

УДК 621.793.74, 539.612, 577.112  
EDN: UTRJND

PACS: 87.64.Dz

## Модификация поверхности слюды методом магнетронного напыления тонких металлических покрытий

И. Д. Шумов, А. А. Валеева, М. О. Ершова, В. С. Зиборов, А. Ф. Козлов,  
Ю. Д. Иванов, А. И. Арчаков, Т. О. Плешакова

*Вирус табачной мозаики (ВТМ) использовали в качестве модельного объекта при разработке метода модификации поверхности подложек из слюды, предназначенных для исследования белок-содержащих частиц нанометрового размера методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Модификацию поверхности осуществляли методом магнетронного напыления золота в разряде постоянного тока в аргоне с использованием хрома в качестве материала адгезионного слоя. Адсорбцию ВТМ проводили при pH 7,4 на трех типах подложек: высокоориентированном пиролитическом графите (ВОПГ), слюде, модифицированной 3-аминопропилтриэтоксисиланом (АПТЭС), и слюде с золотым покрытием, сформированным методом магнетронного напыления. ВОПГ использовали в качестве эталонной подложки. В случае слюды, покрытой золотом, количество связанных с поверхностью вирусных частиц было примерно в десять раз больше, чем в случае слюды, модифицированной АПТЭС. Высота частиц ВТМ на слюде, модифицированной АПТЭС, была ниже, чем на ВОПГ и на слюде, покрытой золотом. Предложенная методика может быть полезна при разработке биосенсорных устройств и при исследовании единичных частиц различных вирусов.*

*Ключевые слова:* вирус табачной мозаики, атомно-силовая микроскопия, адсорбция белка, магнетронное напыление, металлические покрытия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-20-26

### Введение

Адсорбция белков является фундаментальным явлением, лежащим в основе процессов, нашедших многочисленные применения в

биотехнологии [1, 2] и биомедицине [3]. Таким образом, изучение адсорбции белков представляет большой интерес для современных междисциплинарных исследований [4]. Вирус табачной мозаики (ВТМ) известен как

---

Шумов Иван Дмитриевич<sup>1</sup>, н.с., к.б.н.

E-mail: shum230988@mail.ru

Валеева Анастасия Андреевна<sup>1</sup>, м.н.с.

Ершова Мария Олеговна<sup>1</sup>, м.н.с.

Зиборов Вадим Серафимович<sup>1,2</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ziborov.vs@yandex.ru

Козлов Андрей Федорович<sup>1</sup>, вед. инженер.

Иванов Юрий Дмитриевич<sup>1,2</sup>, зав. лаб., профессор, д.б.н.

Арчаков Александр Иванович<sup>1</sup>, научный руководитель, академик РАН, профессор, д.б.н.

Плешакова Татьяна Олеговна<sup>1</sup>, зам. директора, д.б.н.  
<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт

---

биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ).

Россия, 119121, Москва, ул. Погодинская, 10, стр. 8.

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур

Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 6.06.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 3.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

---

© Шумов И. Д., Валеева А. А., Ершова М. О.,  
Зиборов В. С., Козлов А. Ф., Иванов Ю. Д., Арчаков А. И.,  
Плешакова Т. О., 2024

первый обнаруженный вирус [5]. Он всесторонне изучен и охарактеризован в литературе, в том числе с помощью атомно-силовой (АСМ) [6–8] и электронной (ЭМ) микроскопии [9, 10]. Этот РНК-вирус представляет собой палочковидную частицу длиной 300 нм с очень высоким (~ 95 %) содержанием белка [11]. Химически оболочка частицы ВТМ представлена 2130 идентичными белковыми субъединицами, имеющими молекулярную массу 17,5 кДа [11]. Исходя из этих соображений, ВТМ представляет собой очень удобный объект для изучения адсорбции белок-содержащих частиц.

