

УДК 54-438; 543.41; 543.422.7; 546.57; 546.05

ПОЛУЧЕНИЕ РЕАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРНЫХ БУМАГ С ТРЕУГОЛЬНЫМИ НАНОПЛАСТИНКАМИ СЕРЕБРА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В.В. Апяри*, А.А. Фурлетов, А.В. Гаршев, П.А. Волков¹, М.О. Горбунова^{2,3},
А.В. Шевченко²

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, факультет наук о материалах; *e-mail: apyari@mail.ru)

Разработана методика получения методом импрегнирования реактивных индикаторных бумаг с треугольными нанопластинками серебра (ТНП). Выбраны условия получения модифицированных бумаг (тип бумаги, способ нанесения ТНП, условия сушки), позволяющие добиться однородности нанесения ТНП. Изучены спектральные характеристики полученных материалов. Наличие интенсивной полосы поверхностного плазмонного резонанса ТНП в спектрах диффузного отражения модифицированных бумаг, амплитуда которой линейно связана с содержанием в образцах ТНП, а также изменение ее положения и формы в присутствии ряда соединений обуславливают перспективы использования полученных материалов в роли тест-средств в химическом анализе.

Ключевые слова: реактивная индикаторная бумага, треугольные нанопластинки серебра, поверхностный плазмонный резонанс, тест-средство, спектроскопия диффузного отражения.

Одна из важнейших задач аналитической химии – разработка простых, дешевых и экологически безопасных тест-средств для оперативно-внелабораторного анализа. Экономически и экологически оправданной стратегией в решении указанной задачи является нанесение химических реагентов на удобный в использовании носитель (сорбенты, волокна, бумага и т.п.). К перспективным средствам можно отнести индикаторные порошки и бумажные тест-полоски [1–5]. При этом важен поиск новых реагентов, обладающих заданными химико-аналитическими параметрами и обеспечивающих требуемые метрологические характеристики анализа, а также повышающих селективность определения. В настоящее время интенсивно исследуются наночастицы золота и серебра, а также нанокompозитные материалы на их основе [6–9]. В основе уникальных оптических свойств наночастиц лежит поверхностный плазмонный резонанс (ППР) [10–12], который приводит к появлению в спектрах поглощения максимумов в видимой области и обуславливает возможность использования наночастиц для спектрофотометрического и визуально-колориметрического определения веществ [13–23].

При этом в последнее время отмечается устойчивая тенденция к использованию нанообъектов несферической формы, таких как наностержни, нанопластинки, нанопризмы и др. Морфологические особенности этих нанообъектов и анизотропия их свойств зачастую приводят к интересным оптическим эффектам, которые могут быть положены в основу новых способов определения [24–27].

Задача создания новых индикаторных систем на основе несферических наночастиц весьма актуальна. Аналитическим сигналом в таких системах могут служить наличие/исчезновение связанного с наночастицами ППР, а также изменение резонансной частоты плазмонных колебаний наночастиц различной формы.

Цель данной работы – разработка способа получения реактивных индикаторных бумаг с треугольными нанопластинками серебра (ТНП) для химического анализа, основанного на изменении оптических эффектов ТНП.

Экспериментальная часть Реагенты и аппаратура

Использованы следующие реагенты: азотная кислота («х.ч.»), соляная кислота («х.ч.»), нитрат серебра («х.ч.»), цитрат натрия («ч.д.а.»),

¹НИИ Химических реактивов и особо чистых химических веществ, Москва, Россия; ²Южный федеральный университет, химический факультет, Ростов-на-Дону, Россия; ³ГБОУ ВПО РостГМУ Минздрава России, фармацевтический факультет, Ростов-на-Дону, Россия.

поливинилпирролидон («ч.д.а.»), пероксид водорода («ч.»), боргидрид натрия («х.ч.»), нитрат диртути(I) («ч.д.а.»), нитрат ртути(II) («ч.д.а.»), дихромат калия («ч.»), хлорид, бромид и йодид калия («ч.д.а.»), сульфид натрия («ч.»), цистеин («х.ч.»), пикриновая кислота («ч.»). Рабочие растворы веществ готовили путем растворения их точных навесок или разбавления аликвот в деионизованной воде; треугольные нанопластины серебра синтезировали по методике, описанной ниже. Деионизованную воду получали, используя системы очистки «Millipore» и «Simplicity».

Использовали несколько типов бумаг: Whatman Grade 113 ($d = 7,0$ см, $m = 0,47$ г); Whatman Grade 1 ($d = 1,3$ см, $m = 0,012$ г); фильтр «белая лента» ТУ 2642-001-68085491-2011 ($d = 15,0$ см, $m = 1,3$ г, ООО «Мелиор XXI») и Filtrak (Filtraco hydrochlorico extracta, «Spezialpapierfabrik Niederschlag», Германия, $m = 1,0$ г). Образцы бумаг использовали без какой-либо дополнительной подготовки.

