

УДК 538.956

Оригинальная статья

Спектроскопия наночастиц пористого кремния, импрегнированных лекарственной субстанцией малобена

М.Ш. Сатторов¹, Ю.М. Спивак¹, Ю.М. Коцур², А. Кузнецов³, Е.В. Флисюк²,
В.А. Мошников¹

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический
университет» Министерства здравоохранения РФ
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14 литера А

³ФГАОУ ВУ «Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)»

141700, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9
mansurjon_0700@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.995

Аннотация. Посредством метода электрохимического анодного травления были сформированы пористые слои кремния с последующим получением наночастиц. Исследование характера взаимодействия наночастиц пористого кремния с новой перспективной субстанцией 4,4'-(пропандиамидо)добензоата натрия (малобена) было выполнено с помощью методов инфракрасной и рамановской спектроскопии. Выявлено, что в процессе инкорпорирования между наночастицей и малобеном происходит взаимодействие, при котором снижается степень влияния частиц пористого кремния при совместном рассеянии света, а также становятся более интенсивными колебательные моды молекулы 4,4'-(пропандиамидо)добензоата натрия. Обнаружены характерные полосы поглощения, связанные с образованием химических связей по волновым и рамановским числам, предложена интерпретация полученных результатов с точки зрения формирования готовой субстанции.

Ключевые слова: пористый кремний, наноструктурированный слой, наночастицы, малобен, химические связи, инфракрасная Фурье-спектроскопия, рамановская спектроскопия, растровая-электронная микроскопия.

1. Введение

В последние два десятилетия материалы на основе пористого кремния (PSi) привлекли значительное внимание исследователей в области доставки лекарств и биомедицинских применений. Это связано с их управляемой геометрией, развитой пористой структурой, возможностью точной настройки размера пор, высокой удельной поверхностью, уникальными оптическими и электронными свойствами, разнообразными методами функционализации поверхности и отличной биосовместимостью [1, 2]. Кроме того, PSi обладает большей степенью биоразлагаемости, поскольку связь $Si-Si-H$ более активна и подвержена разрушению, по сравнению с инертной структурой $Si-O-Si$, характерной для мезопористого кремнезема (MSN). PSi способен выделять биоактивные ионы кремния в меньших дозах, что делает его более подходящим для клинического использования. Кроме того, PSi обладает уникальными

© М.Ш. Сатторов, Ю.М. Спивак, Ю.М. Коцур, А. Кузнецов, Е.В. Флисюк, В.А. Мошников, 2024

оптическими свойствами, которые позволяют ему реагировать на цели без необходимости использования дополнительных красителей или люминесцентных молекул, что упрощает создание интегрированных систем для мониторинга и диагностики заболеваний [3]. Системы на основе *PSi* широко используются для доставки лекарств, визуализации и сенсорных применений в тераностике различных заболеваний, таких как рак, диабет, раны, сердечно-сосудистые, заболевания печени, нейродегенеративные заболевания и нарушения [4-6]. В лечении печени *PSi* может выступать в качестве носителя для инкапсуляции лекарств, улучшая их стабильность и биодоступность, а также снижая побочные эффекты [7].

Новая перспективная лекарственная субстанция (ЛС) малобен (4,4'-(пропандиамидо)добензоат натрия) используется для терапии неалкогольной жировой болезни печени и связанных с ней заболеваний [8, 9]. Субстанция представляет собой белый порошок без запаха, который легко растворим в воде, но практически нерастворим в этаноле, ацетонитриле, этилацетате и хлороформе. Температура плавления вещества примерно равна 327°C, а *pH* раствора – 9,9.

Одним из наиболее известных и простых методов получения наноструктурированного *PSi* является электрохимическое анодное растворение [1]. В этом процессе происходит многоступенчатая сложная реакция, которая зависит от физико-технологических параметров травления, действующих на монокристаллическую подложку *Si*. Важнейшими параметрами частиц-носителей для выполнения биомедицинских задач являются характеристики поверхности (её химический состав, особенности энергетических характеристик поверхностных состояний, морфология). Свойства поверхности частиц влияют на характер взаимодействия с другими ЛС при создании на их основе сложных многокомпонентных платформ. Качественный анализ с помощью спектроскопических методик может установить целесообразность дальнейшего использования носителя (загруженной ЛС) в последующих количественных «*in vitro*» и «*in vivo*» экспериментах. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование характера взаимодействия и химического состава частиц *PSi*, инкорпорированных ЛС малобена, методами инфракрасной (ИК) Фурье и рамановской спектроскопии.

