

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра аналитической химии и химической экологии

**КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ И ТЕСТ-ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ
ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОВОЛОКНА НА ОСНОВЕ
ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

магистранта 2 курса 251 группы
направления 04.04.01 – Химия

Института химии
Груновой Юлии Валерьевны

Научный руководитель:

д.х.н., профессор

подпись, дата

С.Ю.Доронин

Зав. кафедрой:

д.х.н., доцент

подпись, дата

Т.Ю. Русанова

Саратов 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Загрязнение объектов окружающей среды приоритетными токсикантами, например, тяжёлыми металлами (ТМ) является, на сегодняшний день, одной из основных экологических проблем. Хорошо известно [1], что тяжелые металлы, попадая в окружающую среду, способны накапливаться в организме человека, а их чрезвычайно низкая биодegradация приводит к серьезным нарушениям работы организма: обезвоживание, нарушение работы нервной и сердечно-сосудистой систем и т.д. [2]. В связи с этим, контроль содержания ТМ в пищевых продуктах и объектах окружающей среды является *актуальной*, а в ряде случаев сложной аналитической задачей, требующей для определения высокочувствительных методов. Однако, зачастую определение следовых количеств ТМ осложняется влиянием компонентов матрицы объекта, поэтому количественному определению ТМ должны предшествовать стадии предварительного концентрирования. Одним из способов предварительного концентрирования ионов ТМ является твердофазная экстракция с применением различных сорбентов, обладающих высокой сорбционной активностью и в качестве таких сорбентов использование нетканых материалов является наиболее распространенным.

Целью настоящей работы явилось: 1) получение высокоэффективных сорбентов на основе полиакрилонитрила (ПАН) с помощью комбинированной техники электроформования нановолокна и химической модификации его нитрильной группы; 2) исследование сорбционных свойств полученного материала по отношению к ионам Pb(II), Cu(II), Co(II), Mn(II), Fe(III); 3) разработка методик по определению тяжёлых металлов на уровне десятых и сотых долей ПДК, а также реализация этих методик на реальных водных объектах.

Структура работы. Магистерская работа состоит из введения, двух основных глав: 1 глава – литературный обзор; 2 глава – экспериментальная часть (7 разделов), списка принятых сокращений, заключения и списка

использованной литературы (61 наименование). Работа изложена на 81 странице машинописного текста, содержит 27 рисунков и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности проблемы загрязнения объектов окружающей среды тяжелыми металлами, представлено перспективное направление предварительного концентрирования приоритетных токсикантов с помощью нетканых материалов, сформулированы основные цели исследования.

В **первом разделе** представлен литературный обзор по способам получения и модификации нетканых материалов, а также проведена сравнительная характеристика сорбционных свойств нановолоконных структур различной природы.

Во **втором разделе (экспериментальная часть)** представлены используемые в работе реагенты, материалы, оборудование и методы исследования. Приведены методики приготовления исходных растворов, условия электроформования нановолокон, методики их химической модификации и результаты исследования физико-химических и сорбционных свойств исходных и модифицированных твердофазных сорбентов – нетканых материалов на основе полиакрилонитрила, полученных методом бескапиллярного электроформования. Также в разделе приведены разработки высокочувствительных методик цветометрического и ААС-определения с предварительным концентрированием тяжелых металлов на уровне десятых и сотых долей ПДК в водных средах и результаты их апробации на реальных объектах.

Получение нетканого материала на основе полиакрилонитрила методом электроформования

Для получения НМ на основе ПАН применяли бескапиллярный метод электроформования из гальванической ванны на приборе Elmarco “Nanospider NS Lab 200”.

Готовый формовочный раствор помещали в гальваническую ванну и процесс формования осуществляли в ранее установленных оптимальных условиях.

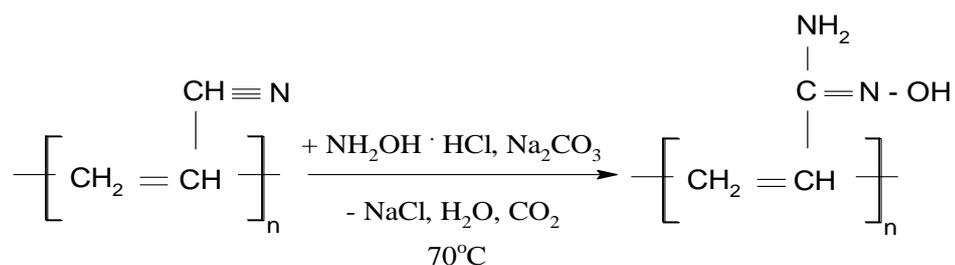
Для изучения морфологии полученных образцов материала ПАН применяли метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлено, что НМ имеет нановолоконную структуру.