Спектры поглощения и оптическую плотность растворов измеряли в стандартных кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см на спектрофотометре «СФ-103» («Аквилон»). Диффузное отражение в видимой области регистрировали на мини-спектрофотометре «Eye-One Pro» (X-Rite) [28–30]. Измерения проводили на белой подложке. Измеряли значения коэффициентов диффузного отражения (R), на основании которых рассчитывали величины функции Кубелки–Мунка по формуле $F = (1 - R)^2 / (2R)$. Образцы бумаг сканировали на сканере «i-Sensys MF4410» («Canon»).

Для проведения электронно-микроскопических исследований ТНП в растворе использовали просвечивающий электронный микроскоп, снабженный термоэмиссионным катодом «Libra 200» («Carl Zeiss», Германия), при ускоряющем напряжении 200 кВ. Информационный предел при регистрации изображений в режиме светлопольной просвечивающей микроскопии был лучше 0,1 нм. Для проведения анализа образцы в виде коллоидных растворов наносили на поддерживающую сеточку из меди с пленками из формвара и углерода Formvar®/Carbon Reinforced CopperGrids 3440C-MB (SPI, США). Перед установкой в микроскоп образцы сушили сначала на воздухе в течение 20–30 мин, а затем в вакууме с помощью «Turbo Pumping Station Model 655» («Gatan», США) в течение 10–12 ч. Электронно-микроскопические исследования микроструктуры индикаторных бумаг, модифицированных ТНП, проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа «JSM 7100 F» («Jeol», Япония).

Методика синтеза ТНП

Синтез ТНП серебра выполняли по методике [31] с незначительными изменениями. Стеклянную посуду, которую использовали при проведении синтеза, предварительно промывали свежеприготовленной «царской водкой», тщательно ополаскивали дистиллированной водой, а затем сушили на воздухе. Для приготовления растворов использовали деионизованную воду.

К 0,5 мл водного 0,01 М раствора нитрата серебра (AgNO_3) добавляли 4,1 мл деионизованной воды, при интенсивном перемешивании вносили 2,3 мл 1%-го водного раствора цитрата натрия ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3$), 0,6 мл водного раствора поливинилпирролидона с массовой концентрацией полимера 20 г/л и 1,2 мл 3%-го водного раствора пероксида водорода. К полученному бесцветному раствору по каплям при перемешивании добавляли 1,0 мл свежеприготовленного 0,1 М водного раствора боргидрида натрия NaBH_4 . Смесь приобретала слабую желто-зеленую окраску, которая через полчаса резко изменялась на интенсивную изумрудно-зеленую, а затем на сине-фиолетовую. Одновременно наблюдалось выделение газобразных веществ. После этого перемешивание прекращали. Полученный коллоидный раствор ТНП серебра хранили при комнатной температуре. Конечная концентрация ТНП в растворе после синтеза составляет 56 мкг/мл (0,52 мМ в пересчете на атомарное серебро).

Техника получения бумаг, модифицированных ТНП

Whatman Grade 113. На чашку Петри наносили 1,5 мл раствора ТНП и сверху помещали бумагу, по которой раствор быстро и достаточно равномерно распределялся. Чашку Петри помещали на электроплитку и высушивали на воздухе при температуре около 80 °С. Операцию повторяли до достижения необходимого содержания ТНП на бумаге.

Whatman Grade 1. Накапывали раствор ТНП (по 40 мкл) на образцы бумаги, находящиеся в чашке Петри. После этого чашку Петри помещали на электроплитку и высушивали на воздухе при температуре около 80 °С. Операцию повторяли до достижения необходимого содержания ТНП на бумаге.

Для изучения взаимодействия адсорбированных ТНП с различными соединениями на образцы модифицированных бумаг Whatman Grade 1 в чашке Петри наносили растворы веществ (по 40 мкл). Масса нанесенного на каждый образец

вещества составляла 0,4 мкг. После этого образцы высушивали на электроплитке при температуре ~80 °С, измеряли диффузное отражение и сканировали.

Обсуждение результатов

Характеристики ТНП серебра

Синтезированные ТНП серебра характеризуются наличием в видимой области спектра интенсивной полосы поглощения (рис. 1, а), обусловленной поверхностным плазмонным резонансом (ППР), которая определяет возможность их использования в качестве реагента в методах оптической молекулярной спектроскопии. Согласно литературным данным [32], положение максимума полосы поглощения ТНП зависит от геометрических параметров треугольных нанопластинок, которые определяются длиной их ребра и острым углом. Синтезированные в данной работе образцы ТНП имеют максимум поглощения при 610 нм. Методом просвечивающей электронной микроскопии получены микрофотографии ТНП (рис. 1, б). Согласно оценке по микрофотографиям, длина ребра ТНП составляет в среднем около 50 нм. Треугольные нанопластины серебра устойчивы в водном коллоидном растворе и сохраняют свои спектральные характеристики практически неизменными в течение как минимум 1 месяца.