2. Методика исследований

В данной работе *PSi* формировали в монокристаллическом кремнии марки КЭФ-4,5(111) методом электрохимического анодного травления [10-12]. В качестве электролита был использован водный раствор плавиковой

кислоты с добавлением изопропанола. Травление осуществлялось при плотности анодного тока 80 мА/см^2 в течение 20 минут. Условия получения пористого кремния были выбраны таким образом, чтобы происходило формирование слоя с большой удельной поверхностью, гидрофильностью, размером и диаметром пор. Посредством ультразвуковой гомогенизации продолжительностью 60 минут формировалась дисперсия с наночастицами *PSi*.

Морфологию поверхности и скол *PSi* анализировали посредством растрового электронного микроскопа (РЭМ; Mira Tescan 3 LMU) для регистрации вторичных и отраженных электронов при ускоряющем напряжении 5-20 кВ.

Лекарственная субстанция малобена была инкорпорирована двумя способами. В первой пробе дисперсия с наночастицами объемом 1 мл смешивалась с водным раствором малобена концентрацией 0,15 гр/мл. Для увеличения загрузки малобена, пробу помещали в ротационный смеситель (Ротамикс) и оставляли на 2 часа. Далее проба центрифугировалась для удаления супернатанта, и после производилась сушка. Во вторую пробу вливали 2 мл дисперсии с частицами и осуществляли сушку. После того, как оставались порошки наночастиц, к ним добавляли порошок лиофилизированного малобена и подвергали механическому смешиванию.

Исследование характера взаимодействия и образования химической связи между наночастицами *PSi* и ЛС малобена проводилось с помощью с ИК-спектрометра (ФСМ 1201) и рамановского спектрометра (Horiba LabRAM HR 800).

3. Морфология поверхности и текстура пористого кремния

Данные РЭМ (см. рис. 1 а, б) свидетельствуют о наличии на поверхности приготовленных образцов *PSi* пор с осью симметрии третьего порядка, обусловленных ориентацией (111) исходной пластины.

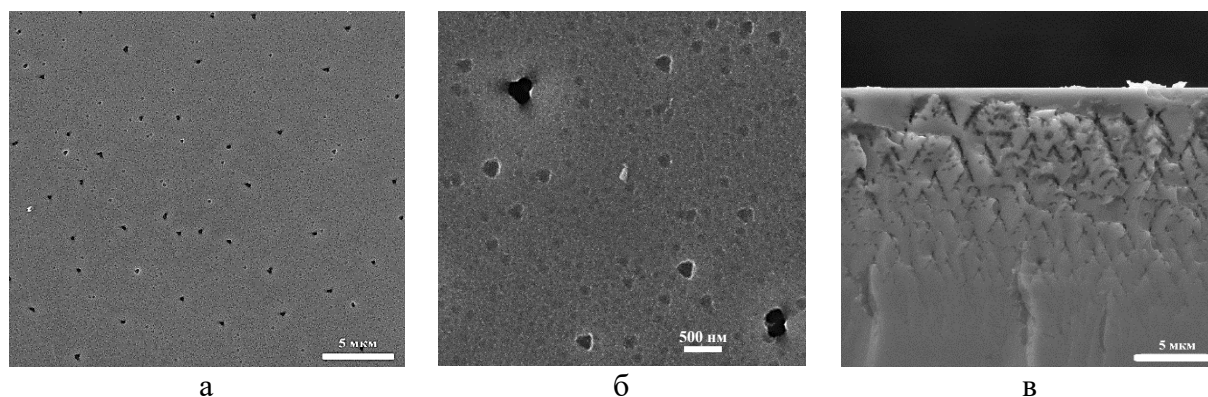


Рис. 1. РЭМ изображение слоя *PSi*: а и б – поверхности при различном увеличении, в – скола.

