- Баимова Ю.А., Мулюков Р.Р. (2018) Графен, нанотрубки и другие углеродные наноструктуры. – М.:

- Российская академия наук. – 212 с. // Vaimova Yu.A., Mulyukov R.R. (2018) Graphene, nanotubae et aliae nanostructurae carbonis. – М.: Academia Scientiarum Russicarum. – 212 p.
- Гаршев А.В. (рук.) (2019) Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире. – М.: Отчет РФ. – 396 с. // Garshev A.V. (caput) (2019) Monitor evolutionis et executionis technologiарum ad obtinendum graphenam, eius derivationes, alias 2D crystallos et productionem productorum secundum 2D crystallis in Foederatione Russica et mundo. – М.: RF Report. – 396 p.
- Голоудина С.И., Лучинин В.В., Пасюта В.М. и др. (2019) Получение высокопроводящих и оптически прозрачных пленок со структурой мультиграфена путем карбонизации полиимидных пленок Ленгмюра–Блоджетт // Письма в ЖТФ, том 45. – Вып. 9. – С. 50-54 // Goloudina S.I., Luchinin V.V., Pasyuta V.M. et al. (2019) Obtinens membranas valde conductivas et optically pellucidas cum multigraphene structura by carbonization of Langmuir-Blodgett polyimide films // Lettera to the Journal of Technical Physics. – Vol. 9. – P. 50-54. DOI: [10.21883/PJTF.2019.09.47716.17735](https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.09.47716.17735).
- Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. (2011) Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук, Том. 181, №3. – С. 233-268. // Yeletsky A.V., Iskandarov I.M., Knizhnik A.A., Krasikov D.N. (2011) Graphene: Methodi productionis et proprietates thermophysicae // Uspekhi fizicheskikh nauk, vol. 181, N. III. – P. 233-268. DOI: [10.3367/UFNr.0181.201103a.0233](https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201103a.0233).
- Жангозин К.Н. (2023) Новый метод получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой. - Алматы: Darkhan. – 102 с. // Zhangozin K.N. (2023) Nova methodus graphene producendi ex graphite cum aqua microcluster intercalata. - Almaty: Darkhan. - 102 s.
- Жангозин К.Н., Жанабергенов Т.К., Каргин Д.Б. (2021) О новом методе получения порошкового графена // Вестник ЕНУ им. Л. Гумилева, том 136. – №3. – С. 8-16. // Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. (2021) De nova methodo graphene producendi pulveris // Bulletin of ENU im. L. Gumileva, vol. 136, no. - P. 8-16.
- Зимон А.Д. (1977) Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия. – 352 с. // Zimon A.D. (1977) Adhaesio membranae et tunicae. – М.: Chemistry. – 352 p.
- Катин К.П. (2020) Влияние механических деформаций на электронные свойства и адсорбционную способность графена и родственных углеродных наноструктур. - Диссертация доктора физ.-мат. наук, Москва. – 236 с. // Katin K.P. (2020) Effectus deformationum mechanicarum in proprietatibus electronicis et adsorptionis capacitatis graphenae et nanostructurae carbonis affinis. – Dissertatio medica de Physicis et Mathematicis. Scientiarum, Moscoviae. – 236 p.
- Новоселов К.С. (2011) Графен: материалы Флатландии // Успехи физических наук. – Т. 181. – № 12. – С. 1299-1311. // Novoselov K.S. (2011) Grafen: materialy Flatlandii // Uspekhi fizicheskikh nauk. – Т. 181. – № 12. – С. 1299-1311. DOI: [10.3367/UFNr.0181.201112f.1299](https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201112f.1299).
- Машкина Е.С. (2020) Спектральный анализ тепловых флуктуаций в переходных областях предплавления KI // Конденсированные среды и межфазные границы, Том. 22(2). – С. 238-244. // Mashkina E.S. (2020) Analysis speculalis ambigua thermarum in transitionibus regionum KI prementis // Materiae Condensatae et Interphase Circumscriptio, Vol. 22 (2). – P. 238-244. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2837>.
- Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. (2006) Введение в физику поверхности. – М.: Наука. – 490 с. // Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. (2006) Introductio ad superficiem Physicam. – М.: Scientia. – 490 s.
- Подливаев А.И. (2022) Двухслойный графен - Стоун-Уэльсовский графен: структура, устойчивость и межслоевая теплопроводность // Письма в ЖЭТФ. – Том. 115. – № 6. – С. 384-391. // Podlivaev A.I. (2022) Bilayer graphene – Stone-Wales graphene: structura, stabilitas et conductivitas scelerisque interlayer // Letters to JETP, Vol. CXV, N. VI. – P. 384-391. DOI: [10.31857/S1234567822060064](https://doi.org/10.31857/S1234567822060064).
- Рехвиашвили С.Ш., Киштикova Е.В., Кармокова Р.Ю. (2007) К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ, Том. 33, Вып. 2. – С. 1–7. // Rekhviahvili S.Sh., Kishtikova E.V., Karmokova R.Yu. (2007) De calculo constante tolman // Letters to the Journal of Technical Physics, Vol. 33, Exitus. 2. – P. 1-7.
- Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. (2001) Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // Успехи химии, Том. 70 (4). – С. 307-329. // Uvarov N.F., Boldyrev V.V. (2001) Magnitudo effectus in chemiae systematum heterogeneorum // Uspekhi Chemii, Vol. LXX (4). – P. 307-329. DOI <https://doi.org/10.1070/rc2001v070n04abeh000638>.
- Юров В.М., Жангозин К.Н., Жанабергенов Т.К., Каргин Д.Б. (2024) Поверхностные явления в графите