Получение бумаг, модифицированных ТНП

В данной работе для получения бумаг, модифицированных ТНП, предложено использовать метод импрегнирования. Этот метод характеризуется простотой и быстротой, позволяя при этом нанести на матрицу большое количество реагента, что

выгодно выделяет его среди других методов, таких как, например, сорбционное модифицирование. К недостаткам импрегнирования можно отнести меньшую равномерность распределения реагента по поверхности матрицы и зависимость однородности получаемого материала от условий модифицирования. Поэтому в предварительных экспериментах изучено влияние типа бумаги, объема наносимого раствора и условий сушки модифицированных образцов на однородность получаемых бумаг. Равномерность покрытия контролировали визуально. При сравнении способов модифицирования учитывали не только равномерность распределения ТНП, но и простоту процедуры.

Установлено, что наиболее равномерное модифицирование треугольными нанопластинками серебра достигается при использовании бумаг Whatman Grade 113 и Whatman Grade 1. Равномерность распределения ТНП в случае остальных бумаг оказалась хуже, что связано, вероятно, с неоднородностью их структуры и наличием примесей, приводящих к изменению спектральных характеристик ТНП. Поэтому для дальнейших экспериментов были выбраны указанные выше бумаги марки Whatman.

Важную роль играют объем раствора и способ его нанесения на бумагу. Поскольку нанесение раствора ТНП путем накапывания не позволяет добиться его равномерного распределения по поверхности больших по размеру образцов Whatman Grade 113, эти образцы модифицировали путем погружения в аликвоту раствора ТНП, помещенную в чашку Петри. Выбран объем аликвоты, равный 1,5 мл, который позволяет раствору смочить всю поверхность бумаги, практически не оставляя избыточного количества жидкости в чашке Петри.

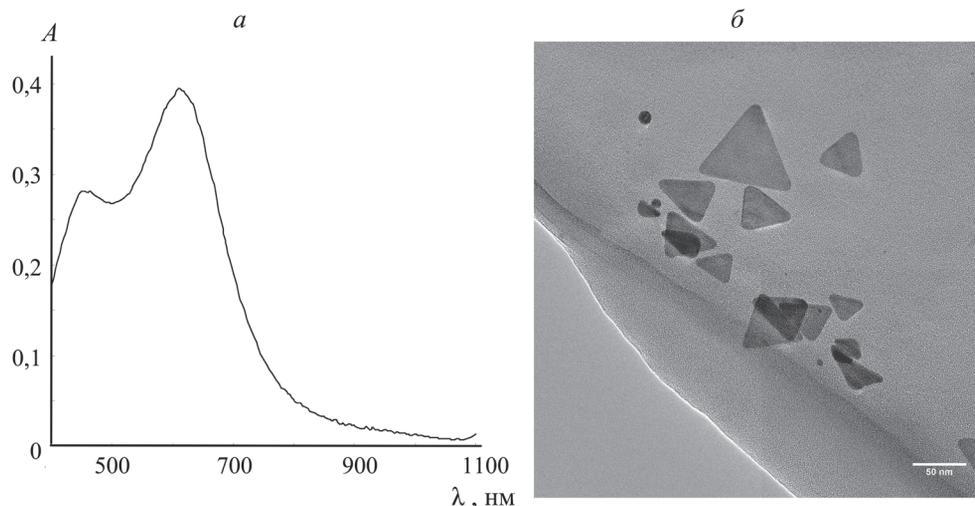


Рис. 1. Спектр поглощения водного раствора ТНП (разбавлены в 5 раз) (а) и их микрофотография ПЭМ (б)

Содержание ТНП, наносимое за один раз на бумагу, составляет 0,18 мг/г. В случае небольших по размеру образцов бумаги Whatman Grade 1 способ накапывания раствора сверху оказался достаточно эффективным для получения однородных образцов и использовался в дальнейшем как более простой в исполнении. Объем раствора, наносимый микродозатором одновременно на каждый образец, составляет 40 мкл. Содержание ТНП, наносимое за один раз, составляет для таких образцов также 0,18 мг/г.

После нанесения растворов ТНП образцы высушивали. Сушка в токе воздуха при комнатной температуре оказалась неэффективной в силу больших затрат времени и меньшей однородности получаемых бумаг. Хорошие результаты были получены при сушке бумаг в чашках Петри на воздухе при нагревании на электроплитке до температуры около 80 °С. Этот способ позволяет быстро получить большое количество образцов модифицированных бумаг за относительно короткое время. Полученные данные свидетельствуют о термической стабильности ТНП в указанных условиях.

