

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ДИДЕЦИЛДИМЕТИЛАММОНИЯ ХЛОРИДОМ

А.В. Блинов, А.А. Блинова, З.А. Рехман, А.А. Гвозденко,
А.Б. Голик, М.А. Колодкин, Я.А. Облогин

Андрей Владимирович Блинов (ORCID 0000-0002-4701-8633), Анастасия Александровна Блинова (ORCID 0000-0001-9321-550X), Зафар Абдулович Рехман (ORCID 0000-0003-2809-4945), Алексей Алексеевич Гвозденко (ORCID 0000-0001-7763-5520)*, Алексей Борисович Голик (ORCID 0000-0003-2580-9474), Максим Андреевич Колодкин (ORCID 0009-0004-2045-4787), Ярослав Александрович Облогин (ORCID 0009-0003-5180-9045)

Кафедра физики и технологии наноструктур и материалов, Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, 1, Ставрополь, Российская Федерация, 355017

E-mail: blinov.a@mail.ru, nastya_bogdanova_88@mail.ru, zafrehman1027@gmail.com,

gvozdenko.1999a@gmail.com*, lexgooldman@gmail.com, koliduk@yandex.ru, jaroslav.oblogin@yandex.ru

В рамках данной работы разработана методика синтеза и проведена характеристика наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ). Наночастицы получали методом химического восстановления в водной среде. В качестве селеносодержащего прекурсора выступала селенистая кислота, в качестве восстановителя – аскорбиновая кислота, в качестве стабилизатора – дидецилдиметиламмония хлорид. Для определения оптимальных параметров синтеза наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом, проводили многофакторный эксперимент. В качестве входных параметров выступали концентрация селенистой кислоты, концентрация дидецилдиметиламмония хлорида (ДДАХ) и концентрация аскорбиновой кислоты. В качестве выходного параметра рассматривали средний гидродинамический радиус частиц селена, который определяли методом динамического рассеяния света. Установлены оптимальные параметры синтеза наночастиц селена ($R =$ от 15 до 25 нм): концентрация восстановителя – от 1,076 моль/л до 2,118 моль/л, концентрация стабилизатора – от 0,006 моль/л до 0,085 моль/л, концентрация прекурсора – от 0,004 моль/л до 0,236 моль/л. На следующем этапе исследований определяли влияние pH раствора на средний гидродинамический радиус наночастиц селена. Показано, что в диапазоне pH от 1,81 до 2,21 средний гидродинамический радиус наночастиц селена значительно не изменяется, что свидетельствует об агрегативной устойчивости наночастиц селена в данном диапазоне. В диапазоне pH от 2,21 до 4,56 происходит резкое увеличение среднего гидродинамического радиуса с 21 до 497 нм. При pH > 7,96 происходит коагуляция частиц селена.

Ключевые слова: наночастицы селена, динамическое рассеяние света, pH, агрегативная устойчивость, поверхностно-активные вещества

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF SELENIUM NANOPARTICLES STABILIZED WITH DIDECYLDIMETHYLAMMONIUM CHLORIDE

A.V. Blinov, A.A. Blinova, Z.A. Rekhman, A.A. Gvozdenko, A.B. Golik, M.A., Kolodkin Ya.A. Oblogin

Andrey V. Blinov (ORCID 0000-0002-4701-8633), Anastasiya A. Blinova (ORCID 0000-0001-9321-550X), Zafar A. Rekhman (ORCID 0000-0003-2809-4945), Alexey A. Gvozdenko (ORCID 0000-0001-7763-5520)*, Alexey B. Golik (ORCID 0000-0003-2580-9474), Maxim A. Kolodkin (ORCID 0009-0004-2045-4787), Yaroslav A. Oblogin (ORCID 0009-0003-5180-9045)

Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North Caucasus Federal University, Pushkina st., 1, Stavropol, 355017, Russia

E-mail: blinov.a@mail.ru, nastya_bogdanova_88@mail.ru, zafrehman1027@gmail.com,

gvozdenko.1999a@gmail.com*, lexgooldman@gmail.com, koliduk@yandex.ru, jaroslav.oblogin@yandex.ru

