

8. *Quan H. T., Liu Y., Sun C. P., Nori F.* Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines. – 2007. – arXiv:quant-ph/0611275.
9. *Arnaud J., Chusseau L., Philippe F.* A simple quantum heat engine. – 2003. – arXiv: quant-ph/0211072.
10. *Boukobza E., Tannor D. J.* Thermodynamic analysis of quantum light amplification. – 2006. – arXiv: quant-ph/0611175.
11. *Weimer H., Henrich M. J., Rempp F. et al.* Local effective dynamics of quantum systems: a generalized approach to work and heat. – 2007. – arXiv:0708.2354[quant-ph].
12. *Zurek W. H.* Maxwell's demon, Szilard's engine and quantum measurements. – 2003. – arXiv:quant-ph/0301076.

Інститут магнетизму НАН України, Київ  
Київський національний університет  
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 18.04.2008

УДК 539.216/22:535.33/34

© 2008

Академік НАН України **А. П. Шпак, В. Л. Карбівський,  
Т. А. Корніюк**

## **Поведінка вірусів рослин та їх комплексів на поверхні монокристала Si (111)**

*We use ultrahigh-vacuum atomic force microscopy (UHV – AFM) to study the interaction of tobacco mosaic virus (TMV) and alfalfa mosaic virus (AMV) with a Si (111) surface. Changes of the virion conformation and different degrees of order on the investigated surface are established. It is demonstrated that the adsorption of TMV virions is accompanied by the formation of predominantly single-layer ordered films, while the AMV adsorption is accompanied by the formation of unordered accumulations of virions and a more abrupt change of the height of viral particles. It is established that the change of virions' height depends on the number of negatively charged amino acid residues on the outer surface of a capsid.*

Віруси складаються з нуклеїнової кислоти і глобулярних білкових молекул та є найпростішими формами живих організмів. Вірусна частинка не має власного апарату відтворення, однак, проникаючи в клітину, забезпечує власну реплікацію за рахунок синтезу інфікованою клітиною вірусних білків. Розміри вірусних частинок коливаються у межах від 15 до 600 нм [1, 2]. Окрім біологічних ознак (здатність до відтворення, інфекційність), віруси мають багато корисних властивостей. Зокрема, вірусні частинки здатні утворювати кристали з вигідними оптичними властивостями. Наявність великої кількості зарядів на внутрішній і зовнішній поверхнях віріонів дозволяє отримувати наночастинки матеріалів за допомогою біоміметичного методу [3, 4]. Здатність вірусів проникати до клітини може бути використана для створення новітніх внутрішньоклітинних нанозондів та наносенсорів. Найбільш перспективними для застосування у нанотехнології є віруси рослин, оскільки вони є безпечними для людини та тварин, можуть бути отримані у великій кількості та здатні витримувати модифікації [5].

Авторами даної роботи проведено дослідження поведінки палочкоподібних вірусів, зокрема, вірусів тютюнової мозаїки (ВТМ), що мають спіральну симетрію, згідно з якою

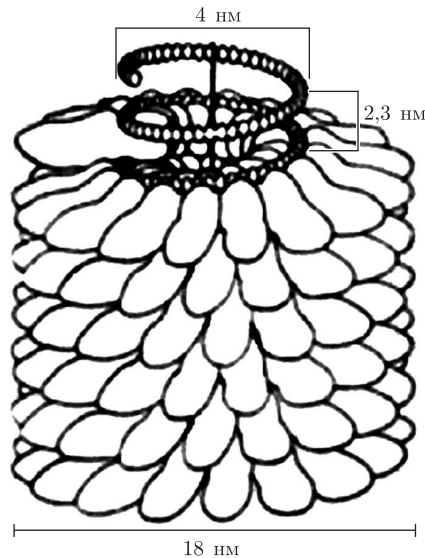


Рис. 1. Модель укладки білкових субодиниць у вірусі тютюнової мозаїки

облаштовані їх білкові субодиниці (рис. 1), та вірусів мозаїки люцерни (ВМЛ) на поверхні монокристалла кремнію (площина (111)) методом зондової мікроскопії високої роздільної здатності.

Були використані суспензії ВТМ з концентрацією 12 мг/мл та ВМЛ з концентрацією 10 мг/мл. Суспензії після отримання наносилися на поверхню монокристалла кремнію Si (111) за допомогою мікрошприца. Висушування поверхні Si (111) проводилось у струмені сухого азоту, після чого зразок вносився до робочої камери атомно-силового мікроскопу (АСМ). Залишковий тиск в камері зондування становив  $3,0 \cdot 10^{-8}$  Па. Для зондування поверхні використовували кантилевери, виготовлені з нітриду кремнію —  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Дослідження вірусу на поверхні монокристалла проводилося в безконтактному режимі АСМ з атомною роздільною здатністю.