АСМ является высокочувствительным нанотехнологическим методом, позволяющим исследовать единичные объекты нанометрового размера [12], в том числе вирусные частицы [6, 7], адсорбированные на твердой поверхности подложки для АСМ, с чрезвычайно высоким (до 0,1 нм [12]) разрешением по высоте. Это требует использования подложек с исключительно низкой шероховатостью поверхности [12]. По этой причине перечень подложек, пригодных для визуализации единичных белок-содержащих наноразмерных объектов методом АСМ, ограничен. Часто используют слюду (как свежесколотую, так и модифицированную) [6] и высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) [6]. При этом следует подчеркнуть, что пригодность определенного типа подложек для изучения адсорбции белков определяется также свойствами изучаемого объекта и соответствующими условиями эксперимента [4, 13]. Соответственно, расширение перечня подложек, пригодных для АСМ-исследований единичных белок-содержащих частиц, представляет собой важнейшую задачу современной науки.

Один из подходов к модификации подложек для АСМ заключается в формировании на их поверхности металлических покрытий [13], что позволяет кардинально изменить свойства поверхности подложки, обеспечив адсорбцию исследуемых объектов в условиях эксперимента [13]. Одним из методов формирования металлических покрытий на твердых подложках является магнетронное напыление [13, 14]. Одним из ключевых преимуществ

магнетронного напыления является превосходная адгезия покрытия к поверхности подложки – в отличие от методов, основанных на испарении [15]. Помимо этого, магнетронное напыление обеспечивает формирование однородных покрытий высокой чистоты [15] с низкой пористостью [16, 17]. Из этих соображений метод магнетронного напыления и был использован в наших экспериментах.

Цель настоящей работы – разработка методики модификации поверхности слюды на основе метода магнетронного распыления металлов в аргоновой плазме для усиления адсорбции на эту поверхность вирусных частиц на примере ВТМ.

### Методика эксперимента

В настоящей работе кратко описана методика формирования тонких золотых покрытий на подложках из слюды. В основе этой методики лежит использование метода магнетронного распыления металлов в аргоновой плазме в разряде постоянного тока. Золотое покрытие обеспечивает прямое ковалентное связывание белка с поверхностью подложки [18, 19], что может увеличить адсорбцию ВТМ. В наших экспериментах мы продемонстрировали, что при физиологическом рН 7,4 частицы ВТМ лучше связываются с поверхностью золота, чем с поверхностью слюды, модифицированной 3-аминопропилтриэтоксисиланом (АПТЭС). Разработанная методика может быть использована при разработке функциональных покрытий для биотехнологических и биосенсорных приложений.

Фосфатно-солевой буфер в модификации Дульбекко (буфер ФСБ-Д, рН 7,4; 11 мМ фосфат, 150 мМ NaCl) готовили из смеси солей, приобретенных у компании Pierce (США) согласно инструкции производителя. Препарат ВТМ (суспензия 21,1 мг/мл в PBS-D) любезно предоставлен Валентином Макаровым (Институт им. Белозерского, МГУ им. М. В. Ломоносова). Деионизированную сверхчистую воду получали с помощью системы очистки воды Simplicity UV (Millipore, Франция). Мишень для распыления хрома (чистота 99,99 %; диаметр 2 дюйма, толщина 0,25 дюйма) была приобретена у AJA Inc. (США). Золотая ми-

шень (чистота 99,99 %, диаметр 2 дюйма, толщина 150 мкм) приобретена в компании «Гирмет» (Москва, Россия).

В экспериментах использовали три типа подложек для АСМ: ВОПГ (марка ZYH; НТ-МДТ, Зеленоград, Россия), слюду сорта мусковит, модифицированную АПТЭС по методике, разработанной Yamada et al. [20], и слюду с золотым покрытием. Слюда закупали в компании SPI (США) в виде листов размером 7,5×2,5 мм, которые далее разрезали на прямоугольные куски размером 7×15 мм.

