

УДК 544.653:577.323.23

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА С БЕЛКАМИ

*О.В. Бондарь, И.И. Никитина, Э.Р. Булатов, М.В. Морозов,  
А.Х. Гильмутдинов, Ф.К. Алимова, Т.И. Абдуллин*

### Аннотация

С помощью адсорбции получены комплексы сферических наночастиц золота (НЧЗ) с альбумином, протеином А, авидином и иммуноглобулинами. Оценены возможности атомно-силовой микроскопии и электрофореза в геле для контроля размера, морфологии и заряда комплексов НЧЗ с белками. Изучено вольтамперометрическое поведение НЧЗ и их комплексов с белками на поверхности углеродных электродов. Модификация электрода углеродными нанотрубками значительно катализирует окисление НЧЗ в составе белковых комплексов, наблюдаемое при потенциале около +0.95 В. Результаты представляют интерес для стандартизации биоспецифических комплексов НЧЗ и создания на их основе электроактивных меток для аффинных биосенсоров.

**Ключевые слова:** комплексы наночастиц золота с белками, электрохимические биосенсоры, аффинные метки, стандартизация.

---

### Введение

Наночастицы золота – биосовместимый наноматериал, широко используемый в разных областях биологии и медицины [1, 2]. Благодаря необычным электронным/оптическим свойствам НЧЗ являются хорошими контрастирующими агентами для визуализации клеточных компонентов с помощью электронной и оптической микроскопии [3–5]. НЧЗ разной структуры, интенсивно поглощающие и рассеивающие свет в видимом и ИК-диапазоне, служат перспективными агентами для фотодинамической терапии опухолевых клеток [6, 7].

Другое важное направление применения НЧЗ в биомедицине – создание биологических сенсоров для анализа диагностически значимых биомолекул. НЧЗ являются эффективными метками для оптических и электрохимических биосенсоров [8–13]. Применение НЧЗ позволяет существенно увеличить чувствительность и селективность анализа иммунокомпонентов и нуклеиновых кислот и упростить процедуру его проведения с помощью использования соответствующих биосенсоров [8–13].

Для достижения избирательности взаимодействия с анализируемыми компонентами НЧЗ связывают с биоспецифическими молекулами (рецепторами), например со стрептавидином, антителами, протеином А [13]. Исследование свойств получаемых комплексов НЧЗ с биомолекулами является необходимым этапом создания на их основе эффективных зондов и меток. Для этого обычно используют оптическую спектроскопию и/или электронную микроскопию, которые

позволяют оценивать размер (форму) НЧЗ и контролировать их комплексообразование с биомолекулами [14–16]. Вместе с тем для получения дополнительных характеристик (исследование морфологии и поверхностного заряда) НЧЗ и их комплексов с белками актуально использовать ряд независимых методов.

В настоящей работе оценены аналитические возможности комплекса методов: атомно-силовой микроскопии, электрофореза в геле и квадратно-волновой вольтамперометрии, – используемых для получения информации о структуре и свойствах комплексов НЧЗ с некоторыми белками. Исследованы электрохимические свойства этих комплексов и оптимизированы условия их детектирования на электроде, что предполагает возможность их использования в качестве электроактивных меток для создания биосенсоров.

## 1. Экспериментальная часть

**1.1. Реагенты.** Использовали бычий сывороточный альбумин, протеин А, авидин, иммуноглобулины G кролика (Sigma-Aldrich), многостенные углеродные нанотрубки диаметром 3–10 нм и длиной 0.1–10 мкм (Sigma-Aldrich), деионизованную воду (Milli-Q Element) и соли квалификации «хч».