As part of this work, a synthesis procedure was developed and the characteristic of selenium nanoparticles stabilized with didecyldimethylammonium chloride (DDAC) was carried out. Nanoparticles were obtained by chemical reduction in an aqueous medium. Selenous acid was used as a selenium-containing precursor, ascorbic acid was used as a reducing agent, and didecyldimethylammonium chloride was used as a stabilizer. To determine the optimal parameters for the synthesis of selenium nanoparticles stabilized with didecyldimethylammonium chloride, a multifactorial experiment was carried out. The input parameters were the concentration of selenous acid, the concentration of didecyldimethylammonium chloride (DDAC) and the concentration of ascorbic acid. The average hydrodynamic radius of selenium particles, which was determined by the method of dynamic light scattering, was considered as an output parameter. The optimal parameters for the synthesis of selenium nanoparticles (R from 15 to 25 nm) have been established: reducing agent concentration – from 1.076 mol/l to 2.118 mol/l, stabilizer concentration – from 0.006 mol/l to 0.085 mol/l, precursor concentration – from 0.004 mol/l to 0.236 mol/l. At the next stage of research, the effect of solution pH on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles was determined. It was shown that in the pH range from 1.81 to 2.21, the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles does not change significantly, which indicates the aggregative stability of selenium nanoparticles in this range. In the pH range from 2.21 to 4.56, there is a sharp increase in the average hydrodynamic radius from 21 to 497 nm. At pH > 7.96, coagulation of selenium particles is observed.

Key words: selenium nanoparticles, dynamic light scattering, pH, aggregative stability, surfactants

Для цитирования:

Блинов А.В., Блинова А.А., Рехман З.А., Гвозденко А.А., Голик А.Б., Колодкин М.А., Облогин Я.А. Синтез и характеристика наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 4. С. 46–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6938.

For citation:

Blinov A.V., Blinova A.A., Rekhman Z.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Kolodkin M.A., Oblogin Ya.A. Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with didecyldimethylammonium chloride. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 4. P. 46–52. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6938.

ВВЕДЕНИЕ

Селен является важным микроэлементом для людей, растений и животных, который необходим для биосинтеза селенопротеинов [1, 2]. В наноразмерном состоянии селен обладает высокой биологической доступностью и активностью, а также низкой токсичностью [3, 4]. Наночастицы селена участвуют во многих физиологических процессах, таких как рост, размножение и иммуномодуляция [5]. Наночастицы селена нашли широкое применение в различных областях науки и техники, в частности, в фармацевтической и медицинской отрасли в системах доставки лекарств, в качестве антиоксиданта, пищевой добавки, противомикробного, противоопухолевого, противодиабетического средства [6-11].

При химическом восстановлении селена его частицы имеют тенденцию агрегироваться в объемные кластеры, что приводит к снижению биологической активности и доступности [12]. Решением данной проблемы является введение в систему различных стабилизаторов (полимеров, поверхностно-активных веществ (ПАВ)) [13-17].

Большое количество исследований посвящено использованию различных типов ПАВ в качестве стабилизаторов для контроля размера и морфологии наночастиц селена [18-21]. Поверхностно-активные вещества подразделяются на несколько типов: анионактивные, катионактивные, неионогенные и амфотерные [22-24]. Катионактивные поверхностно-активные вещества обладают выраженным антимикробным действием в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий [25]. Использование катионактивных поверхностно-активных веществ в качестве стабилизатора наночастиц селена позволяет не только предотвратить агрегацию и коагуляцию наночастиц, но и придать системе антимикробные свойства [26-28].

Таким образом, целью данной статьи является синтез и характеристика наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления в водной среде.

В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту («ч.д.а.», ИНТЕРХИМ, г. Санкт-Петербург), в качестве стабилизатора – дидецилдиметиламмония хлорид (ДДАХ) (Вита-Реактив, г. Дзержинск), а в качестве восстановителя – аскорбиновую кислоту («ч.д.а.», ЛенРеактив, г. Санкт-Петербург).

Синтез образцов наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ), проводили следующим образом: готовили растворы с различным соотношением дидецилдиметиламмония хлорида (ДДАХ) и селенистой кислоты. Для этого в 100 см³ 0,036 М раствора селенистой кислоты растворяли от 0,68 г до 5,24 г дидецилдиметиламмония хлорида в зависимости от заданного соотношения. Далее готовили 0,088 М раствор аскорбиновой кислоты: растворяли 773,8 мг аскорбиновой кислоты в 50 см³ дистиллированной воды. Далее в раствор селенистой кислоты и стабилизатора при интенсивном перемешивании по каплям добавляли раствор аскорбиновой кислоты и перемешивали полученный образец в течение 5-10 мин.

Определение среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена проводили методом динамического рассеяния света (DLS) на приборе *Photocor-Complex* (ООО «Антек-97», Российская Федерация). Компьютерную обработку полученных результатов осуществляли с использованием программного обеспечения *DynaLS*. Для исследований образцы наночастиц селена разбавляли в 2 раза дистиллированной водой.

Исследование электрокинетического потенциала проводили методом акустической и электроакустической спектроскопии на установке *DT-1202* (*Dispersion Technology Inc.*, США).

Для оптимизации методики синтеза проводили многофакторный эксперимент с тремя входными параметрами и тремя уровнями варьирования [29]. В качестве входных параметров выступали концентрация селенистой кислоты, концентрация дидецилдиметиламмония хлорида (ДДАХ), концентрация аскорбиновой кислоты, а в качестве выходного параметра – средний гидродинамический радиус частиц (*R*).