Характеристики бумаг, модифицированных ТНП

На микрофотографиях модифицированных ТНП индикаторных бумаг, полученных с помо-

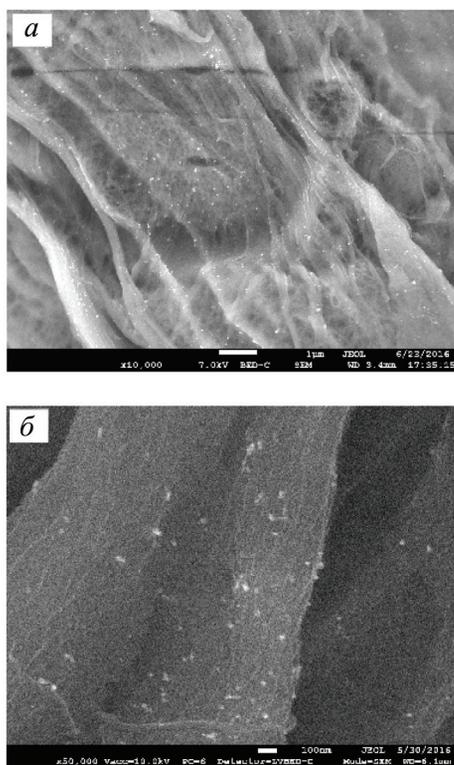


Рис. 2. Электронные микрофотографии СЭМ бумаги Whatman Grade 113, модифицированной ТНП, при увеличении $\times 10000$ (а) и $\times 50000$ (б)

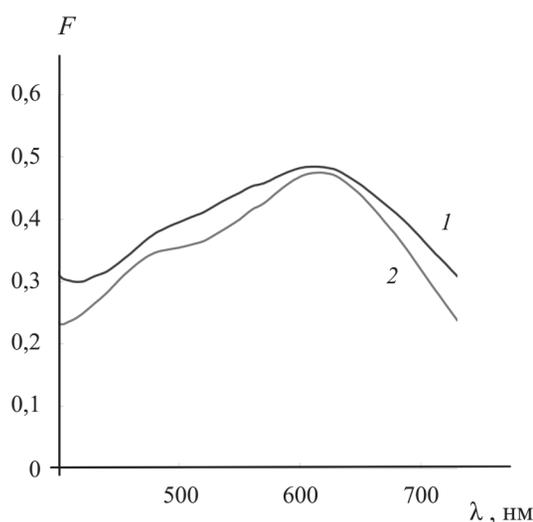


Рис. 3. Спектры диффузного отражения бумаг Whatman Grade 113 (1) и Whatman Grade 1 (2), модифицированных ТНП. Содержание ТНП – 0,55 мг/г, измерение со стороны нанесения раствора

щью сканирующего электронного микроскопа, видны наночастицы серебра, распределенные по поверхности волокон бумаги в индивидуальном состоянии или в виде небольших агрегатов (рис. 2). Синтезированные описанным способом модифицированные бумаги имеют фиолетовую окраску, присущую ТНП серебра. В спектрах диффузного отражения, построенных на основании рассчитанных из коэффициентов отражения значений функции Кубелки–Мунка (F), для ТНП наблюдается широкая полоса ППР с максимумом при 610 нм (рис. 3). Отсутствие сдвига полос ППР по сравнению с раствором и сходство их формы для бумаг разного типа свидетельствуют об отсутствии принципиальных изменений состояния ТНП в твердой матрице, что определяет потенциальную перспективность применения в химическом анализе полученных материалов в качестве реактивных индикаторных бумаг. Наблюдаемые различия ширины полос для Whatman Grade 113 и Whatman Grade 1 могут быть связаны с различием коэффициентов рассеяния излучения образцами и разницей в толщине бумаг.

Показано, что спектры диффузного отражения образцов, измеренные со стороны нанесения раствора и с противоположной стороны, отличаются (рис. 4). Это обстоятельство может быть связано с ограниченным проникновением ТНП сквозь бумагу и с их более быстрой адсорбцией на той стороне, с которой производится нанесение раствора. Все это должно быть учтено при работе с бумагой в качестве тест-средства, поэтому сразу после синтеза сторону нанесения ТНП следует пометить. На рис. 5, а приведены