**1.2. Синтез наночастиц золота.** Сферические НЧЗ определенного размера синтезировали путем восстановления золотохлористоводородной кислоты (Sigma-Aldrich) цитратом натрия [14]. Для этого к 0.25 мМ кипящего раствора  $\text{H[AuCl}_4\text{]}$  при перемешивании добавляли цитрат натрия до конечной концентрации 1.5 мМ. Спектры поглощения НЧЗ измеряли на спектрофотометре NanoDrop ND1000 (NanoDrop Technologies, Inc.). Концентрацию синтезированных НЧЗ оценивали с использованием формулы [17]:

$$\ln \varepsilon = k \ln D + \alpha,$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент экстинкции ( $\text{M}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ),  $k = 3.321$ ,  $\alpha = 10.805$ ,  $D$  – диаметр наночастицы, нм. Концентрация НЧЗ составила  $4.75 \cdot 10^{-9}$  М.

**1.3. Получение комплексов наночастиц золота с белками.** Для получения комплексов НЧЗ – белок в суспензию синтезированных НЧЗ добавляли разное количество альбумина, протеина А, авидина или иммуноглобулинов. При совместной инкубации белки адсорбируются на поверхности НЧЗ в результате гидрофобных и электростатических взаимодействий. Формирование комплексов НЧЗ – белок сопровождается изменением спектра поглощения наночастиц и стабилизирует их от солевой агрегации в 0.1 М растворе NaCl [14–16].

Солевую агрегацию наблюдали визуально по изменению цвета золя от красного к серому или спектрофотометрически по исчезновению полосы поглощения НЧЗ. Это позволило подобрать оптимальные для связывания концентрации белка и значения рН раствора. Оптимальное значение рН обычно на 0.5 единиц выше изоэлектрической точки (ИЭТ) белка.

**1.4. Характеристика комплексов наночастиц золота с белками.** Электрофоретическое разделение НЧЗ и белков проводили в агарозном геле при постоянном напряжении. В лунки вносили по 10 мкл раствора белка, наночастиц золота

или их комплексов (количество вносимого в лунку белка около 1 мкг). Наночастицы в геле проявлялись в виде темной полосы без дополнительного окрашивания, белок окрашивали 0.5%-ным Кумасси G-250 [18].

НЧЗ и их комплексы с белками визуализировали на атомно-силовом микроскопе ИНТЕГРА Прима (NT-MDT) с использованием сканера 50 мкм с емкостными датчиками, стандартных кремниевых кантилеверов NSGO3 с радиусом кривизны 10 нм. Суспензию наночастиц наносили на поверхность свежерасщепленной слюды, высушивали и далее сканировали образец в полуконтактном режиме на воздухе.

**1.5. Электрохимические измерения.** Поверхность стеклоуглеродного электрода (СУЭ) диаметром 1.5 мм модифицировали слоем предварительно окисленных углеродных нанотрубок, как описано в [19, 20]. Электрохимическая ячейка состояла из рабочего СУЭ или СУЭ, модифицированного углеродными нанотрубками, никелевого противоиэлектрода и хлоридсеребряного электрода сравнения (Ag/AgCl).

Измерения проводили с помощью потенциостата/гальваностата AUTOLAB PGSTAT12 (EcoChemie) в режиме квадратно-волновой вольтамперометрии. На рабочую поверхность электрода наносили  $8.6 \cdot 10^{-15}$  моль НЧЗ или их комплексов с белками, высушивали и далее записывали анодные вольтамперограммы адсорбированных наночастиц в отсутствие электроактивных компонентов в электролите. В качестве фонового электролита использовали 0.01 М ацетат натрия в 0.1 М NaCl, pH 5.0.

## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1. Спектрофотометрия наночастиц золота и их комплексов с белками.

Типичный спектр поглощения наночастиц золота содержит характерную для сферических НЧЗ полосу с максимумом при 518 нм (рис. 1), соответствующую когерентным колебаниям свободных электронов наночастицы [2]. Используя известную зависимость  $\lambda_{\max}$  от размера сферических НЧЗ [2], мы оценили средний диаметр синтезированных НЧЗ, составивший около 13 нм.