Также кристаллографическая ориентация влияет на распространение каналов пор (см. рис. 1 в), что приводит к формированию текстуры по типу «елка». По классификации IUPAC для этих слоев характерно наличие мезо- и макропор, таким образом образцы имеют толщину пористого слоя ≈ 20 -25 мкм, а диаметр макропор на поверхности составляет ≈ 40 -250 мкм. При этом, как видно из рис. 1 в, пространство между крупными макропорами заполнено макропорами меньшего размера и мезопорами (30-50, 80-100 и 150-200 нм). В целом поверхность пористого кремния достаточно однородна по всей площади образца. Поскольку поверхность полученных слоев очень развита, то ожидается, что поверхностные функциональные группы будут вносить существенный вклад во взаимодействие с функционализирующим веществом. Поверхностные функциональные группы играют очень важную роль для решения задач связанных с инкорпорированием и высвобождением различных ЛС в тераностике.

4. Результаты исследования инфракрасной Фурье и рамановской спектроскопии образцов

На рис. 3 а, б представлены результаты по измерениям ИК Фурье спектроскопии.

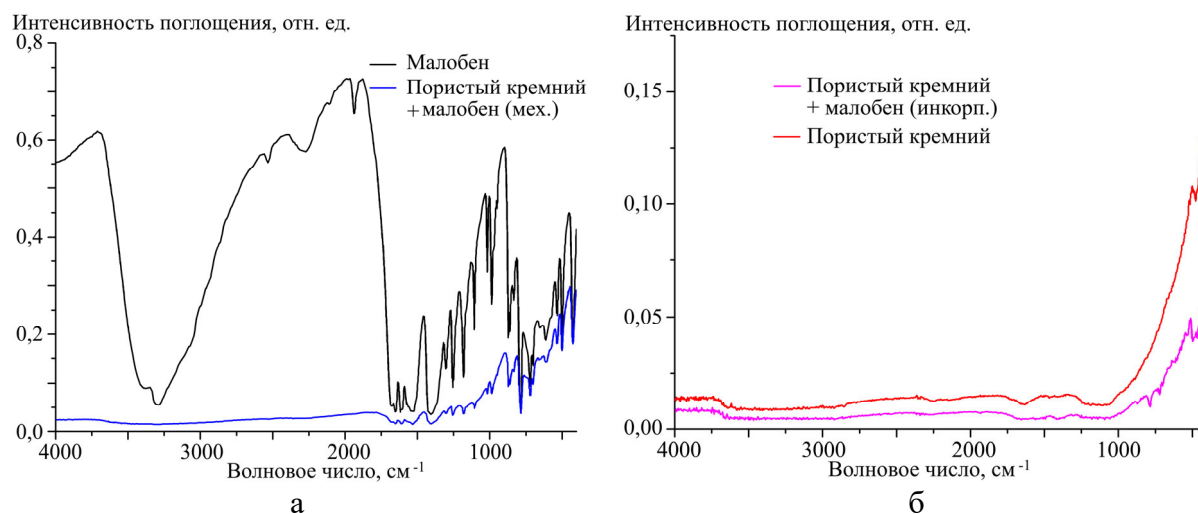


Рис. 2. ИК-спектры образцов *PSi* и малобена: а – малобена и механической смеси малобена с *PSi*, б – малобена инкорпорированного в *PSi* и *PSi*.

Проведя анализ ИК-спектра лиофилизированной субстанции, были выявлены характерные полосы поглощения. Полоса с частотой 3500 см^{-1} имела низкие параметры интенсивности и ширины, что доказало присутствие водородных связей в соединении. Помимо этого, было подтверждено наличие ароматической карбоновой кислоты как на уровне 3500 см^{-1} , так и на более высокой частоте с диапазоном $(1670\text{-}1680)\text{ см}^{-1}$.