Формирование металлического покрытия на слюде методом магнетронного напыления проводили в два этапа по методике, разработанной на основе ранее опубликованной [14]. Первым этапом было нанесение слоя, способствующего адгезии, необходимого при формировании металлических покрытий на диэлектрических подложках [21, 22]. Чаще всего для формирования слоев, способствующих адгезии, перед нанесением функциональных золотых покрытий на диэлектрические подложки используют хром [18] и титан [23]. Вторым этапом было напыление золота на слой, способствующий адгезии. Магнетронное напыление проводили на установке «Ogion-3» (AJA Inc., США). Подложки располагали горизонтально на расстоянии 15 см от распыляемых мишеней. Перед распылением рабочую камеру откачивали до базового вакуума  $6 \times 10^{-7}$  Торр. Напыление проводили в разряде постоянного тока в аргоне при рабочем давлении  $4,5 \times 10^{-3}$  Торр. Мощность, подводимая к распыляемым мишеням, составляла не менее 70 Вт. На первом этапе на подложки напыляли хром (Cr) в течение десяти минут для формирования адгезионного слоя. На втором этапе напыляли золото (Au) в течение 400 секунд. В условиях эксперимента скорость осаждения Cr и Au составляла  $0,4 \text{ \AA/s}$  и  $2,2 \text{ \AA/s}$  соответственно. Скорость осаждения металлов контролировали методом пьезокварцевого микровзвешивания с использованием пьезокварцевых микровесов MCM-160 (McVac Manufacturing, США). Перед напылением на подложки обе мишени предварительно распыляли в течение пяти минут. После завершения формирования покрытия рабочую камеру заполняли

сухим азотом до атмосферного давления. После этого подложки с золотым функциональным покрытием выдерживали на воздухе в течение  $\sim 15$  минут, а затем помещали в плотно закрытые стерильные одноразовые пробирки типа Эппендорф. Там покрытые золотом подложки хранили не менее шести месяцев перед их использованием в экспериментах по адсорбции ВТМ.

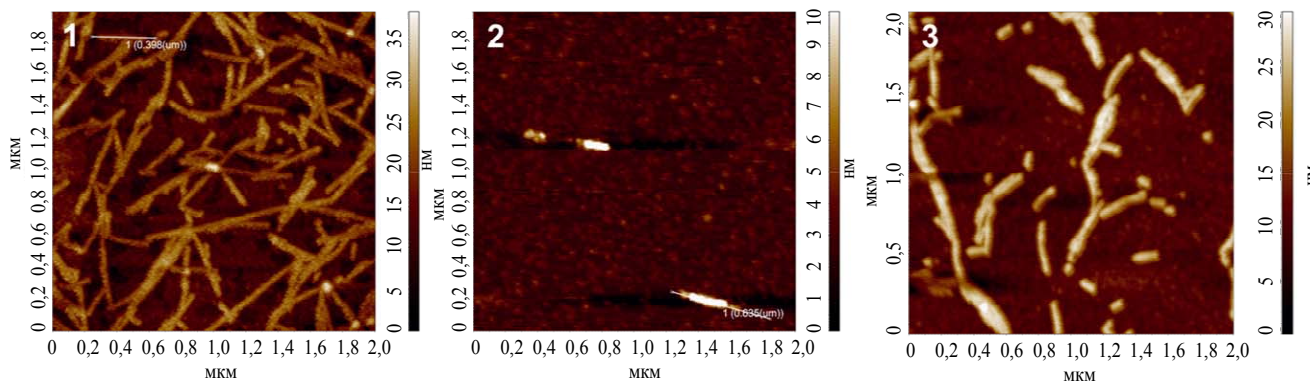
Адсорбцию частиц ВТМ на поверхность подложек проводили следующим образом: 5 мкл исходного препарата ВТМ сначала добавляли к 495 мкл ФСБ-Д и выдерживали во встряхивателе Thermomixer Comfort (Eppendorf, Germany) в течение 30 минут при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и 600 об/мин. Затем 5 мкл полученной разбавленной суспензии ВТМ наносили на подложку и инкубировали на ее поверхности в течение 15 минут во влажной камере. После инкубации подложку промывали 1 мл сверхчистой воды, сушили на воздухе и сканировали методом АСМ.

АСМ-изображения получали в полуконтактном режиме на воздухе на атомно-силовом микроскопе Titanium (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия), с использованием кантилеверов NSG-10 с радиусом кривизны 10 нм («TipsNano», Зеленоград, Россия). Разрешение сканирования составляло  $512 \times 512$  пикселей.

## Результаты и их обсуждение

В экспериментах в качестве эталонной подложки мы использовали ВОПГ, поскольку адсорбция ВТМ на ВОПГ хорошо изучена [6, 7]. В экспериментах варьировали только один параметр – тип подложки, остальные параметры (время инкубации и pH буфера) сохраняли одинаковыми во всех экспериментах, чтобы наглядно продемонстрировать влияние типа подложки на связывание ВТМ с ее поверхностью.