Для исследования влияния pH среды на агрегативную устойчивость наночастиц селена в образцы добавляли растворы с различным значением pH среды в объемном соотношении 1:1 [30]. В рамках эксперимента использовались буферы Бриттона-Робинсона с значением pH от 1,81 до 11,98 [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований проводили оптимизацию методики синтеза наночастиц се-

лена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ). В таблице представлена матрица планирования эксперимента и результаты исследования среднего гидродинамического радиуса (*R*) образцов наночастиц селена.

Таблица

Матрица планирования эксперимента и результаты исследования образцов

Table. Experiment design matrix and results of samples study

| № опыта | <i>C</i> (H ₂ SeO ₃), (моль/л) | <i>C</i> (ДДАХ), (моль/л) | <i>C</i> (аскорбиновая кислота) (моль/л) | <i>R</i> , нм |
|---------|---|---------------------------|--|---------------|
| 1 | 0,0037 | 0,006 | 0,033 | 19 |
| 2 | 0,0037 | 0,044 | 0,26 | 27 |
| 3 | 0,0037 | 0,355 | 2,12 | 36 |
| 4 | 0,029 | 0,006 | 0,26 | 15 |
| 5 | 0,029 | 0,044 | 2,12 | 19 |
| 6 | 0,029 | 0,355 | 0,033 | 56 |
| 7 | 0,236 | 0,006 | 2,12 | 32 |
| 8 | 0,236 | 0,044 | 0,033 | 11 |
| 9 | 0,236 | 0,355 | 0,26 | 53 |

Анализ полученных данных показал, что все образцы имеют мономодальное распределение по размерам. Наименьшим средним гидродинамическим радиусом обладает образец № 8 (рис. 1).

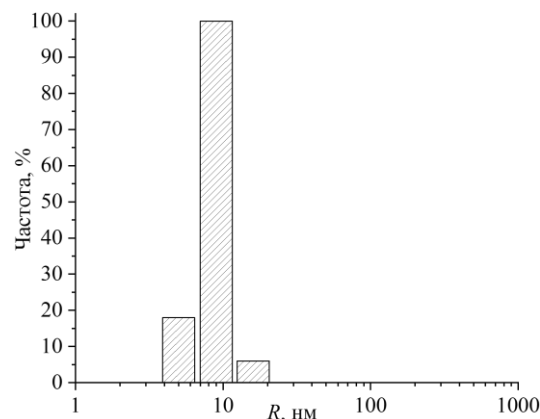


Рис. 1. Гистограмма распределения гидродинамического радиуса частиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом

Fig. 1. Histogram of the distribution of the hydrodynamic radius of selenium particles stabilized by didecyldimethylammonium chloride

В результате многофакторного эксперимента по определению оптимальных параметров синтеза наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ), строили тернарную поверхность, представленную на рис. 2.

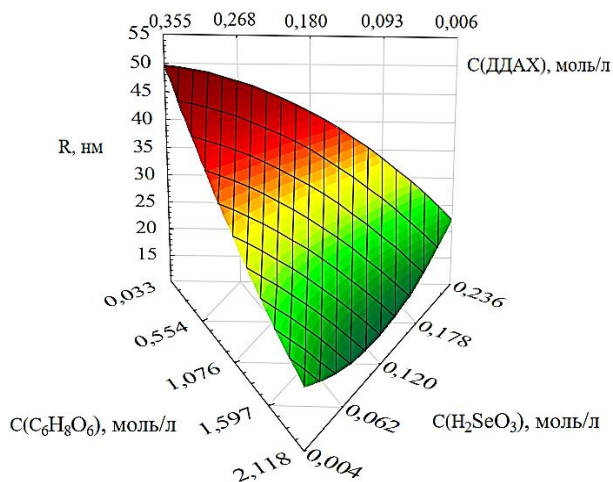


Рис. 2. Тернарная поверхность, описывающая связь со средним гидродинамическим радиусом наночастиц селена
 Fig. 2. Ternary surface describing the relationship with the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles

Анализ полученной тернарной поверхности показал, что входные параметры значительно влияют на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом. Так, при концентрации восстановителя от 0,033 моль/л до 0,7 моль/л, стабилизатора – от 0,09 моль/л до 0,355 моль/л и прекурсора около 0,12 моль/л, образцы наночастиц селена обладают наибольшими размерами. Наименьшими размерами (от 15 до 25 нм) обладают золи наночастиц селена, полученные при следующих параметрах: концентрация восстановителя – от 1,076 моль/л до 2,118 моль/л, концентрация стабилизатора – от 0,006 моль/л до 0,085 моль/л и концентрация прекурсора – от 0,004 моль/л до 0,236 моль/л.

На следующем этапе проводили исследование влияния pH среды на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ). Синтез наночастиц селена проводили при оптимальных параметрах, установленных ранее. Результаты исследования и фотографии полученных образцов представлены на рис. 3 и 4.