Рассматривая частоты 1600 и 1620 см^{-1} , было выявлено наличие амида предельной малоновой кислоты, поскольку в соединении присутствовали валентные колебания $\nu(N-C=O)$ и $\delta(N-H)$. К тому же, данный амид подходит под категорию вторичного, поскольку наблюдалось смещение полосы $\nu(N-C=O)$ на отрезке частоты 1600 см^{-1} .

Также на спектре наблюдались полосы характерные для процесса замещения в бензойной кислоте. Данная реакция была свойственна для полос поглощения со значениями 2900 и 2950 см^{-1} . В то время как на полосах при 700, 650 и 500 см^{-1} имела место реакция пара-замещения бензольного кольца бензойной кислоты. Помимо вышеперечисленного, были обнаружены деформационные колебания бензойной кислоты при частотах 1300 и 1250 см^{-1} .

К тому же, было выявлено наличие структуры бензольного кольца при помощи характерных для $\nu(C=C)$ ароматического кольца полос поглощения на уровнях 1550, 1420 и 1380 см^{-1} ; а также при помощи характерных для $\nu(C-H)$ бензольного кольца и обертонов $\delta(C=C-H)$ полос с частотой 800 см^{-1} .

Анализируя ИК-спектр PSi , были обнаружены полосы деформационного колебания SiH_x - групп на частотах с диапазоном (600-700 см^{-1}). В дополнение к этому, была зафиксирована полоса поглощения монокристаллов кремния на уровне (610 см^{-1}) [13]. Также было выявлено, что механическое смешение PSi с лиофилизированным 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоатом натрия существенно снижает интенсивность полос поглощения второго.

Кроме того, было выдвинуто предположение о нахождении вещества внутри PSi , основанное на отсутствии полос поглощения, характерных для инкорпорированного 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоата натрия.

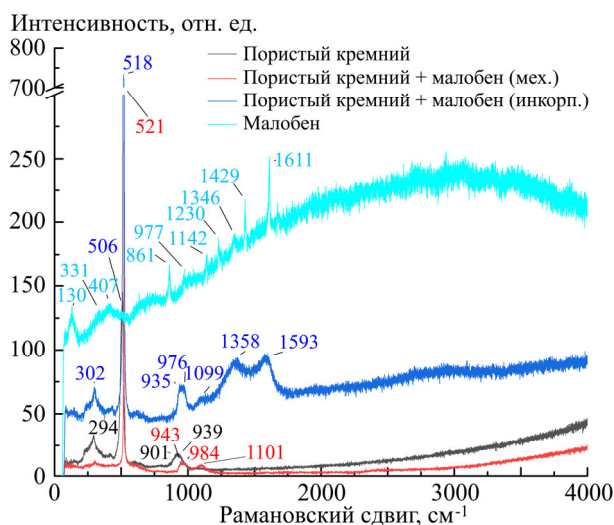


Рис. 4. Рамановские спектры образцов.

Результаты рамановской спектроскопии образцов частиц PSi до и после инкорпорирования малобеном двумя способами представлены на рис. 4. Рассмотрев рамановские спектры образцов, содержащих PSi , было замечено, что в них присутствуют характерные полосы поглощения в диапазоне $500-550\text{ см}^{-1}$. Другие образцы, содержащие лиофилизированный малобен, имели более широкий перечень полос поглощения, а именно $130, 340, 861, 977, 1142, 1230, 1346, 1429, 1611\text{ см}^{-1}$. Тем не менее, в механических смесях ЛС и наночастиц не наблюдалось перечисленных выше полос поглощения. Только в инкорпорированном ЛС присутствовали некоторые полосы поглощения, которые, тем не менее, имели изменившиеся характеристики интенсивности и частоты поглощения.

5. Заключение

В работе получены частицы PSi , функционализированные малобеном двумя способами: инкорпорированием в водном растворе и механическим смешением. Посредством инфракрасной и рамановской спектроскопии, были проанализированы наночастицы PSi , лиофилизированный 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоат натрия, механическая смесь компонентов, а также инкорпорированный в PSi , 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоат натрия и получены следующие выводы. В случае инкорпорирования возникало взаимодействие наночастиц с субстанцией, которое имело два разных вектора. Во-первых, колебательные моды молекулы 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоата натрия усиливались. Во-вторых, влияние частиц PSi при совместном рассеянии света значительно снижалось. В случае механической смеси, влияние частиц PSi полностью сглаживало рассеяние света молекулой ЛС. После проведения комплексного анализа, было выдвинуто предположение о том, что описанное взаимодействие наночастиц с субстанцией может происходить как на поверхности PSi , так и внутри него.