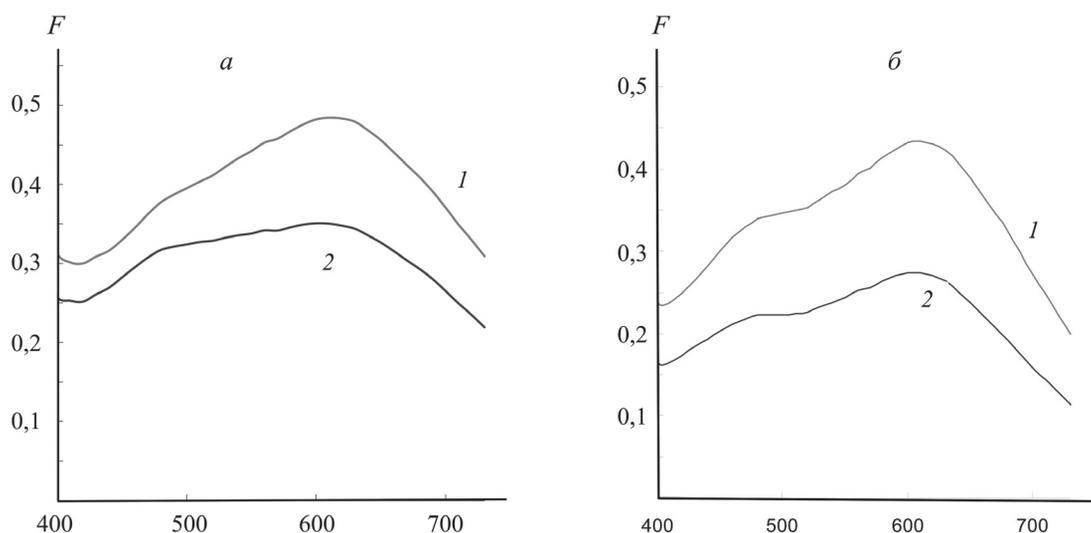


Рис. 4. Спектры диффузного отражения бумаг Whatman Grade 113 (а) и Whatman Grade 1 (б), модифицированных ТНП. Содержание ТНП 0,55 мг/г, измерение со стороны нанесения раствора (1) и с противоположной стороны (2)

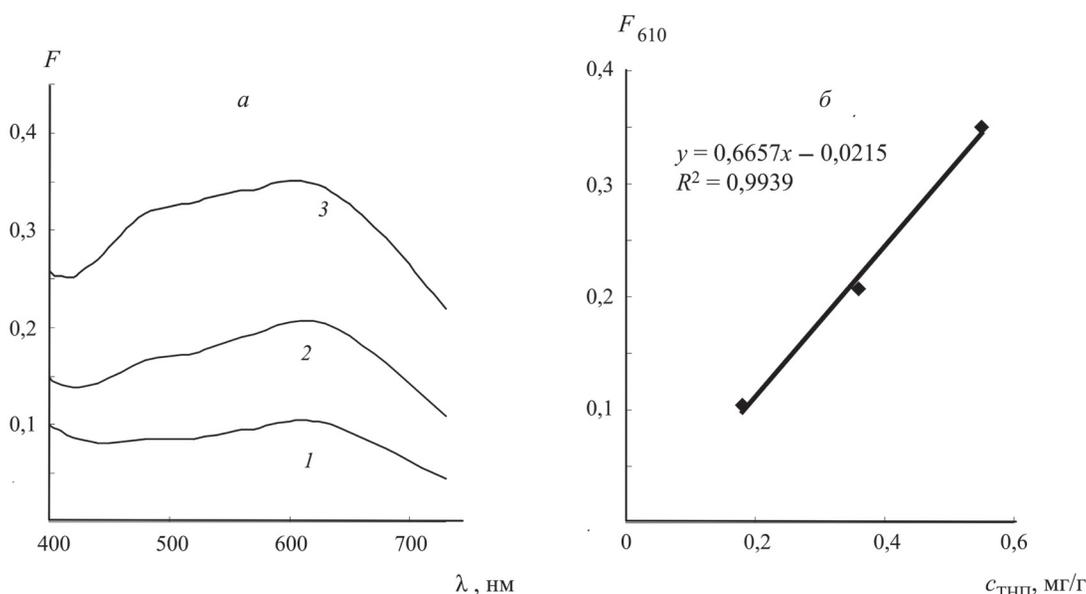


Рис. 5. Изменение спектров диффузного отражения с ростом содержания ТНП в образце бумаги Whatman Grade 113 (а) и зависимость функции Кубелки–Мунка модифицированной бумаги от содержания ТНП (б). Содержание ТНП 0,18 (1); 0,36 (2) и 0,55 мг/г (3), измерение со стороны, противоположной нанесению раствора

спектры диффузного отражения образцов бумаги Whatman Grade 113, модифицированной разным количеством ТНП. Видно, что по мере увеличения содержания на поверхности бумаги ТНП наблюдается увеличение полосы ППР в спектре. Установлено, что между величиной функции Кубелки–Мунка при 610 нм и содержанием ТНП существует корреляция, близкая к линейной (рис. 5, б). Данные факты свидетельствуют об отсутствии значительного изменения состояния ТНП по мере увеличения их содержа-

ния. Так, можно предположить отсутствие агрегации ТНП на поверхности бумаги. Найденную корреляцию между F_{610} образцов и содержанием ТНП можно использовать для выбора количества ТНП при получении образцов модифицированных бумаг с заданными спектральными характеристиками и с требуемой интенсивностью окраски. Этот момент важен с точки зрения химического анализа, поскольку хорошо известно, что интенсивность окраски того или иного тест-образца, равно как и содержание в

нем реагента, оказывает сильное влияние на метрологические характеристики определения, такие как предел обнаружения и диапазон определяемых содержаний.