На рисунке показаны типичные АСМ-изображения частиц ВТМ на ВОПГ (изображение 1), слюде, модифицированной АПТЭС (изображение 2) и слюде с золотым покрытием (изображение 3).



**Типичные АСМ-изображения частиц ВТМ на ВОПГ (изображение 1, слева), слюде, функционализированной АПТЭС (изображение 2, в центре) и слюде с золотым покрытием (изображение 3, справа). Время инкубации суспензии ВТМ 0,211 мг/мл (рН 7,4) на подложках во всех случаях составляло 15 мин. Размер сканов 2×2 мкм**

На АСМ-изображении частиц ВТМ, адсорбированных на ВОПГ (изображение 1), наблюдается большое количество длинных (до 1,2 мкм) объектов высотой 18 нм, которые, очевидно, представляют агрегаты ВТМ «торец в торец». На этом изображении также наблюдаются агрегаты «бок в бок». Напротив, на АСМ-изображении ВТМ на слюде, модифицированной АПТЭС, наблюдаются только два агрегата ВТМ, каждый из которых включает не более трех вирусных частиц (изображение 2). При этом высота адсорбированных на слюде частиц ВТМ меньше (не более 17 нм). В случае золотого покрытия количество связанных с поверхностью вирусных частиц в несколько раз больше, чем в случае модифицированной АПТЭС слюды (изображение 3): видно, что при адсорбции на золоте отдельные частицы ВТМ легко образуют агрегаты как «бок в бок», так и «торец в торец» высотой от 17 до 18 нм. Соответственно, покрытие из золота, сформированное на поверхности подложки из слюды, позволило значительно повысить адсорбцию ВТМ на эту поверхность. А именно, количество адсорбированных частиц ВТМ, наблюдаемое на золотом покрытии, в ~10 раз больше, чем на слюде, модифицированной АПТЭС.

В 2004 г. Дубровин и сотр. [6] сообщили о различии в адсорбционном поведении ВТМ на ВОПГ и на слюде. А именно, эти авторы адсорбировали ВТМ из его суспензий с концентрацией от 0,065 до 0,325 мг/мл в фосфатно-солевом буфере (ФСБ), содержащем 150 мМ NaCl, при рН 7,3 на ВОПГ в течение 15 мин. Высота адсорбированных таким способом частиц ВТМ на ВОПГ была

18,8±0,9 нм. В случае слюды Дубровин и др. увеличивали как концентрацию вируса, так и время инкубации до 1,3 мг/мл и 30 мин, соответственно. При этом, даже при 20-кратно увеличенной концентрации и 2-кратном увеличении времени инкубации количество адсорбированного ВТМ на слюде было в 40 раз меньше, чем на ВОПГ [6]. Эти авторы объяснили такое различие существенным влиянием гидрофобных взаимодействий между частицами ВТМ и поверхностью подложки на адсорбцию ВТМ, и отметили, что количество адсорбированного ВТМ можно рассматривать как показатель гидрофобности поверхности подложки [6]. В самом деле, известно, что гидрофобные взаимодействия могут играть определяющую роль в адсорбции белков [24, 25], и, очевидно, это касается адсорбции ВТМ [6, 7]. Условия наших экспериментов (ФСБ-Д, содержащий 150 мМ NaCl, рН 7,4, инкубация в течение 15 минут и концентрация ВТМ 0,211 мг/мл) были аналогичны тем, которые использовали Дубровин с соавт. И мы заметили, что число частиц ВТМ, адсорбированных на ВОПГ, на порядок превышает таковое на слюде, хотя последняя была модифицирована с помощью АПТЭС (см. рисунок). Таким образом, наши результаты согласуются с данными, полученными ранее другими авторами [6, 7]. Кроме того, следует также отметить, что высота частиц ВТМ, измеренная на более гидрофильных подложках, ниже, чем на более гидрофобных [4], что мы и наблюдали в наших экспериментах. Таким образом, учитывая адсорбцию ВТМ, для оценки гидрофобности поверхности подложки можно использовать два фактора – количество адсорбиро-