Исследования выполнены при поддержке «Программы развития СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» № 075-15-2021-1318 от 29 сентября 2021 года (научно-исследовательская работа НП/ПОПР-12 «Разработка multifункциональных наночастиц медицинского применения на основе пористого кремния и тераностической пары флуорофор-кардиопротектор»).

Библиографический список:

1. Мошников, В.А. Пористый кремний и его применение в биомедицине / В.А. Мошников, Ю.М. Спивак, А.С. Леньшин // В монографии: Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине / В.А. Мошников, Ю.М. Спивак, А.С. Леньшин; под общ. ред. В.Я. Шевченко, О.И. Киселева, В.Н. Соколова. – СПб: Химиздат, 2015. – Глава 4. – С. 70-116.
2. Spivak, Yu.M. Potential antiviral drug for the treatment of SARS-CoV-2 based on quinacrine and porous silicon /

- Yu. M. Spivak, D.V. Korolev, M.Sh. Sattorov et al. // *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*. – 2022. – V. 42. – I. 2. – P. 33513-33517. DOI: 10.26717/BJSTR.2022.42.006735.
3. Tieu, T. Advances in porous silicon-based nanomaterials for diagnostic and therapeutic applications. / T. Tieu, M. Alba, R. Elnathan et al. // *Advanced Therapeutics*. – 2018. – V. 2. – I. 1. – Art. № 1800095. – 25 p. DOI: 10.1002/adtp.201800095.
4. Martins, J.P. Engineered multifunctional albumin-decorated porous silicon nanoparticles for FcRn translocation of insulin / J.P. Martins, R. D'Auria, D. Liu et al. // *Small*. – 2018. – V. 14. – I. 27. – Art. № 1800462. – 11 p. DOI: 10.1002/smll.201800462.
5. Spivak, Y.M. Porous nanocarriers for targeted drug delivery and theranostics / Y.M. Spivak, D.V. Korolev, V.A. Moshnikov // In book: *Smart micro- and nanomaterials for drug delivery and pharmaceutical applications*; ed. by A. Behera, A.K. Nayak, R.K. Mohapatra, A.A. Rabaan. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – Chapter 18. – P. 343-372. DOI: 10.1201/9781003468424-18.
6. Журавский, С.Г. Характер гранулёмообразования в печени крыс как отражение механизма интернализации субмикронных частиц пористого кремния / С.Г. Журавский, Г.Ю. Юкина, Е.Г. Сухорукова и др. // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. – 2023. – Т. 176. – № 9. – С. 386-390. DOI: 10.47056/0365-9615-2023-176-9-386-390.
7. Xu, T. Hierarchical mesoporous silicon and albumin composite microparticles delivering DOX and FU for liver cancer treatment / T. Xu, L. Fan, L. Wang et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – V. 268. – Part. 1. – Art. № 131732. – 10 p. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131732.
8. Белых, М.А. Влияние 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоата натрия на проявления экспериментального неалкогольного стеатогепатита / М.А. Белых // *Биомедицина*. – 2021. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 95-99. DOI: 10.33647/2074-5982-17-3-95-99.
9. Флисюк, Е.В. Разработка методики проведения теста «Растворение» для таблеток 4,4'-(пропандиамидо)дibenзоата натрия с пролонгированным высвобождением / Е.В. Флисюк, Ю.М. Коцур, И.А. Наркевич и др. // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. – 2021. – Т. 54. – № 10. – С. 146-154. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4(1)-146-154.
10. Спивак, Ю.М. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху / Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин и др. // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 88. – Вып. 9. – С. 1394-1403. DOI: 10.21883/JTF.2018.09.46427.57-18
11. Сатторов М. Особенности адсорбции органических молекул в пористом кремнии по данным ИК-спектроскопии / М. Сатторов, К. Беспалова, М.Ф. Панов, Ю.М. Спивак // *Сборник докладов VII научно-практической конференции с международным участием для студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука настоящего и будущего»*, 16-18 мая, 2019, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. – Т. 3. – С. 128-131.
12. Sattorov, M.Sh. The effect of anodization current density on the functionalization of porous silicon nanoparticles with an antibiotic / M.Sh. Sattorov, Yu.M. Spivak, N.O. Gavazyuk, M.F. Panov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1697. – Art. № 012122. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012122.
13. Pradhan, M.M., Multiphonon infrared absorption in silicon / M.M. Pradhan, R.K. Garg, M. Arora // *Infrared Physics*. – 1987. – V. 27. – I. 1. – P. 25-30. DOI: 10.1016/0020-0891(87)90046-7.