Для количественной оценки равномерности распределения ТНП по поверхности бумаг и воспроизводимости нанесения реагента рассчитывали значения относительного стандартного отклонения (s_r) измерения коэффициентов диффузного отражения при 610 нм (R_{610}), для разных участков поверхности Whatman Grade 113 в пределах одного образца и для разных образцов Whatman Grade 1 в пределах одной партии. Результаты представлены в таблице, откуда видно, что при одинаковом содержании ТНП относительное стандартное отклонение R_{610} составляет 0,02–0,04 и 0,03–0,04 для бумаг Whatman Grade 113 и Whatman Grade 1 соответственно. Полученные данные позволяют также заключить, что величина s_r уменьшается с уменьшением содержания ТНП в бумаге: при снижении содержания ТНП в 3 раза (с 0,55 до 0,18) относительное стандартное отклонение также уменьшается примерно в 3 раза – с 0,04 (в среднем для трех образцов) до 0,01. Удовлетворительные значения величины воспроизводимости свидетельствуют о возможности использования полученных бумаг в качестве тест-средств при количественном или полуквантитативном определении.

Перспективы аналитического использования

Для выявления перспектив аналитического использования полученных реактивных индикаторных бумаг изучено воздействие на них растворов разных химических веществ. При выборе потенциальных определяемых веществ руководствовались соображениями возможности их адсорбции на поверхности ТНП, способностью взаимодействовать с серебром или ионами серебра, либо изменять его свойства (снижение формального редокс-потенциала за счет образования труднорастворимых соединений, образование амальгамы и т.д.). Кроме того, учитывали актуальность определения того или иного аналита с точки зрения современных задач аналитической химии.

Изучено взаимодействие бумаг, модифицированных ТНП, с катионами металлов: Ag^+ , Hg_2^{2+} и Hg^{2+} , окислителями: H_2O_2 и $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, органическими соединениями: цистеином и пикриновой кислотой, анионами: Cl^- , Br^- , I^- и S^{2-} . Установлено, что значительные цветовые изменения наблюдаются в случае Hg_2^{2+} (цвет меняется с сине-фиолетового на красно-фиолетовый) и анионов Br^- , I^-

Воспроизводимость при измерении разных участков образца Whatman Grade 113 и разных образцов Whatman Grade 1, модифицированных ТНП

Образец	s_r
Whatman Grade 113	
0,55 мг/г ТНП, образец 1	0,02
0,55 мг/г ТНП, образец 2	0,04
0,55 мг/г ТНП, образец 3	0,04
0,36 мг/г ТНП	0,01
0,18 мг/г ТНП	0,01
Whatman Grade 1	
0,55 мг/г ТНП, партия 1	0,03
0,55 мг/г ТНП, партия 2	0,04

S^{2-} (цвет меняется на желтый в случае Br^- и I^- и на грязно-желтый в случае S^{2-}). На рис. 6 приведены спектры диффузного отражения образцов в указанных случаях. На рис. 6 показано, что наблюдаемые цветовые изменения связаны с сильным гипсохромным сдвигом полосы ППР ТНП серебра и определяются, вероятно, переходом ТНП в сферические наночастицы в результате их анизотропного окисления. Можно предположить, что указанные соединения способствуют окислению преимущественно углов ТНП. На рис. 6, б приведены также спектры бумаг после обработки такими окислителями, как H_2O_2 и $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$. Видно, что под их воздействием полоса ППР ТНП не смещается, а лишь уменьшается по интенсивности, в то время как в присутствии Hg_2^{2+} наблюдается ее четко выраженное смещение. Это может быть объяснено возможностью образования амальгамы серебра на поверхности ТНП, что также способствует изменению формы частиц. С точки зрения аналитической химии любопытно, что катионы Hg_2^{2+} не вызывают подобных изменений. Это, вероятно, связано с их меньшей окислительной способностью и может быть использовано в дальнейшем для селективного определения ртути(II) на фоне ртути(I).