Анализ полученных данных показал, что изменение pH среды значительно влияет на размер наночастиц селена. В диапазоне pH от 1,81 до 2,21 средний гидродинамический радиус частиц значительно не изменяется. В диапазоне от 2,21 до 4,56 происходит резкое увеличение среднего гидродинамического радиуса. Наибольшее значение радиуса наблюдается при $pH = 4,56$ и соответствует около 497 нм. При переходе в щелочную область происходит плавное уменьшение размера. Примечательно, что изменение радиуса частиц после

$pH = 7,96$ сопровождается изменением цвета образцов, а также их коагуляцией. Стоит отметить, что при смещении pH в щелочную область происходит переход аллотропной модификации селена с аморфной модификации в тригональную модификацию [32, 33].

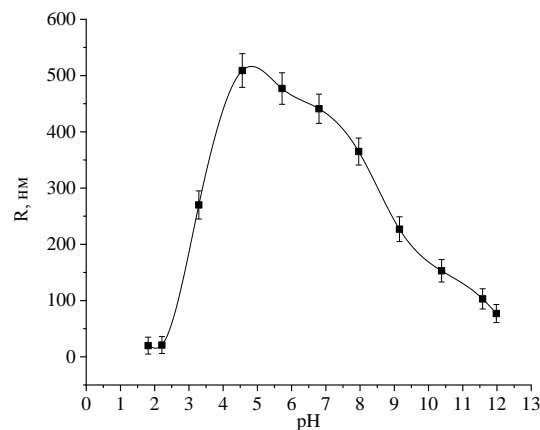


Рис. 3. График зависимости среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ), от pH раствора
 Fig. 3. Graph of the dependence of the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles stabilized by didecyl dimethylammonium chloride (DDAC) on the pH of the solution

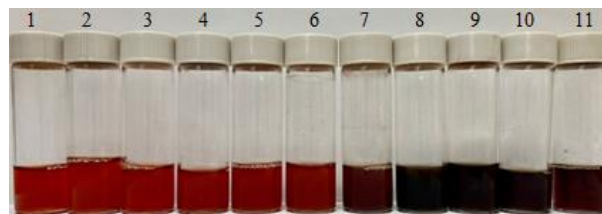


Рис. 4. Фотографии образцов наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ): 1 – 1,81, 2 – 2,21, 3 – 3,29, 4 – 4,56, 5 – 5,72, 6 – 6,8, 7 – 7,96, 8 – 9,15, 9 – 10,38, 10 – 11,58, 11 – 11,98

Fig. 4. Photographs of samples of selenium nanoparticles stabilized by didecyl dimethylammonium chloride (DDAC): 1 – 1.81, 2 – 2.21, 3 – 3.29, 4 – 4.56, 5 – 5.72, 6 – 6.8, 7 – 7.96, 8 – 9.15, 9 – 10.38, 10 – 11.58, 11 – 11.98

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы разработана методика синтеза и проведена характеристика наночастиц селена, стабилизированных дидецилдиметиламмония хлоридом (ДДАХ). Установлены оптимальные параметры синтеза наночастиц селена ($R =$ от 15 до 25 нм): концентрация восстановителя – от 1,076 моль/л до 2,118 моль/л, концентрация стабилизатора – от 0,006 моль/л до 0,085 моль/л, концентрация прекурсора – от 0,004 моль/л до 0,236 моль/л. Показано, что в диапазоне pH от 1,81 до 2,21 средний гидродинамический радиус нано-

частиц селена значительно не изменяется, что свидетельствует об агрегативной устойчивости наночастиц селена в данном диапазоне. В диапазоне рН от 2,21 до 4,56 происходит резкое увеличение среднего гидродинамического радиуса с 21 до 497 нм. При рН > 7,96 происходит коагуляция частиц селена.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00120, <https://rscf.ru/project/23-16-00120/>.

Исследование выполнено на оборудовании Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный

идентификатор проекта РФ – 2296.61321X0029 (договор № 075-15-2021- 687).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 23-16-00120, <https://rscf.ru/project/23-16-00120/>.