Під час експерименту було досліджено взаємодію ВТМ з поверхнею Si (111) при нанесенні свіжої суспензії вірусів та через чотири місяці після її приготування. Одержані результати були порівняні з результатами дослідження взаємодії ВМЛ з ідентичною поверхнею.

Як видно з рис. 2, діаметр віріонів ВТМ становить  $\sim 18$  нм, а довжина  $\sim 300$  нм. Якщо вважати форму віріона циліндричною, то його висота на поверхні повинна збігатися з шириною. На отриманих знімках помітно, що діаметр віріонів на поверхні Si (111) узгоджується з даними електронної мікроскопії. Однак висота віріонів є значно меншою ( $\sim 11,4$  нм), що свідчить про їх істотну взаємодію з поверхнею кремнію. Автори роботи [6] також засвідчують зменшення висоти віріонів ВТМ з 18,0 до 15,0 нм при нанесенні на поверхню піролітичного графіту, що була модифікована карбоксильними та ацилхлоридними групами.

Нанесення свіжої суспензії ВТМ на поверхню Si (111) супроводжувалось утворенням моношарів, в яких відбувалося впорядкування віріонів. “Текстури” віріонів, що спостерігаються на поверхні кремнію, передусім, зумовлені значною поздовжньою взаємодією вірусів. При детальному розгляді отриманих зображень вірусів, окрім “текстурування” на зображеннях кожної частинки вірусу спостерігаються поперечні профільні лінії, що, можливо, пов’язано зі спіральною структурою внутрішньої частини віріона (зумовлене наявністю повторюваної базової структурної одиниці, яка, як відомо, складається з 49 субодиниць кап-

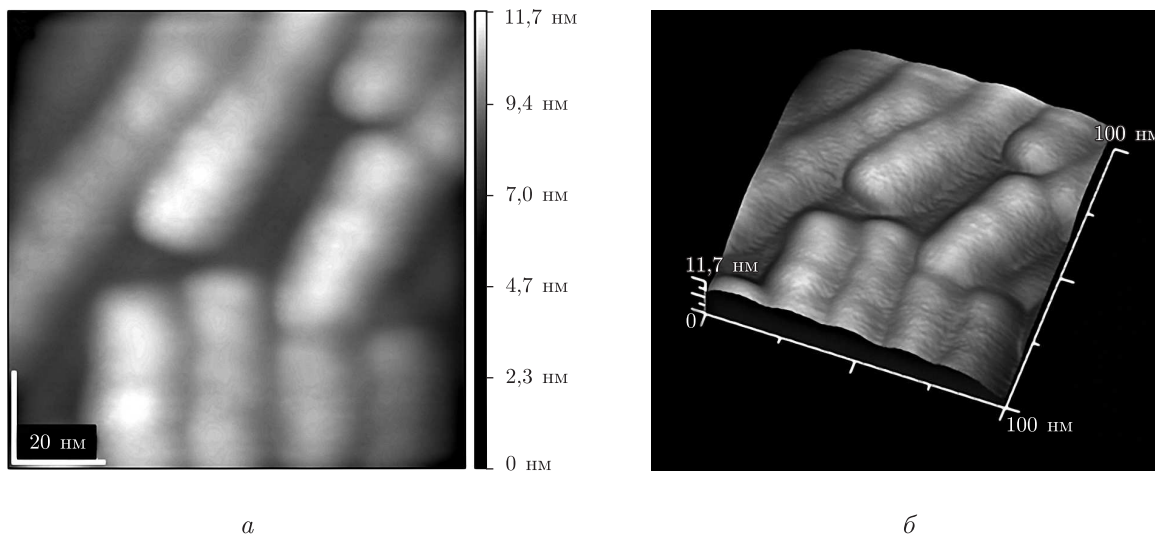


Рис. 2. Віріони ВТМ на поверхні Si (111) при нанесенні свіжої суспензії віруса:  
 а — двовимірне зображення віріонів ВТМ; б — тривимірне зображення віріонів ВТМ