Зависимость оптических свойств НЧЗ от их микроокружения [14–16] использовали для контроля связывания НЧЗ с модельным белком альбумином и биоспецифическими белками – протеином А, авидином и иммуноглобулинами G. В качестве примера на рис. 1 приведены спектры поглощения НЧЗ до и после их связывания с авидином. Адсорбция белка на поверхности НЧЗ сопровождалась сдвигом  $\lambda_{\max}$  в длинноволновую область вследствие изменения диэлектрического микроокружения наночастицы [14–16]. Величина сдвига составила около 9 нм для альбумина и иммуноглобулинов, 12 нм для авидина и 3 нм для протеина А. Изменение спектров экстинкции может быть вызвано образованием белковой оболочки вокруг наночастиц и/или формированием агрегатов НЧЗ в присутствии белка [15]. Для получения дополнительной информации о структуре комплексов НЧЗ – белок необходимо провести АСМ-анализ.

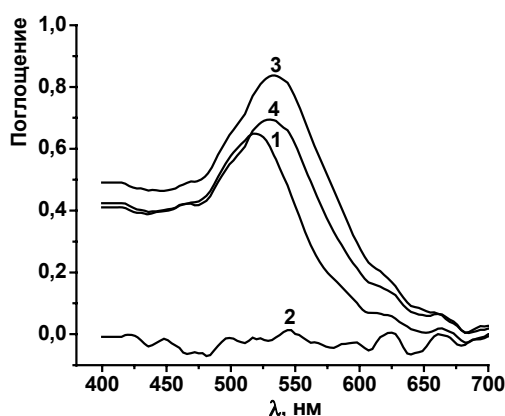


Рис. 1. Спектры оптического поглощения наночастиц золота в присутствии авидина и NaCl: 1 – исходные НЧЗ; 2 – НЧЗ в 0.1 М растворе NaCl; 3 – связанные с авидином НЧЗ; 4 – связанные с авидином НЧЗ в 0.1 М растворе NaCl

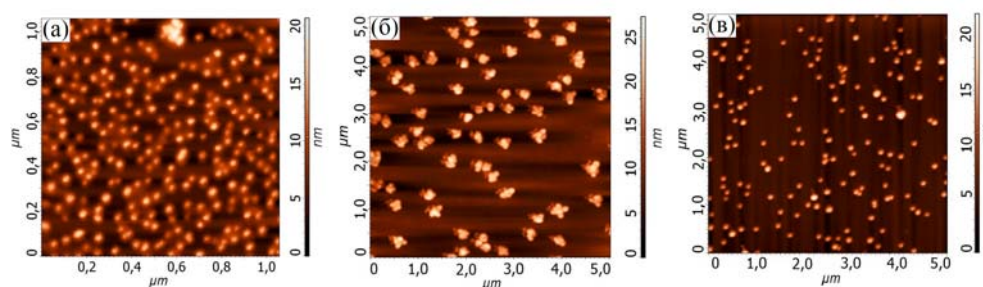


Рис. 2. Топографические АСМ-изображения наночастиц золота  $\lambda_{\max} = 518$  нм (а), их комплексов с альбумином (б) и протеином А (в) на слюде

Адсорбция белков стабилизировала НЧЗ от солевой агрегации в 0.1 М растворе NaCl, регистрируемой по исчезновению полосы поглощения НЧЗ. Минимальная стабилизирующая концентрация исследуемых белков составила: 5 мкг/мл для альбумина, 3.5 мкг/мл для протеина А, 10 мкг/мл для авидина и иммуноглобулинов (для концентрации НЧЗ  $3.88 \cdot 10^{-9}$  М).

**2.2. Атомно-силовая микроскопия наночастиц золота и их комплексов с белками.** Для характеристики структуры НЧЗ и комплексов НЧЗ – белок использовали атомно-силовую микроскопию (АСМ), позволяющую с высоким разрешением визуализировать наноразмерные объекты. На рис. 2, а показано топографическое изображение НЧЗ, на котором видны как индивидуальные шарообразные наночастицы, так и их агрегаты. Средний диаметр НЧЗ, установленный с помощью АСМ по высоте объекта, составил около  $14 \pm 3$  нм, что согласуется с данными, полученными при оптической спектроскопии.

Связывание с белками приводило к увеличению размера НЧЗ вследствие формирования агрегатов из нескольких наночастиц и/или образования белковой оболочки на поверхности НЧЗ [15]. В качестве примера на рис. 2 показаны АСМ-изображения комплексов НЧЗ с альбумином и протеином А.