The study was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the North Caucasus Federal University with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, a unique identifier of the RF project - 2296.61321X0029 (contract № 075-15-2021-687).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A.** Selenium nanoparticles for biomedical applications: From development and characterization to therapeutics. *Adv. Healthcare Mater.* 2021. V. 10. N 16. P. 2100598. DOI: 10.1002/adhm.202100598.
2. **Kumar A., Prasad K.S.** Role of nano-selenium in health and environment. *J. Biotechnol.* 2021. V. 325. P. 152-163. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.11.004.
3. **Xu C., Qiao L., Guo Y., Ma L., Cheng Y.** Preparation, characteristics and antioxidant activity of polysaccharides and proteins-capped selenium nanoparticles synthesized by *Lactobacillus casei* ATCC 393. *Carbohydr. Polym.* 2018. V. 195. P. 576-585. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.110.
4. **Yan J.K., Qiu W.Y., Wang Y.Y., Wang W.H., Yang Y., Zhang H.N.** Fabrication and stabilization of biocompatible selenium nanoparticles by carboxylic curdlans with various molecular properties. *Carbohydr. Polym.* 2018. V. 179. P. 19-27. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.09.063.
5. **Bhattacharjee A., Basu A., Bhattacharya S.** Selenium nanoparticles are less toxic than inorganic and organic selenium to mice in vivo. *Nucleus.* 2019. V. 62. P. 259-268. DOI: 10.1007/s13237-019-00303-1.
6. **Hosnedlova B., Kepinska M., Skalickova S., Fernandez C., Ruttkay-Nedecky B., Peng Q., Baron M., Melcova M., Opatrilova R., Zidkova J., Bjørklund G., Sochor J., Kizek R.** Nano-selenium and its nanomedicine applications: a critical review. *Int. J. Nanomed.* 2018. P. 2107-2128. DOI: 10.2147/IJN.S157541.
7. **Dawood M.A.O., Basuini M.F.E., Yilmaz S., Abdel-Latif H.M.R., Kari Z.A., Abdul Razab M.K.A., Ahmed H.A., Alagawany M., Gewaily M.S.** Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: a review. *Antioxidants.* 2021. V. 10. N 9. P. 1364. DOI: 10.3390/antiox10091364.
8. **Garza-García J. J. O., Hernández-Díaz J. A., Zamudio-Ojeda A., León-Morales J. M., Guerrero-Guzmán A., Sánchez-Chiprés D. R., López-Velázquez J. C. García-Morales S.** The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology. *Biolog. Trace Element Res.* 2021. P. 1-21. DOI: 10.1007/s12011-021-02847-3.
9. **Geoffrion L.D., Hesabizadeh T., Medina-Cruz D., Kuspfer M., Taylor P., Vernet-Crua A., Chen J., Ajo A., Webster T.J., Guisbiers G.** Naked selenium nanoparticles for antibacterial and anticancer treatments. *ACS omega.* 2020. V. 5. N 6. P. 2660-2669. DOI: 10.1021/acsomega.9b03172.

REFERENCES

1. **Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A.** Selenium nanoparticles for biomedical applications: From development and characterization to therapeutics. *Adv. Healthcare Mater.* 2021. V. 10. N 16. P. 2100598. DOI: 10.1002/adhm.202100598.
2. **Kumar A., Prasad K.S.** Role of nano-selenium in health and environment. *J. Biotechnol.* 2021. V. 325. P. 152-163. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.11.004.
3. **Xu C., Qiao L., Guo Y., Ma L., Cheng Y.** Preparation, characteristics and antioxidant activity of polysaccharides and proteins-capped selenium nanoparticles synthesized by *Lactobacillus casei* ATCC 393. *Carbohydr. Polym.* 2018. V. 195. P. 576-585. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.110.
4. **Yan J.K., Qiu W.Y., Wang Y.Y., Wang W.H., Yang Y., Zhang H.N.** Fabrication and stabilization of biocompatible selenium nanoparticles by carboxylic curdlans with various molecular properties. *Carbohydr. Polym.* 2018. V. 179. P. 19-27. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.09.063.
5. **Bhattacharjee A., Basu A., Bhattacharya S.** Selenium nanoparticles are less toxic than inorganic and organic selenium to mice in vivo. *Nucleus.* 2019. V. 62. P. 259-268. DOI: 10.1007/s13237-019-00303-1.
6. **Hosnedlova B., Kepinska M., Skalickova S., Fernandez C., Ruttkay-Nedecky B., Peng Q., Baron M., Melcova M., Opatrilova R., Zidkova J., Bjørklund G., Sochor J., Kizek R.** Nano-selenium and its nanomedicine applications: a critical review. *Int. J. Nanomed.* 2018. P. 2107-2128. DOI: 10.2147/IJN.S157541.
7. **Dawood M.A.O., Basuini M.F.E., Yilmaz S., Abdel-Latif H.M.R., Kari Z.A., Abdul Razab M.K.A., Ahmed H.A., Alagawany M., Gewaily M.S.** Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: a review. *Antioxidants.* 2021. V. 10. N 9. P. 1364. DOI: 10.3390/antiox10091364.
8. **Garza-García J. J. O., Hernández-Díaz J. A., Zamudio-Ojeda A., León-Morales J. M., Guerrero-Guzmán A., Sánchez-Chiprés D. R., López-Velázquez J. C. García-Morales S.** The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology. *Biolog. Trace Element Res.* 2021. P. 1-21. DOI: 10.1007/s12011-021-02847-3.
9. **Geoffrion L.D., Hesabizadeh T., Medina-Cruz D., Kuspfer M., Taylor P., Vernet-Crua A., Chen J., Ajo A., Webster T.J., Guisbiers G.** Naked selenium nanoparticles for antibacterial and anticancer treatments. *ACS omega.* 2020. V. 5. N 6. P. 2660-2669. DOI: 10.1021/acsomega.9b03172.