References:

1. Moshnikov V.A., Spivak YU.M., Len'shin A.S. Poristy kremnii i ego primeneniye v biomeditsine [Porous silicon and its application in biomedicine], *Issledovanie, tekhnologiya i ispol'zovanie nanoporistykh nositelei lekarstv v meditsine* [Research, technology and use of nanoporous drug carriers in medicine], ed. V.Ya. Shevchenko, O.I. Kiseleva, V.N. Sokolova. Saint-Petersburg, Khimizdat Publ., 2015, pp. 70-116. (In Russian).
2. Spivak Yu.M., Korolev D.V., Sattorov M.Sh. et al. Potential antiviral drug for the treatment of SARS-CoV-2 based on quinacrine and porous silicon, *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 2022, vol. 42, issue 2, pp. 33513-33517. DOI: 10.26717/BJSTR.2022.42.006735.
3. Tiu T., Al'ba M., Ehlntan R. et al. Advances in porous silicon-based nanomaterials for diagnostic and therapeutic applications, *Advanced Therapeutics*, 2018, vol. 2, no. 1, art. no. 1800095, 25 p. DOI: 10.1002/adtp.201800095.
4. Martins YA.P., D'Oria R., Lyu D. Engineered multifunctional albumin-decorated porous silicon nanoparticles for fern translocation of insulin, *Small*, 2018, vol. 14, issue 27, art. no. 1800462, 11 p. DOI: 10.1002/smll.201800462.
5. Spivak Yu.M., Korolev D.V., Moshnikov V.A. Porous nanocarriers for targeted drug delivery and theranostics, *Smart Micro- and Nanomaterials for Drug Delivery*, ed. by A. Bekhera, A.K. Nayak, R.K. Mokhapatra, A.A. Rabaan. Boca Raton, CRC Press, 2024, pp. 343-372. DOI: 10.1201/9781003468424-18.