ванных частиц ВТМ [6] и их высоту. В наших экспериментах со слюдой с золотым покрытием количество связанных с поверхностью частиц ВТМ оказалось на порядок больше, в случае слюды, модифицированной АПТЭС (см. рисунок). Важно отметить, что значение высот АСМ-изображений частиц ВТМ на золоте было близко к таковому, полученному на ВОПГ. На основании рассмотренных выше соображений мы можем заключить, что адсорбция ВТМ на золоте обусловлена гидрофобными взаимодействиями. В самом деле, несмотря на то, что поверхность чистого золота гидрофильна [26], она приобретает гидрофобные свойства при хранении в условиях окружающей среды вследствие адсорбции углеродсодержащих соединений [26].

Следует также отметить, что физическая адсорбция представляет собой равновесный процесс. Использование золотого покрытия обеспечивает прямое ковалентное связывание белка с поверхностью подложки, что представляет собой необратимую хемосорбцию [18, 19]. Это еще один фактор, который также может способствовать усилению связывания частиц ВТМ с поверхностью подложки.

### Заключение

Разработана методика модификации поверхности подложки из слюды путем формирования на этой поверхности покрытия из золота с использованием метода магнетронного напыления в разряде постоянного тока в аргоне. Обнаружено, что количество частиц ВТМ, адсорбированного на слюде, покрытой золотом, в ~ 10 раз превышает количество частиц ВТМ, наблюдаемое на слюде, модифицированной АПТЭС. Сравнивая эти результаты с результатами, полученными при использовании ВОПГ в качестве эталонной подложки, и принимая во внимание ранее опубликованные данные [6, 7], сделан вывод, что в наших экспериментальных условиях адсорбция ВТМ на подложках с золотым покрытием обусловлена гидрофобными взаимодействиями. Кроме того, ковалентный характер связывания белка с золотом также может способствовать усилению связывания ВТМ с поверхностью подложки. Разработанная нами методика может быть полезна при исследова-

нии единичных вирусных частиц, и может найти применение как в фундаментальных исследованиях, так и в биотехнологии.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (№ 122030100168-2).  
Измерения на атомно-силовом микроскопе выполнены при использовании уникальной научной установки «Авогадро».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Horber J. K. H. / Methods Cell. Biol. 2002. Vol. 68. P. 1–31.
2. Nakanishi K., Sakiyama T., Imamura K. / J. Biosci. Bioeng. 2001. Vol. 91. № 3. P. 233–244.
3. Bhakta S. A., Evans E., Benavidez T. E., Garcia C. D. / Anal. Chim. Acta. 2015. Vol. 872. P. 7–25.
4. Knez M., Sumser M. P., Bittner A. M., Wege C., Jeske H., Hoffmann D. M., Kuhnke K., Kern K. / Langmuir. 2003. Vol. 20. P. 441–447.
5. Gaur R. C., Patil B. L., Selvarajan R. Plant RNA Viruses. Molecular Pathogenesis and Management. – London: Academic Press, 2023. P. 173–191.
6. Дубровин Е. В., Курикова М. Н., Новиков В. К., Дрыгин Ю. Ф., Яминский И. В. / Колл. Журн. 2004. Т. 66. Вып. 6. С. 750–755.
7. Drygin Y. F., Bordunova O. A., Gallyamov M. O., Yaminsky I. V. / FEBS Lett. 1998. Vol. 425. P. 217–221.
8. Bushell G. R., Watson G. S., Holt S. A., Myhra S. / J. Microsc. 1995. Vol. 180. P. 174–181.
9. Williams R. C., Wyckoff R. W. G. / Science. 1945. Vol. 101. № 2632. P. 594–596.
10. Шумов И. Д., Канащенко С. Л., Арчаков А. И., Иванов Ю. Д., Пleshakova Т. О. / Прикладная физика. 2017. № 4. С. 10–15.
11. Van Regenmortel M. H. V., Muller S. Laboratory Techniques in Biochemistry and Molecular Biology. – Amsterdam: Elsevier, 1999.
12. Ricci D., Braga P. C. Methods in Molecular Biology. Atomic Force Microscopy. – New York: Humana Press, 2003.
13. Shumov I. D., Kanashenko S. L., Ziborov V. S., Ivanov Y. D., Archakov A. I., Enikeev D. V., Potoldykova N. V., Pleshakova T. O. / IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 699. P. 012050.
14. Shumov I. D., Kanashenko S. L., Ziborov V. S., Ivanov Y. D., Archakov A. I., Pleshakova T. O. / J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 789. P. 012053.
15. Swann S. / Phys. Technol. 1988. Vol. 19. P. 67–75.
16. Petroff P., Sheng T. T., Sinha A. K., Rozgonyi G. A., Alexander F. B. / J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. P. 2545–2554.
17. Salamon K., Milat O., Radić N., Dubček P., Jerčinović M., Bernstorff S. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 095304.