10. **Zou J., Su S., Chen Z., Liang F., Zeng Y., Cen W., Zhang X., Xia Y., Huang D.** Hyaluronic acid-modified selenium nanoparticles for enhancing the therapeutic efficacy of paclitaxel in lung cancer therapy. *Art. Cells, Nanomed. Biotechnol.* 2019. V. 47. N 1. P. 3456-3464. DOI: 10.1080/21691401.2019.1626863.
11. **Liu Y., Zeng S., Liu Y., Wu W., Shen Y., Zhang L., Li C., Chen H., Liu A., Shen L., Hu B., Wang C.** Synthesis and antidiabetic activity of selenium nanoparticles in the presence of polysaccharides from *Catathelasma ventricosum*. *Int. J. Biology. Macromol.* 2018. V. 114. P. 632-639. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.161.
12. **Menon S., Agarwal H., Rajeshkumar S., Jacqueline Rosy P., Shanmugam V.K.** Investigating the antimicrobial activities of the biosynthesized selenium nanoparticles and its statistical analysis. *Bionanoscience.* 2020. V. 10. P. 122-135. DOI: 10.1007/s12668-019-00710-3.
13. **Yu S., Lv M., Lu G., Cai C., Jiang J., Cui Z.** pH-Responsive Behavior of Pickering Emulsions Stabilized by a Selenium-Containing Surfactant and Alumina Nanoparticles. *Langmuir.* 2021. V. 37. N 36. P. 10683-10691. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c01179.
14. **Bisht N., Phalswal P., Khanna P.K.** Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Mater. Adv.* 2022. V. 3. N 3. P. 1415-1431. DOI: 10.1039/D1MA00639H.
15. **Song X., Chen Y., Sun H., Liu X., Leng X.** Physicochemical stability and functional properties of selenium nanoparticles stabilized by chitosan, carrageenan, and gum Arabic. *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 255. P. 117379. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117379.
16. **Молодцов П.А., Макаров С.В., Деревеньков И.А., Макарова А.С.** Влияние белков на взаимодействие селенита натрия с серосодержащими восстановителями. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 4. С. 56-61. DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6557.
17. **Макаров С.В., Молодцов П.А., Деревеньков И.А., Найденко Е.В.** Взаимодействие селенита натрия с гидроксиметансульфинатом натрия и диоксидом тиомочевины в водных растворах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 65-70. DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6442.
18. **Blinov A.V., Nagdalian A.A., Siddiqui S.A., Maglakelidze D.G., Gvozdenko A.A., Blinova A.A., Yasnaya M.A., Golik A.B., Rebezov M.B., Jafari S.M., Shah M.A.** Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine. *Sci. Rep.* 2022. V. 12. N 1. P. 21975. DOI: 10.1038/s41598-022-25884-x.
19. **Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Rekhman Z.A., Yasnaya M.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Blinova A.A., Kolodkin M.A., Alharbi N.S., Kadaikunnan S., Thiruvengadam M., Shariati M.A., Nagdalian A.A.** Investigation of the Effect of Dispersion Medium Parameters on the Aggregative Stability of Selenium Nanoparticles Stabilized with Cata-mine AB. *Micromachines.* 2023. V. 14. N 2. P. 433. DOI: 10.3390/mi14020433.
20. **Chauhan P., Chaudhary S.** Role of surface modification on selenium nanoparticles: Enumerating the optical, thermal and structural properties. *Optical Mater.* 2019. V. 97. P. 109380. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109380.
21. **Chakraborty D., Chauhan P., Kumar S., Chaudhary S., Chandrasekaran N., Mukherjee A., Ethiraj K.R.** Utilizing corona on functionalized selenium nanoparticles for loading and release of doxorubicin payload. *J. Molec. Liq.* 2019. V. 296. P. 111864. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111864.