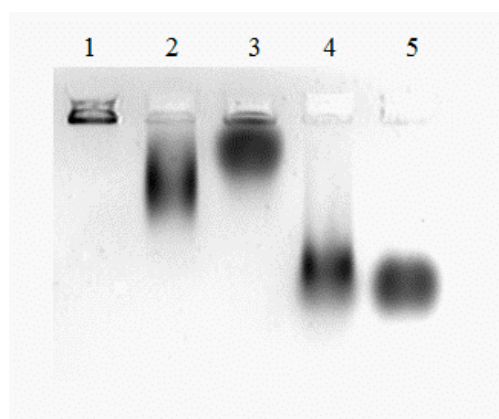


Рис. 3. Электрофореграмма комплексов наночастиц золота с альбумином и протеином А в агарозном геле (после окрашивания Кумасси): 1 – НЧЗ; 2 – комплекс НЧЗ – протеин А; 3 – протеин А; 4 – комплекс НЧЗ – альбумин; 5 – альбумин

В комплексе с альбумином НЧЗ формируют агрегаты из 4–5 наночастиц (рис. 2, б), высота которых составила  $22 \pm 2$  нм, что почти в 1.5 раза превышает размер исходных наночастиц. В случае комплексов НЧЗ – протеин А крупные агрегаты не формируются, а наблюдается образование хорошо выраженных сферических комплексов высотой около  $17 \pm 2$  нм (рис. 2, в). Таким образом, толщина белковой оболочки по результатам АСМ составила  $3 \pm 2$  нм, что согласуется с литературными данными [15].

Результаты показывают возможность использования АСМ для оценки размера НЧЗ и характеристики структуры их комплексов с белками. По сравнению с аналогом – электронной микроскопией – АСМ отличается относительной простотой пробоподготовки и возможностью получения трехмерных изображений биологических объектов в нативных условиях [21].

**2.3. Характеристика комплексов наночастиц золота с белками с помощью электрофореза.** Для контроля комплексообразования НЧЗ с белками также использовали электрофорез в агарозном геле. На рис. 3 приведена электрофореграмма НЧЗ и их комплексов с протеином А и альбумином. Установлено, что исходные НЧЗ, имеющие отрицательный заряд благодаря адсорбированным на поверхности анионам [3], не проникают в гель (рис. 3, дорожка 1). Это, вероятно, связано с агрегацией НЧЗ в электролите и/или взаимодействием НЧЗ с компонентами геля. В тоже время обладающие достаточно сильным отрицательным зарядом протеин А и альбумин (ИЭТ 5.1 и 4.9 соответственно) движутся в геле к аноду (рис. 3, дорожки 3 и 5).

После адсорбции протеина А или альбумина НЧЗ проникают в гель и мигрируют к аноду (рис. 3, дорожки 2 и 4), что свидетельствует о связывании НЧЗ с белками. Образующиеся при этом комплексы НЧЗ – протеин А обладают большей электрофоретической подвижностью, чем протеин А, а НЧЗ – альбумин – чуть меньшей подвижностью относительно альбумина (рис. 3, дорожки 2–5). Очевидно, разделение комплексов НЧЗ – белок в геле зависит не только от заряда адсорбируемых белков, но и от других структурных особенностей образующихся

комплексов. В частности, различие в подвижности исследуемых комплексов НЧЗ – белок можно объяснить образованием высокомолекулярных агрегатов НЧЗ – альбумин, не характерных для НЧЗ – протеин А (рис. 2, б и в). Таким образом, электрофорез в агарозном геле позволяет оценивать заряд и размер комплексов НЧЗ с отрицательно заряженными белками.

В то же время выяснено, что авидин и иммуноглобулины, характеризующиеся более высокими значениями ИЭТ (10.0 и 7.0 соответственно), не образуют электрофоретически подвижных комплексов с тестируемыми НЧЗ. По-видимому, такие белки не придают достаточного заряда НЧЗ, что затрудняет разделение соответствующих комплексов в геле.