6. Zhuravskii S.G., Yukina G.YU., Sukhorukova E.G. et al. Kharakter granulyomobrazovaniya v pecheni krys kak otrazhenie mekhanizma internalizatsii submikronnykh chastits poristogo kremniya [The character of granuloma formation in the liver of rats as a reflection of the mechanism of internalization of submicron silicon particles], *Byulleten' eksperimental'noj biologii i meditsiny* [Bulletin of Experimental Biology and Medicine], 2023, vol. 176, no. 9, pp. 386-390. (In Russian).
7. Xu T., Fan L., Wang L. et al. Hierarchical mesoporous silicon and albumin composite microparticles delivering DOX and FU for liver cancer treatment, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 268, part 1, art. no. 131732, 10 p. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131732.
8. Belykh M.A. Vliyanie 4,4'-(propandiamido)dibenzoata natriya na proyavleniya eksperimental'nogo nealkogol'nogo steatogepatita [Impact of 4,4'-(propanediamide)dibenzoate sodium on manifestations of experimental non-alcoholic steatohepatitis], *Biomeditsina* [Biomedicine], 2021, vol. 17, no. 3, pp. 95-99. DOI: 10.33647/2074-5982-17-3-95-99. (In Russian).
9. Flisyuk E.V., Kotsur Yu.M., Narkevich I.A. et al. Razrabotka metodiki provedeniya testa «Rastvorenii» dlya tabletok 4,4'-(propandiamido)dibenzoata natriya s prolongirovannym vysvobozhdeniem [Development of the «dissolution» test method for tablets of sodium 4,4'-(propanediamide)dibenzoate with sustained release], *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv* [Drug development & registration], 2021, vol. S4, no. 10, pp. 146-154. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4(1)-146-154. (In Russian).
10. Spivak Yu.M., Belorus A.O., Panevin A.A. et al. Porous silicon as a nanomaterial for disperse transport systems of targeted drug delivery to the inner ear, *Technical Physics*, 2018, vol. 63, issue 9, pp. 1352-1360. DOI: 10.1134/S1063784218090207.
11. Sattorov M.Sh., Bespalova K., Panov M.F., Spivak Yu.M. Osobennosti adsorbtsii organicheskikh molekul v poristom kremnii po dannym IK-spektroskopii [Features of adsorption of organic molecules in porous silicon according to IR spectroscopy data], *Sbornik materialov VII Nauchno-practicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Nauka nastoyashchego i budushchego» dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proceedings of VII Scientific and Practical Conference with international participation «Science of the present and the future» for students, postgraduates and young scientists, Saint-Petersburg, May, 16-18, 2019. Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» Publ., 2019, vol. 3. pp. 128-131. (In Russian).
12. Sattorov M.Sh., Spivak Yu.M., Gavazyuk N.O., Panov M.F. The effect of anodization current density on the functionalization of porous silicon nanoparticles with an antibiotic, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, art. no. 012122, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012122.
13. Pradkhan M.M., Garg R.K., Arora M. Multiphoton infrared absorption in silicon, *Infrared Physics*, 1987, vol. 27, issue 1, pp. 25-30. DOI: 10.1016/0020-0891(87)90046-7.

Original paper

Spectroscopy of porous silicon nanoparticles impregnated with a drug maloben substance

M.Sh. Sattorov¹, Yu.M. Spivak¹, Yu.M. Kotsur², A. Kuznetsov³, E.V. Flisyuk², V.A. Moshnikov¹

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Saint Petersburg, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.995

Abstract: Using electrochemical anodic etching, porous silicon layers were formed with subsequent production of nanoparticles. The study of the nature of interaction of porous silicon nanoparticles with a new promising 4,4'-(propanediamido) sodium dibenzoate (malobene) substance was performed using infrared and Raman spectroscopy. It was revealed that during the incorporation process, an interaction occurs between the nanoparticle and maloben, during which the degree of influence of porous Si particles during joint scattering of light decreases, and the vibrational modes of the sodium 4,4'-(propanediamido) dibenzoate molecule become more intense. Characteristic absorption bands associated with the formation of chemical bonds by wave and Raman numbers were detected, and an interpretation of the obtained results from the point of view of the formation of the finished substance was proposed.

Keywords: *porous silicon, nanostructured layer, nanoparticles, maloben, chemical bonds, infrared Fourier spectroscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy.*

Сатторов Мансурджон Шухратович – аспирант 4-го года обучения кафедры микро- и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Спивак Юлия Михайловна – д.т.н., профессор кафедры микро- и наноэлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Коцур Юлия Михайловна – к.фарм.н., старший научный сотрудник GMP тренинг-центра, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет»

Кузнецов Алексей – младший научный сотрудник, ФГАОУ ВУ «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Флисюк Елена Владимировна – д.фарм.н., профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой технологии лекарственных форм, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет»

Мошников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и наноэлектроники, ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Mansurjon Sh. Sattorov – 4th year postgraduate student, Department of Micro- and Nanoelectronics, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Yulia M. Spivak – Dr. Sc., Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Yulia M. Kotcur – Ph. D., Senior Researcher, GMP training center, St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University

Alexey Kuznetsov – Junior Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Elena V. Flisyuk – Dr. Sc., Professor, Department of Technology of Dosage Forms, St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Поступила в редакцию/received: 01.09.2024; после рецензирования/revised: 10.10.2024; принята/accepted 15.10.2024.