10. **Zou J., Su S., Chen Z., Liang F., Zeng Y., Cen W., Zhang X., Xia Y., Huang D.** Hyaluronic acid-modified selenium nanoparticles for enhancing the therapeutic efficacy of paclitaxel in lung cancer therapy. *Art. Cells, Nanomed. Biotechnol.* 2019. V. 47. N 1. P. 3456-3464. DOI: 10.1080/21691401.2019.1626863.
11. **Liu Y., Zeng S., Liu Y., Wu W., Shen Y., Zhang L., Li C., Chen H., Liu A., Shen L., Hu B., Wang C.** Synthesis and antidiabetic activity of selenium nanoparticles in the presence of polysaccharides from *Catathelasma ventricosum*. *Int. J. Biology. Macromol.* 2018. V. 114. P. 632-639. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.161.
12. **Menon S., Agarwal H., Rajeshkumar S., Jacqueline Rosy P., Shanmugam V.K.** Investigating the antimicrobial activities of the biosynthesized selenium nanoparticles and its statistical analysis. *Bionanoscience.* 2020. V. 10. P. 122-135. DOI: 10.1007/s12668-019-00710-3.
13. **Yu S., Lv M., Lu G., Cai C., Jiang J., Cui Z.** pH-Responsive Behavior of Pickering Emulsions Stabilized by a Selenium-Containing Surfactant and Alumina Nanoparticles. *Langmuir.* 2021. V. 37. N 36. P. 10683-10691. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c01179.
14. **Bisht N., Phalswal P., Khanna P.K.** Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Mater. Adv.* 2022. V. 3. N 3. P. 1415-1431. DOI: 10.1039/D1MA00639H.
15. **Song X., Chen Y., Sun H., Liu X., Leng X.** Physicochemical stability and functional properties of selenium nanoparticles stabilized by chitosan, carrageenan, and gum Arabic. *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 255. P. 117379. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117379.
16. **Molodtsov P.A., Makarov S.V., Derevenkov I.A., Makarova A.S.** The influence of proteins on the interaction of sodium selenite with sulfur-containing reducing agents. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 4. P. 56-61 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6557.
17. **Makarov S.V., Molodtsov P.A., Derevenkov I.A., Naidenko E.V.** Interaction of sodium selenite with sodium hydroxymethanesulfinate and thiourea dioxide in aqueous solutions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 11. P. 65-70 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6442.
18. **Blinov A.V., Nagdalian A.A., Siddiqui S.A., Maglakelidze D.G., Gvozdenko A.A., Blinova A.A., Yasnaya M.A., Golik A.B., Rebezov M.B., Jafari S.M., Shah M.A.** Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine. *Sci. Rep.* 2022. V. 12. N 1. P. 21975. DOI: 10.1038/s41598-022-25884-x.
19. **Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Rekhman Z.A., Yasnaya M.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Blinova A.A., Kolodkin M.A., Alharbi N.S., Kadaikunnan S., Thiruvengadam M., Shariati M.A., Nagdalian A.A.** Investigation of the Effect of Dispersion Medium Parameters on the Aggregative Stability of Selenium Nanoparticles Stabilized with Cata-mine AB. *Micromachines.* 2023. V. 14. N 2. P. 433. DOI: 10.3390/mi14020433.
20. **Chauhan P., Chaudhary S.** Role of surface modification on selenium nanoparticles: Enumerating the optical, thermal and structural properties. *Optical Mater.* 2019. V. 97. P. 109380. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109380.
21. **Chakraborty D., Chauhan P., Kumar S., Chaudhary S., Chandrasekaran N., Mukherjee A., Ethiraj K.R.** Utilizing corona on functionalized selenium nanoparticles for loading and release of doxorubicin payload. *J. Molec. Liq.* 2019. V. 296. P. 111864. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111864.