**2.4. Вольтамперометрический анализ наночастиц золота и их комплексов с белками.** Исследованы электрохимические свойства охарактеризованных НЧЗ и их комплексов с белками на углеродных электродах. Для этого использовали квадратно-волновую вольтамперометрию, характеризующуюся высокой чувствительностью и скоростью измерений [22].

Установлено, что НЧЗ, адсорбированные на СУЭ, интенсивно окисляются при потенциале около +0.95 В (рис. 4). Соответственно, ток окисления НЧЗ можно использовать в качестве сигнала для их обнаружения на электроде.

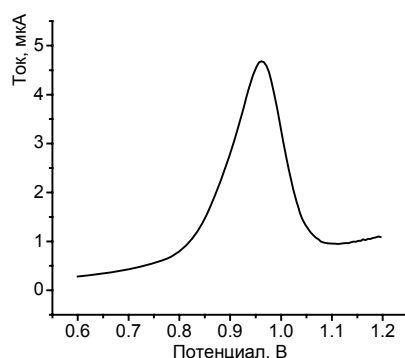


Рис. 4. Квадратно-волновая вольтамперограмма окисления наночастиц золота, адсорбированных на стеклогуглеродном электроде. На электрод наносили  $8.6 \cdot 10^{-15}$  М наночастиц

Сигнал НЧЗ на СУЭ линейно увеличивается пропорционально количеству наночастиц, нанесенных на электрод (рис. 5). Соответствующая зависимость описывается уравнением:

$$I (10^{-6} \text{ A}) = (0.542 \pm 0.028) \nu (10^{-15} \text{ M}) - (0.394 \pm 0.182); r = 0.985.$$

На СУЭ, модифицированном углеродными нанотрубками, НЧЗ характеризуются сходным поведением. Предел обнаружения НЧЗ на электродах обоих типов составил около  $0.3 \cdot 10^{-15}$  М на поверхности электрода, что предполагает возможность их чувствительного электрохимического детектирования.

Установлено, что комплексообразование с белками приводит к существенному уменьшению (почти в 65 раз) сигнала НЧЗ на СУЭ. Это можно объяснить образованием белковой оболочки вокруг НЧЗ, действующей как изолятор и значительно затрудняющей окисление НЧЗ на СУЭ. Выяснено, что на СУЭ,

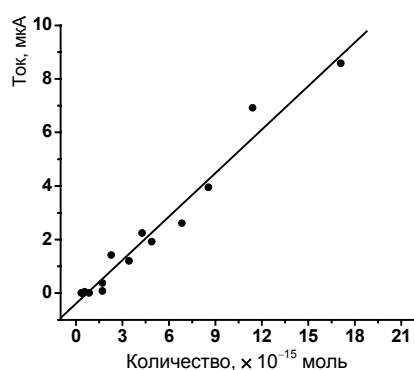


Рис. 5. Зависимость величины тока окисления наночастиц золота от их количества на поверхности стеклоуглеродного электрода

модифицированном углеродными нанотрубками, сигнал НЧЗ после связывания с белком изменяется в значительно меньшей степени – в среднем в 11 раз.

Это свидетельствует об интенсификации окисления НЧЗ в комплексе с белком в присутствии углеродных нанотрубок (при этом сами белки не вносят вклад в сигнал исследуемых комплексов). Ранее нами показано [19, 20], что углеродные нанотрубки формируют на электродах наноструктурированные покрытия и эффективно катализируют электрохимические реакции с участием биомолекул. Наблюдаемое увеличение сигнала комплексов НЧЗ – белок на СУЭ, модифицированном углеродными нанотрубками (по сравнению с обычным СУЭ), вероятно, обусловлено высокой проникающей способностью нанотрубок, уменьшающих изолирующее влияние белкового окружения НЧЗ и облегчающих их окисление на электроде.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что для характеристики НЧЗ и их комплексов с белками, наряду со спектрофотометрией, удобно использовать атомно-силовую микроскопию и электрофорез в геле. Эти методы позволяют определять дополнительные характеристики комплексов (размер, морфология, оценка поверхностного заряда). Полученные комплексы НЧЗ с белками можно использовать в качестве электроактивных меток для разработки биосенсоров. Применение в качестве модификатора электрода углеродных нанотрубок значительно увеличивает чувствительность прямого детектирования комплексов НЧЗ с белками.