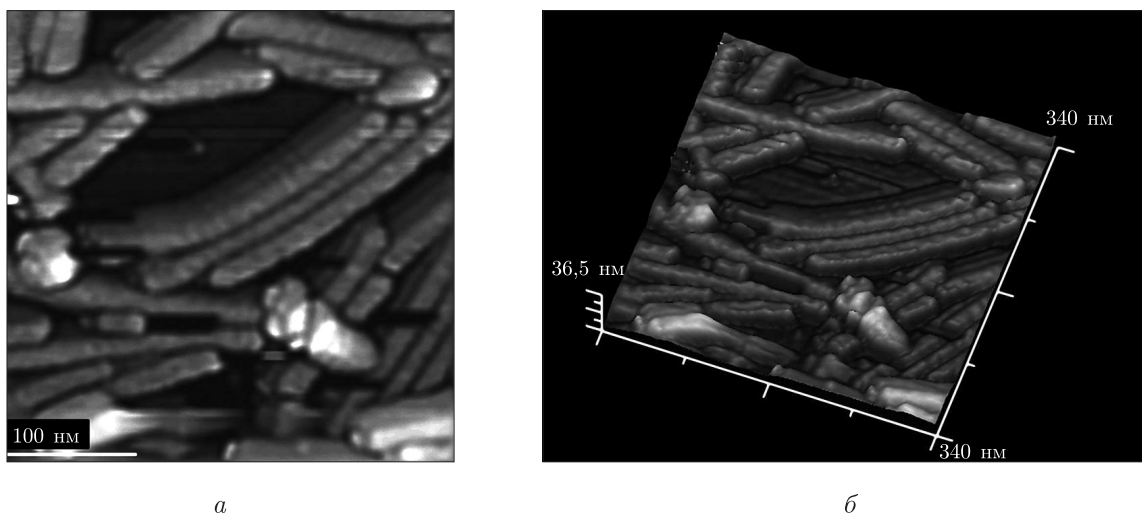


Рис. 3. Віріони ВТМ на поверхні Si (111) при нанесенні суспензії віріонів через чотири місяці після її приготування:  
 а — двовимірне зображення віріонів ВТМ; б — тривимірне зображення віріонів ВТМ

сиду та має висоту 69 Å (відповідає трьом обертам спіралі). Відповідна сегментованість віріона чіткіше спостерігається на тривимірній частині зображення (див. рис. 2).

Дослідження впливу терміну зберігання суспензії після її приготування на структуру та властивості віріонів ВТМ через чотири місяці показав, що поряд з утворенням моносарів на певних ділянках спостерігалось напшарування віріонів, що, можливо, зумовлене їх агрегацією при зберіганні за кімнатної температури. Діаметр, довжина та висота віріонів залишилися без змін (рис. 3).

Нанесення суспензії віріонів ВМЛ на поверхню Si (111) супроводжувалось агрегацією віріонів у щільні скупчення та зменшенням їх висоти з 19 до 9 нм. При цьому переважно спостерігалось утворення багатопарових невпорядкованих скупчень віріонів (рис. 4).

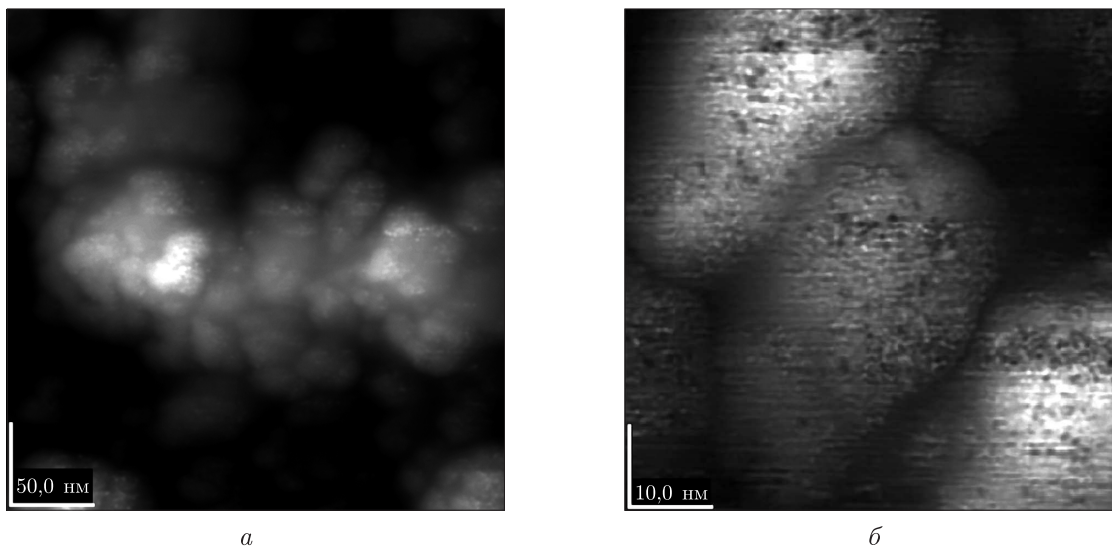


Рис. 4. Віріони ВМЛ на поверхні Si (111) при нанесенні свіжої суспензії віріонів:  
*a* — зображення скупчення віріонів ВМЛ; *б* — збільшене зображення віріонів ВМЛ