Таким образом, на основании проведенного исследования предложен простой способ получения реактивных индикаторных бумаг, модифицированных треугольными нанопластинами серебра, для химического анализа. Показано, что хорошими характеристиками в данном отношении обладают бумаги Whatman, позволяющие добиться равномерного распределения ТНП по их поверхности. Установлено, что модифицированные ТНП бумаги характеризуются наличием интенсивной полосы ППР в спектрах диффузного отражения, ампли-

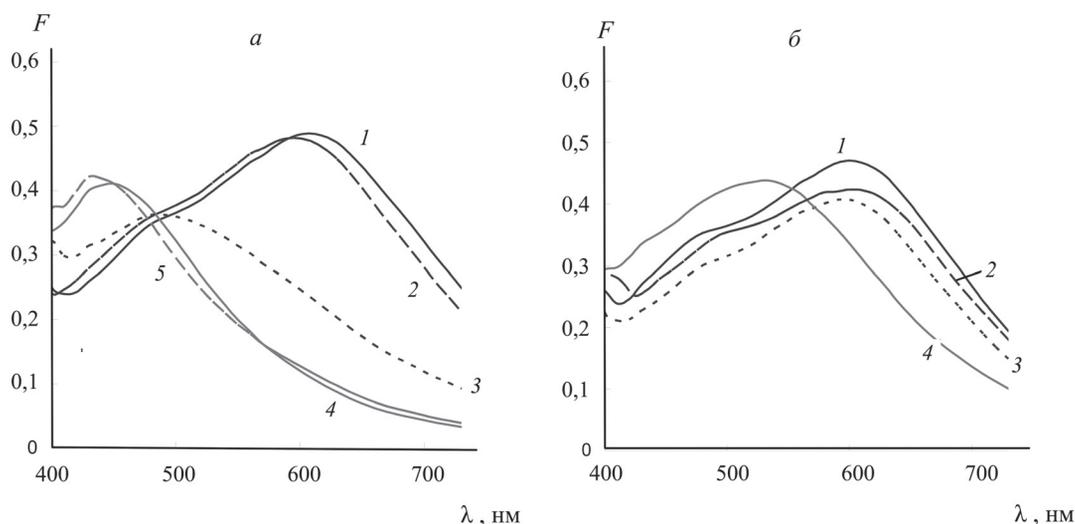


Рис. 6. Спектры диффузного отражения реактивной индикаторной бумаги с ТНП серебра до (1) и после нанесения растворов анионов (а): Cl^- (2), S^{2-} (3), Br^- (4), I^- (5); и окислителей (б): $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (2), H_2O_2 (3), Hg^{2+} (4); содержание ТНП 0,55 мг/г, масса нанесенного соединения 0,4 мкг

туда которой линейно связана с содержанием в образцах ТНП. Предварительные данные о взаимодействии ТНП в матрице бумаги с различными

соединениями на уровне 0,4 мкг свидетельствуют о перспективности использования полученных материалов в роли индикаторных тест-средств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-33-70002 мол_а_мос) и с использованием оборудования, приобретенного на средства Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунова М.О., Кононова А.Ю., Втулкина В.Э. // Вода: химия и экология. 2014. № 3. С. 84.
2. Горбунова М.О., Кононова А.Ю., Втулкина В.Э. // Вода: химия и экология. 2014. № 12. С. 83.
3. Горбунова М.О., Абакумова Ю.В. // Вода: химия и экология. 2012. № 3. С. 95.
4. Решетняк Е.А., Шевченко В.Н., Островская В.М., Бондаренко Я.А., Брылева Е.Ю. // Вода: химия и экология. 2015. № 2. С. 65.
5. Островская В.М., Середа В.В., Прокопенко О.А., Буряк А.К., Сергеев С.М., Столяров И.П. // Химия и технология топлив и масел. 2013. Т. 579. № 5. С. 49.
6. Аняри В.В., Архипова В.В., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. // ЖАХ. 2014. Т. 69. № 1. С. 4.
7. Архипова В.В., Аняри В.В., Дмитриенко С.Г. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2015. Т. 56. № 1. С. 34.
8. Teerasong S., Sani M., Numsawat P., Martchoo R., Chompoosor A., Nacapricha D. // J. Exp. Nanosci. 2015. Vol. 10. P. 1327.
9. Gavrilenko N., Saranchina N., Gavrilenko M. // Adv. Mat. Res. 2014. Vol. 1040. P. 923.
10. Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Шеголев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы. Синтез, свойства, биомедицинское применение. М., 2008.
11. Wang Z., Lina M. // Coordin. Chem. Rev. 2009. Vol. 253. P. 1607.
12. Ghosh S.K., Pal T. // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 4797.
13. Terenteva E.A., Apyari V.V., Dmitrienko S.G., Zolotov Yu.A. // Spectrochim. Acta A. 2015. Vol. 151. P. 89.
14. Arkhipova V.V., Apyari V.V., Dmitrienko S.G. // Spectrochim. Acta A. 2015. Vol. 139. P. 335.
15. Giannoulis K.M., Giokas D.L., Tsogas G.Z., Vlessidis A.G. // Talanta. 2014. Vol. 119. P. 276.
16. Jinnarak A., Teerasong S. // Sensors. Actuators. B. 2016. Vol. 229. P. 315.
17. Artemyeva A.A., Samarina T.O., Sharov A.V., Abramchuk S.S., Ovcharenko E.O., Dityuk A.I., Efimov K.M., Beklemishev M.K. // Mikrochimica Acta. 2015. Vol. 182. P. 965.
18. Kappi F.A., Tsogas G.Z., Giokas D.L., Christodouleas D.C., Vlessidis A.G. // Microchim. Acta. 2014. Vol. 181. P. 623.
19. Slocik J.M., Zabinski J.S Jr., Phillips D.M., Naik R.R. // Small. 2008. Vol. 4. N 5. P. 548.
20. Bi N., Chen Y., Qi H., Zheng X., Chen Y., Liao X., Zhang H., Tian Y. // Spectrochim. Acta. A. 2012. Vol. 95. P. 276.
21. Kado S., Furui A., Akiyama Y., Nakahara Y., Kimura K. // Anal. Sci. 2009. Vol. 25. N 5. 2. P. 261.
22. Zhang F.X., Han L., Israel L.B., Daras J.G., Maye M.M., Ly N.K., Zhong C.-J. // Analyst. 2002. Vol. 127. P. 462.
23. Tashkhourian J., Hormozi-Nezhad M.R., Fotovat M. // Spectrosc. Lett. 2013. Vol. 46. P. 73.
24. Jiang X.C., Yu A.B. // Langmuir. 2008. Vol. 24. P. 4300.