### Summary

*O.V. Bondar, I.I. Nikitina, E.R. Bulatov, M.V. Morozov, A.Kh. Gilmutdinov, F.K. Alimova, T.I. Abdullin.* Characterization of Electroactive Complexes of Gold Nanoparticles and Proteins.

Complexes of spherical gold nanoparticles (GNPs) with albumin, protein A, avidin, and immunoglobulin were obtained by the means of adsorption. We evaluated the possibility of using atomic force microscopy and gel electrophoresis for size, morphology and charge control of GNPs and protein complexes. Voltamperometric behaviors of GNPs and their complexes with proteins were studied using carbon electrodes. Electrode modification by carbon

nanotubes significantly catalyzes the oxidation of GNPs in complexes with proteins observable at potential of +0.95 V. Results are of interest for the development of electroactive labels based on GNPs complexes with bio-specific molecules and also for affine biosensors.

**Key words:** complexes of gold nanoparticles with proteins, electrochemical biosensors, affine labels, standardization.

### Литература

1. *Rosi N.L., Mirkin C.A.* Nanostructures in Biodiagnostics // *Chem. Rev.* – 2005. – V. 105. – P. 1547–1562.
2. *Хлебцов Н.Г., Богатырев В.А., Дыкман Л.А., Хлебцов Б.Н.* Золотые наноструктуры с плазмонным резонансом для биомедицинских исследований // *Рос. нанотехнологии.* – 2007. – Т. 2, № 3–4. – С. 69–86.
3. *Дыкман Л.А., Богатырев В.А.* Наночастицы золота: получение, функционализация, использование в биохимии и иммунохимии // *Усп. химии.* – 2007. – Т. 76, № 2. – С. 199–213.
4. *Horisberger M.* Colloidal gold as a tool in molecular biology // *Trends Biochem. Sci.* – 1983. – V. 8, No 11. – P. 395–397.
5. *Quarta A., Di Corato R., Manna L., Argentiere S., Cingolani R., Barbarella G., Pellegrino T.* Multifunctional Nanostructures Based on Inorganic Nanoparticles and Oligothiophenes and Their Exploitation for Cellular Studies // *J. Am. Chem. Soc.* – 2008. – V. 130, No 32. – P. 10545–10555.
6. *Pissuwan D., Valenzuela S.M., Cortie M.B.* Therapeutic possibilities of plasmonically heated gold nanoparticles // *Trends Biotechnol.* – 2006. – V. 24, No 2. – P. 62–67.
7. *Jain P.K., El-Sayed I.H., El-Sayed M.A.* Au nanoparticles target cancer // *Nanotoday.* – 2007. – V. 2, No 1. – P. 18–29.
8. *Alivisatos P.* The Use of Nanocrystals in Biological Detection // *Nat. Biotechnol.* – 2004. – V. 22. – P. 47–52.
9. *Pumera M., Sánchez S., Ichinose I., Tang J.* Electrochemical nanobiosensors // *Sensor. Actuator. B: Chem.* – 2007. – V. 123, No 2. – P. 1195–1205.
10. *Liu G., Wang J., Kim J., Jan M.R., Collins G.E.* Electrochemical Coding for Multiplexed Immunoassays of Proteins // *Anal. Chem.* – 2004. – V. 76. – P. 7126–7130.
11. *Riboh J.C., Haes A.J., McFarland A.D., Yonzon C.R., Van Duyne R.P.* Nanoscale Optical Biosensor: Real-Time Immunoassay in Physiological Buffer Enabled by Improved Nanoparticle Adhesion // *J. Phys. Chem. B.* – 2003. – V. 107, No 8. – P. 1772–1780.
12. *Park S.J., Taton T.A., Mirkin C.A.* Array-Based Electrical Detection of DNA with Nanoparticle Probes // *Science.* – 2002. – V. 295. – P. 1503–1506.
13. *Liu G., Lin Y.* Renewable Electrochemical Magnetic Immunosensor Based on Gold Nanoparticle Labels // *J. Nanosci. Nanotechnol.* – 2005. – V. 5, No 7. – P. 1060–1065.
14. *Богатырев В.А., Дыкман Л.А., Краснов Я.М., Плотников В.К., Хлебцов Н.Г.* Метод дифференциальной спектроскопии рассеянного света для исследования биоспецифических реакций в системах конъюгатов золотых наночастиц с белками или олигонуклеотидами // *Коллоид. журн.* – 2002. – Т. 64, № 6. – С. 745–755.
15. *Хлебцов Н.Г., Богатырев В.А., Хлебцов Б.Н., Дыкман Л.А., Englebienne P.* Много-слойная модель биоконъюгатов золотых наночастиц: исследование адсорбции желатина и иммуноглобулина человека с использованием спектров статического рассеяния и поглощения света и метода динамического светорассеяния // *Коллоид. журн.* – 2003. – Т. 65, № 5. – С. 679–693.