18. *Sask K. N., Zhitomirsky I., Berry L. R., Chan A. K. C., Brash J. L.* / *Acta Biomaterialia*. 2010. Vol. 6. P. 2911–2919.
19. *Thourson S. B., Marsh C. A., Doyle B. J., Timpe S.* / *J. Coll. Surf. B: Biointerfaces*. 2013. Vol. 111. P. 707–712.
20. *Yamada K., Yoshii S., Kumagai S., Fujiwara I., Nishio K., Okuda M., Matsukawa N., Yamashita I.* / *Jpn. J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 45. P. 4259–4264.
21. *Stelmakh V., Rinnerbauer V., Joannopoulos J. D., Soljačić M., Celanovic I., Senkevich J. J., Tucker C., Ives T., Shrader R.* / *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum Surfaces and Films*. 2013. Vol. 31. P. 061505.
22. *Yan L., Woollman J. A.* / *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 92. P. 4386–4392.
23. *Habteyes T. G., Dhuey S., Wood E., Gargas D., Cabrini S., Schuck P. J., Alivisatos A. P., Leone S. R.* / *ACS Nano*. 2012. Vol. 6. P. 5702–5709.
24. *Barbosa M. A., Martins M. C. L.* Peptides and proteins as biomaterials for tissue regeneration and repair. – Cambridge, United States: Woodhead Publishing, 2018.
25. *Andrade J. D., Hlady V., Wei A. P.* / *Pure & Appl. Chem.* 1992. Vol. 64. № 11. P. 1777–1781.
26. *Smith T.* / *J. Coll. Interface Sci.* 1980. Vol. 75. № 1. P. 51–55.

PACS: 87.64.Dz

## Surface modification of mica by magnetron sputtering deposition of thin metallic coatings

*I. D. Shumov<sup>1</sup>, A. A. Valueva<sup>1</sup>, M. O. Ershova<sup>1</sup>, V. S. Ziborov<sup>1,2</sup>, A. F. Kozlov<sup>1</sup>, Yu. D. Ivanov<sup>1,2</sup>, A. I. Archakov<sup>1</sup> and T. O. Pleshakova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Biomedical Chemistry (IBMC)

Bd. 8, 10 Pogodinskaya st., Moscow, 119121, Russia

<sup>2</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT)

Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

*Received 6.06.2024; revised 25.06.2024; accepted 3.07.2024*

***Tobacco mosaic virus (TMV) has been used as a model object for the development of a technique of surface modification of mica substrates, which are intended for atomic force microscopy (AFM) investigation of protein-containing particles of nanometer size. The surface modification has been performed by direct current (DC) magnetron sputtering of gold in argon, while chromium has been employed as a material of an adhesion-promoting layer. Adsorption of TMV has been performed at pH 7.4 onto three types of AFM substrates: highly oriented pyrolytic graphite (HOPG), 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES)-modified mica, and mica with magnetron sputtered gold coating. HOPG has been employed as a reference substrate. In the case of gold-coated mica, the number of surface-bound viral particles was about ten times greater than in the case of APTES-modified mica. In addition, the height of TMV particles on APTES-modified mica was lower than that on both HOPG and gold-coated mica. The technique proposed herein can be of use in the development of biosensor devices and in the single-particle studies of various viruses.***

**Keywords:** tobacco mosaic virus; atomic force microscopy; protein adsorption; magnetron sputtering, metallic coatings.