25. Heider E.C., Trieu K., Moore A. F.T., Campiglia A.D. // *Talanta*. 2012. Vol. 99. P. 180.
26. Cai H.-H., Lin D., Wang J., Yang P.-H., Cai J. // *Sens. Actuators. B*. 2014. Vol. 196. P. 252.
27. Yang X.-H., Ling J., Peng J., Cao Q.-E., Ding Z.-T., Bian L.-C. // *Anal. Chim. Acta*. 2013. Vol. 798. P. 74.
28. Apyari V.V., Dmitrienko S.G., Zolotov Yu.A. // *Sens. Actuator. B*. 2013. Vol. 188. P. 1109.
29. Аняри В.В., Дмитриенко С.Г., Батов И.В., Золотов Ю.А. // *ЖАХ*. 2011. Т. 66. № 2, С. 148.
30. Марченко Д.Ю., Петров С.И., Санджиева Д.А., Дедов А.Г. // *Химическая технология*. 2015. Т. 16. № 3. С. 186.
31. Metraux G.S., Mirkin C.A. // *Adv. Mater*. 2005. Vol. 17. P. 412.
32. Millstone J.E., Hurst S.J., Metraux G.S., Cutler J.I., Mirkin C.A. // *Small*. 2009. Vol. 5. P. 646.

Поступила в редакцию 12.09.16

PREPARATION OF REAGENT INDICATOR PAPERS WITH SILVER TRIANGULAR NANOPATES FOR THE PURPOSES OF CHEMICAL ANALYSIS

V.V. Apyari*, A.A. Furletov, A.V. Garshev, P.A. Volkov, M.O. Gorbunova, A.V. Shevchenko

*(Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia; Faculty of Materials Science; *e-mail: apyari@mail.ru)*

An impregnation method of preparation of reagent indicator papers with silver triangular nanoplates (TNP) was developed. Conditions of the modified papers preparation (type of paper, way of TNP putting, conditions of drying) allowing for acceptably uniform distribution of TNP were chosen. Spectral characteristics of prepared materials were studied. Presence of an intense TNP surface plasmon resonance band in diffuse reflectance spectra of the modified papers which is linearly related to the content of TNP in the samples as well as lability of its position and shape in presence of some substances gives rise to prospects of using prepared materials as test-tools in the chemical analysis.

Key words: reagent indicator paper, silver triangular nanoplates, surface plasmon resonance, test-tool, diffuse reflectance spectroscopy.

Сведения об авторах: Аняри Владимир Владимирович – ст. научный сотрудник кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (apyari@mail.ru); Фурлетов Алексей Алексеевич – студент химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (aleksei_furletov@mail.ru); Гаршев Алексей Викторович – вед. науч. сотр. факультета наук о материалах, кафедры неорганической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук, доцент (alexey.garshev@gmail.com); Волков Павел Александрович – науч. сотр. НИИ химических реактивов и особо чистых химических веществ (volkov-pavel-msu@ya.ru); Горбунова Марина Олеговна – доцент кафедры аналитической химии химического факультета Южного федерального университета, зав. кафедрой химии РостГМУ Минздрава России, канд. хим. наук, (mg700@mail.ru); Шевченко Анастасия Владимировна – студентка химического факультета Южного федерального университета (nastyashevchenko1995@mail.ru).