Існує два типи адсорбції: 1) фізична — відбувається за рахунок дисперсійних (Ван-дер-Ваальсових) сил, утворення водневих та інших взаємодій електростатичного характеру; 2) хімічна — за рахунок утворення хімічних зв'язків між адсорбатом та адсорбентом. Як відомо, зовнішня та внутрішня поверхні капсиду вірусів є протилежно зарядженими, що зумовлене наявністю позитивно та негативно заряджених груп у складі бічних радикалів амінокислот. Однак поверхня Si (111) не є зарядженою і очевидно, що взаємодія капсиду з даною поверхнею не зумовлюється електростатичним притяганням, а тому роль подібних взаємодій є виключеною. Хімічна адсорбція також виключається, оскільки кремній не утворює хімічних зв'язків із жодним компонентом вірусних капсидів. Тому найбільш імовірними процесами при адсорбції віріонів на поверхні Si (111) є Ван-дер-Ваальсові взаємодії та утворення водневих зв'язків із поверхнею. Ван-дер-Ваальсові взаємодії переважають при адсорбції віріонів на поверхні графіту, оскільки даний матеріал має гідрофобні властивості, і утворення більш міцних водневих зв'язків є неможливим. Енергія даних взаємодій є найнижчою ( $\sim 2$  кДж), а тому Ван-дер-Ваальсові взаємодії є дуже слабкими і не супроводжуються значними змінами конформації молекул. Наслідком цього є відсутність змін висоти віріонів ВТМ на поверхні графіту. Адсорбція віріонів ВТМ на поверхні Si (111), навпаки, супроводжується значними змінами їх конформації та зменшенням висоти віріонів до 11,7 нм. Подібний результат був одержаний при дослідженні поведінки віруса мозаїки люцерни (ВМЛ) на даній поверхні. Адсорбція віріонів ВМЛ супроводжувалася зменшенням їх висоти з 19,0 до 9,0 нм.

Очевидно, що такі зміни конформації віріонів зумовлені амінокислотним складом зовнішньої поверхні капсиду. Оскільки на зовнішній поверхні зосереджені негативно заряджені амінокислотні залишки, які містять гідроксильні та карбоксильні групи (серин, треонін, тирозин, аспарагінова та глютамінова кислоти), то вони можуть забезпечувати адгезію віріонів шляхом утворення водневих зв'язків із поверхнею. Якщо порівняти вміст амінокислот, бічні ланцюги яких несуть вищезгадані групи, у капсидних білків ВМЛ та ВТМ, то помітно, що вміст таких амінокислот у ВМЛ є більшим (табл. 1).

Таблиця 1

Амінокислота	ВМЛ	ВТМ
Серин	15	16
Треонін	13	16
Аспарагінова кислота	11	8
Глутамінова кислота	11	6
Тирозин	4	4

Таким чином, адсорбція вірусу тютюнової мозаїки та вірусу мозаїки люцерни на поверхні Si (111) супроводжується змінами конформації віріонів внаслідок утворення водневих зв'язків та Ван-дер-Ваальсових взаємодій. Зміна конформації полягає у зменшенні висоти віріонів внаслідок взаємодії амінокислотних залишків на зовнішній поверхні капсиду з атомами Силіцію на поверхні Si (111). Адсорбція віріонів ВТМ супроводжується утворенням одношарових плівок, у той час як при адсорбції ВМЛ на поверхні Si (111) відбувається нашарування декількох віріонів.

*Автори висловлюють подяку асистенту кафедри вірусології Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, канд. біол. наук Т. П. Шевченко за надані зразки вірусів.*

1. *Вайнштейн Б. К., Фриджин В. М., Инденбомм.* Современная кристаллография. Т. 2. Структура кристаллов. – Москва: Наука, 1979. – 359 с.
2. *Воробьев А., Быков А. С.* Атлас по медицинской микробиологии, вирусологии и иммунологии. – Москва: МИА, 2008. – 272 с.
3. *Sarikaya M., Tamerler C., Jen A. et al.* Molecular biomimetics: nanotechnology through biology // Nature Materials. – 2003. – **2**. – P. 577–585.
4. *Zhang S.* Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly // Nature Biotechnology. – 2003. – **2**, No 10. – P. 1171–1178.
5. *Krishnaswami S. Raja, Wang Q.* Bionanoparticles // Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, 2004. – P. 321–330.
6. *Fang J.* Virus Nanoparticles: Adsorption and Organization on Substrates // Ibid. – P. 1–7.

*Інститут металофізики  
ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 15.05.2008*