### REFERENCES

- Horber J. K. H., *Methods Cell. Biol.* **68**, 1–31 (2002).
- Nakanishi K., Sakiyama T. and Imamura K., *J. Biosci. Bioeng.* **91** (3), 233–244 (2001).
- Bhakta S. A., Evans E., Benavidez T. E. and Garcia C. D., *Anal. Chim. Acta.* **872**, 7–25 (2015).

4. Knez M., Sumser M. P., Bittner A. M., Wege C., Jeske H., Hoffmann D. M., Kuhnke K. and Kern K., *Langmuir* **20**, 441–447 (2003).
5. Gaur R. C., Patil B. L. and Selvarajan R. *Plant RNA Viruses. Molecular Pathogenesis and Management*, London-San Diego-Cambridge-Oxford, Academic Press, 2023.
6. Dubrovin E. V., Kirikova M. N., Novikov V. K., Drygin Yu. F. and Yaminsky I. V., *Colloid J.* **66**, 673–678 (2004).
7. Drygin Y. F., Bordunova O. A., Gallyamov M. O. and Yaminsky I. V., *FEBS Lett.* **425**, 217–221 (1998).
8. Bushell G. R., Watson G. S., Holt S. A. and Myhra S., *J. Microsc.* **180**, 174–181 (1995).
9. Williams R. C. and Wyckoff R. W. G., *Science* **101** (2632), 594–596 (1945).
10. Shumov I. D., Kanashenko S. L., Archakov A. I., Ivanov Y. D. and Plehsakova T. O., *Applied Physics*, № 4, 10–15 (2017) [in Russian].
11. Van Regenmortel M. H. V. and Muller S. *Laboratory Techniques in Biochemistry and Molecular Biology*. Amsterdam, Elsevier, 1999.
12. Ricci D. and Braga P. C. *Methods in Molecular Biology. Atomic Force Microscopy*. New York, Humana Press, 2003.
13. Shumov I. D., Kanashenko S. L., Ziborov V. S., Ivanov Y. D., Archakov A. I., Enikeev D. V., Potoldyko N. V. and Pleshakova T. O., *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **699**, 012050 (2019).
14. Shumov I. D., Kanashenko S. L., Ziborov V. S., Ivanov Y. D., Archakov A. I. and Pleshakova T. O., *J. Phys.: Conf. Ser.* **789**, 012053 (2017).
15. Swann S., *Phys. Technol.* **19**, 67–75 (1988).
16. Petroff P., Sheng T. T., Sinha A. K., Rozgonyi G. A. and Alexander F. B., *J. Appl. Phys.* **44**, 2545–2554 (1973).
17. Salamon K., Milat O., Radić N., Dubček P., Jerčinović M. and Bernstorff S., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 095304 (2013).
18. Sask K. N., Zhitomirsky I., Berry L. R., Chan A. K. C. and Brash J. L., *Acta Biomaterialia* **6**, 2911–2919 (2010).
19. Thourson S. B., Marsh C. A., Doyle B. J. and Timpe S., *J. Coll. Surf. B: Biointerfaces* **111**, 707–712 (2013).
20. Yamada K., Yoshii S., Kumagai S., Fujiwara I., Nishio K., Okuda M., Matsukawa N. and Yamashita I., *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 4259–4264 (2006).
21. Stelmakh V., Rinnerbauer V., Joannopoulos J. D., Soljačić M., Celanovic I., Senkevich J. J., Tucker C., Ives T. and Shrader R., *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum Surfaces and Films* **31**, 061505 (2013).
22. Yan L. and Woollman J. A., *J. Appl. Phys.* **92**, 4386–4392 (2002).
23. Habteyes T. G., Dhuey S., Wood E., Gargas D., Cabrini S., Schuck P. J., Alivisatos A. P. and Leone S. R., *ACS Nano* **6**, 5702–5709 (2012).
24. Barbosa M. A. and Martins M. C. L. *Peptides and proteins as biomaterials for tissue regeneration and repair*. Duxford-Cambridge-Kidlington, Woodhead Publishing, 2018.
25. Andrade J. D., Hlady V. and Wei A. P., *Pure & Appl. Chem.* **64** (11), 1777–1781 (1992).
26. Smith T., *J. Coll. Interface Sci.* **75** (1), 51–55 (1980).