22. **Guerrero-Hernández L., Meléndez-Ortiz H.I., Cortez-Mazatan G.Y., Vaillant-Sánchez S., Peralta-Rodríguez R.D.** Gemini and bicephalous surfactants: a review on their synthesis, micelle formation, and uses. *Int. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23. N 3. P. 1798. DOI: 10.3390/ijms23031798.
23. **Кашкай А.М., Касайкина О.Т., Агаева З.Р.** Окисление этилбензола в микрогетерогенных системах, образованных добавками цетилтриметиламмоний бромидом с ацетилацетонатом Со. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 38-44. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5810.
24. **Лутфуллина Г.Г., Фатхутдинова А.А.** Синтез и исследование свойств неионогенного поверхностно-активного вещества на основе жирных кислот кукурузного масла и диэтаноламина. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 20-26. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6640.
25. **Gonçalves R. A., Holmberg K., Lindman B.** Cationic surfactants: A review. *J. Molec. Liq.* 2023. P. 121335. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121335.
26. **Olutas E.B.** Alkyl Chain Length and Headgroup Dependent Stability and Agglomeration Properties of Surfactant-Assisted Colloidal Selenium Nanoparticles. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. P. 130935. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.130935.
27. **Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Yasnaya M.A., Gvozdenko A.A., Blinova A.A., Golik A.B., Slyadneva K.S., Pirogov M.A.** Synthesis of Selenium Nanoparticles Stabilized by Quaternary Ammonium Compounds. *Russ. J. Gen. Chem.* 2022. V. 92. N 3. P. 424-429. DOI: 10.1134/S1070363222030094.
28. **Naidoo S., Daniels A., Habib S., Singh M.** Poly-L-lysine–lactobionic acid-capped selenium nanoparticles for liver-targeted gene delivery. *Int. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23. N 3. P. 1492. DOI: 10.3390/ijms23031492.
29. **Блинов А.В., Нагдалян А.А., Гвозденко А.А., Голик А.Б., Сляднева К.С., Пировов М.А.** Исследование влияния параметров синтеза на средний гидродинамический радиус мицелл витамина е (альфа-токоферол ацетат). *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 45-53. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6571.
30. **Нагдалян А.А., Блинов А.В., Голик А.Б., Блинова А.А., Гвозденко А.А., Маглакелидзе Д.Г.** Влияние ионной силы и активной кислотности среды на стабильность наноэмульсий витамина Е (альфа-токоферол ацетат). *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 24-29. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6677.
31. **Cerdà, V., Phansi, P.** Buffer Solutions of known Ionic Strength. *Ann. Adv. Chem.* 2023. V. 7. P. 051-056. DOI: 10.29328/journal.aac.1001043.
32. **Siddiqui S.A.** Effect of selenium nanoparticles on germination of hordéum vulgáre barley seeds. *Coatings.* 2021. V. 11. N 7. P. 862. DOI: 10.3390/coatings11070862.
33. **Ruiz-Fresneda M.A.** Allotropy of selenium nanoparticles: Colourful transition, synthesis, and biotechnological applications. *Microbial Biotechnol.* 2023. V. 16. N 5. P. 877-892. DOI: 10.1111/1751-7915.14209.
22. **Guerrero-Hernández L., Meléndez-Ortiz H.I., Cortez-Mazatan G.Y., Vaillant-Sánchez S., Peralta-Rodríguez R.D.** Gemini and bicephalous surfactants: a review on their synthesis, micelle formation, and uses. *Int. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23. N 3. P. 1798. DOI: 10.3390/ijms23031798.
23. **Kashkai A.M., Kasaykina O.T., Agaeva Z.R.** Oxidation of ethylbenzene in microheterogeneous systems formed by the addition of cetyltrimethylammonium bromide with co-acetylacetonate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 5. P. 38-44 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5810.
24. **Lutfullina G.G., Fatkhutdinova A.A.** Synthesis and study of the properties of a nonionic surfactant based on fatty acids of corn oil and diethanolamine. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 11. P. 20-26 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.6640.
25. **Gonçalves R. A., Holmberg K., Lindman B.** Cationic surfactants: A review. *J. Molec. Liq.* 2023. P. 121335. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121335.
26. **Olutas E.B.** Alkyl Chain Length and Headgroup Dependent Stability and Agglomeration Properties of Surfactant-Assisted Colloidal Selenium Nanoparticles. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2023. P. 130935. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.130935.
27. **Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Yasnaya M.A., Gvozdenko A.A., Blinova A.A., Golik A.B., Slyadneva K.S., Pirogov M.A.** Synthesis of Selenium Nanoparticles Stabilized by Quaternary Ammonium Compounds. *Russ. J. Gen. Chem.* 2022. V. 92. N 3. P. 424-429. DOI: 10.1134/S1070363222030094.
28. **Naidoo S., Daniels A., Habib S., Singh M.** Poly-L-lysine–lactobionic acid-capped selenium nanoparticles for liver-targeted gene delivery. *Int. J. Molec. Sci.* 2022. V. 23. N 3. P. 1492. DOI: 10.3390/ijms23031492.
29. **Blinov A.V., Nagdalyan A.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Slyadneva K.S., Pirogov M.A.** Study of the influence of synthesis parameters on the average hydrodynamic radius of vitamin E micelles (alpha-tocopherol acetate). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 7. P. 45-53 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6571.
30. **Nagdalyan A.A., Blinov A.V., Golik A.B., Blinova A.A., Gvozdenko A.A., Maglakelidze D.G.** The influence of ionic strength and active acidity of the medium on the stability of vitamin E nanoemulsions (alpha-tocopherol acetate). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 12. P. 24-29 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6677.
31. **Cerdà, V., Phansi, P.** Buffer Solutions of known Ionic Strength. *Ann. Adv. Chem.* 2023. V. 7. P. 051-056. DOI: 10.29328/journal.aac.1001043.
32. **Siddiqui S.A.** Effect of selenium nanoparticles on germination of hordéum vulgáre barley seeds. *Coatings.* 2021. V. 11. N 7. P. 862. DOI: 10.3390/coatings11070862.
33. **Ruiz-Fresneda M.A.** Allotropy of selenium nanoparticles: Colourful transition, synthesis, and biotechnological applications. *Microbial Biotechnol.* 2023. V. 16. N 5. P. 877-892. DOI: 10.1111/1751-7915.14209.

Поступила в редакцию 14.07.2023

Принята к опубликованию 17.01.2024

Received 14.07.2023

Accepted 17.01.2024