- и получение из него графена // Новости науки Казахстана, №1. – С. 11-23. // Yurov V.M., Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. (2024) Phaenomena superficies in graphite et graphene obtinendo ab ea // Scientia News of Kazakhstan, No. – P. 11-23. [https://doi.org/10.53939/1560-5655\\_2024\\_1\\_19](https://doi.org/10.53939/1560-5655_2024_1_19).
- Юров В.М. (2019) Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, вып. 11. – С. 389-397. // Yurov V.M. (2019) Superficies iacuit crassitudo crystallorum atomice levium // aspectus physicochemici studio botri, nanostructuris et nanomaterialibus, exitus. 11. – P. 389-397. DOI: [10.26456/pcascnn/2019.11.389](https://doi.org/10.26456/pcascnn/2019.11.389).
- Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. (2023) Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // Письма в ЖТФ, том 49, вып. 8. – С. 35-38. // Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. (2023) Study of primary nanocracks in atomically smooth metals // Letters to JTF. – Vol. 8. – P. 35-38. DOI: [10.21883/PJTF.2023.08.55136.19504](https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.08.55136.19504).
- Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. (2019) Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // Нано- и микросистемная техника. – № 6. – С. 347-352 // Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A. (2019) Stratum superficiei crassitatem atomice lenis nanostructurae magneticae // Nano- et microsystem technologiae, N. VI. - P. 347-352. DOI: [10.17587/nmst.21.347-352](https://doi.org/10.17587/nmst.21.347-352).
- Юров В.М. (2020) Размерные эффекты в люминесценции кристаллофосфоров // LXXIV международные научные чтения (памяти А.Л. Чижевского): сборник статей Международной научно-практической конференции. – Москва: ЕФИР. – С. 6-12 // Yurov V.M. Magnitudo effectus in lumine phosphorum crystallorum // LXXIV Lectiones scientificae internationales (in memoriam A.L. Chizhevsky): Collectio articulorum e colloquio scientifico et practico internationali. – Moscoviae: EFR. – P. 6-12.

#### Information about authors

**Yurov Viktor Mikhailovich** – Leading researcher of "TSK-Vostok" LLP, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, e-mail: [exciton@list.ru](mailto:exciton@list.ru).

**Zhangozin Kanat Nakoshevich** – Director, Leading Researcher of "TSK-Vostok" LLP, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: [4kzh@mail.ru](mailto:4kzh@mail.ru).

**Zhanabergenov Timurkhan Kudaibergenovich** – Leading researcher of TSK-Vostok LLP, PhD, e-mail: [4tkz@bk.ru](mailto:4tkz@bk.ru).

**Kargin Djumat Beisenbekovich** – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of the department of technology commercialization of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, e-mail: [kargin\\_db@enu.kz](mailto:kargin_db@enu.kz).

---

---