16. *Khlebtsov N.G., Bogatyrev V.A., Dykman L.A., Melnikov A.G.* Spectral extinction of colloidal gold and its biospecific conjugates // *J. Coll. Interface Sci.* – 1996. – V. 180. – P. 436–445.
17. *Liu X., Atwater M., Wang J., Huo Q.* Extinction coefficient of gold nanoparticles with different sizes and different capping ligands // *Coll. Surf. B: Biointerfaces.* – 2007. – V. 58, No 1. – P. 3–7.
18. *Маниатис Т., Фрич Э., Сэмбрук Дж.* Молекулярное клонирование. Методы генетической инженерии. – М.: Мир, 1984. – 480 с.
19. *Абдуллин Т.И., Никитина И.И., Бондарь О.В., Ишмухаметова Д.Г., Коновалова О.А., Салахов М.Х.* Конструирование и тестирование электродов на основе многостенных углеродных нанотрубок // *Рос. нанотехнологии.* – 2007. – Т. 2, № 7–8. – С. 156–160.
20. *Абдуллин Т.И., Никитина И.И., Ишмухаметова Д.Г., Будников Г.К., Коновалова О.А., Салахов М.Х.* Электроды, модифицированные углеродными нанотрубками, для электрохимических ДНК-сенсоров // *Журн. аналит. химии.* – 2007. – Т. 62, № 6. – С. 667–671.
21. *Вакитейн М.С., Аратов Н.В., Зосимов В.В.* Определение размеров коллоидных квантовых точек в полуконтактном режиме АСМ // *Молекул. технологии.* – 2007. – Т. 1. – С. 1–14.
22. *Wang J.* *Analytical electrochemistry.* – N. Y.: Wiley-VCH, 2000. – 236 p.

Поступила в редакцию  
01.09.09

---

**Бондарь Оксана Викторовна** – аспирант кафедры биохимии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [o.v.bondar@mail.ru](mailto:o.v.bondar@mail.ru)

**Никитина Ирина Игоревна** – аспирант кафедры биохимии Казанского (Приволжского) федерального университета.

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

**Булатов Эмиль Рафаэлевич** – аспирант кафедры биохимии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [emilbulatov@rambler.ru](mailto:emilbulatov@rambler.ru)

**Морозов Михаил Валерьевич** – аспирант кафедры общей физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [misha617@mail.ru](mailto:misha617@mail.ru)

**Гильмутдинов Альберт Харисович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Albert.Gilmutdinov@ksu.ru](mailto:Albert.Gilmutdinov@ksu.ru)

**Алимова Фарида Кашифовна** – доктор биологических наук, заведующий кафедрой биохимии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [farida\\_alimova@hotmail.com](mailto:farida_alimova@hotmail.com)

**Абдуллин Тимур Илдарович** – кандидат биологических наук, ассистент кафедры биохимии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [tabdulli@gmail.com](mailto:tabdulli@gmail.com)