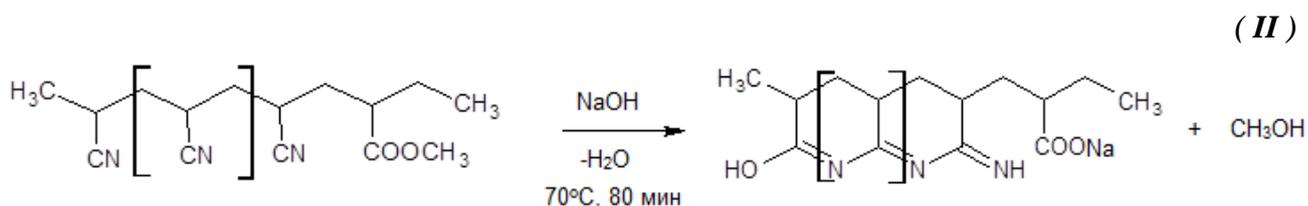
Модификация полиакрилонитрильных нановолокон растворами NH_2OH и NaOH

Предварительные исследования сорбционных свойств нетканых материалов на основе ПАН, показали, что в исходном виде (без модификации) материал практически не способен сорбировать ионы тяжёлых металлов. В связи с этим, для улучшения сорбционных свойств полученных твердофазных сорбентов проводили направленную химическую модификацию нитрильных групп ПАН-нановолокна двумя способами:

- 1) реакцией амидоксимирования нитрильных групп раствором солянокислого гидроксилamina в присутствии безводного карбоната натрия (ПАН-1) – *схема I*;
- 2) реакцией щелочного гидролиза нитрильных групп водным раствором NaOH (ПАН-2) – *схема II*.

(I)





Эффективность модификации ПАН-нановолокна гидросиламином контролировали по величине степени конверсии (C_n , %) нитрильных групп в амидоксимные:

$$C_n = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \frac{M_0}{M_1} \times 100$$

где W_0 – вес ПАН перед реакцией; W_1 – вес ПАН после реакции модификации (ПАН-1); M_1 – молекулярная масса гидросиламина (33 г/моль); M_0 – молекулярная масса мономера акрилонитрила (53 г/моль).

При определении оптимальных условий модификации также учитывали прочность нетканого материала ПАН-1, изменение его структуры и цвета в зависимости от степени конверсии.

Увеличение времени модификации ПАН и концентрации гидросиламина приводило к возрастанию степени конверсии нановолокна, в результате чего материал изменял свою окраску от белой до желто-коричневой, кроме того повышалась его хрупкость (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость качества нетканого материала от времени реакции, степени конверсии и концентрации модифицирующих реагентов

C_n , %		$c(\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl})$, М		
		0,2	0,3	0,5
τ , МИН	40	0	0	0
	60	0	0	10 (мягкий)
	80	0	3 (мягкий)	22 (мягкий)
	100	0	21 (мягкий)	45 (хрупкий)
	120	0,5	40 (хрупкий)	–

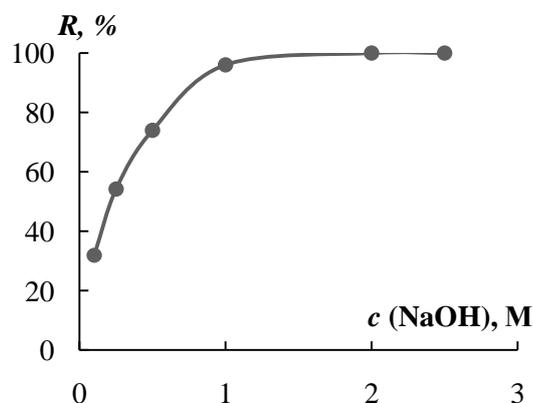


Рисунок 1 – Зависимость степени извлечения (R) ионов Pb^{2+} на ПАН-2 от концентрации модификатора (NaOH); $c(\text{Pb}^{2+}) = 20$ мг/л.

Поэтому оптимальным значением степени конверсии нетканого материала выбрана величина $C_n \sim 20\%$.

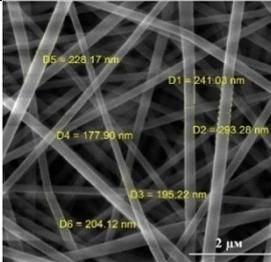
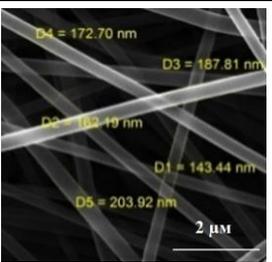
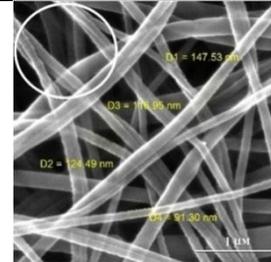
Увеличение концентрации модификатора NaOH до 0,50 М и более приводило к изменению структуры нановолокон: их поверхность становилась шероховатой, а при $c(\text{NaOH})$ 1 М и выше отмечалась его сильная усадка. При этом, степень извлечения ионов свинца достигала 100% (рисунок 1).

Оценка физико-химических свойств полученных (модифицированных) нетканых материалов

Морфологию нановолокон ПАН, ПАН-1 и ПАН-2 исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (таблица 2, №1). Нановолокна имеют схожую структуру, (округлая форма в поперечном сечении), их поверхности однородны, без видимых дефектов. Средние диаметры отдельных волокон исходного материала ПАН составляли от 170 до 300 нм, однако после реакций амидоксимирования раствором NH_2OH и гидролиза раствором NaOH размеры волокон ПАН уменьшались. Например, после обработки гидроксиламином, средний диаметр волокон ПАН-1 составил (170 ± 30) нм; при обработке 0,25 М раствором щелочи (ПАН-2) – (185 ± 32) нм, а при концентрации NaOH 0,5 М – (120 ± 30) нм.

Гидрофильность исследуемых материалов определяли по значениям водонепроницаемости и краевого угла смачивания (θ°) НМ, (таблица 2, №2). Так, для исходного материала ПАН водонепроницаемость варьировала от 104 до 150 мм водного столба, а величина краевого угла составила $53^\circ (<90^\circ)$, что обуславливает относительную гидрофильность НМ ПАН. Установлено, что после модификации гидрофильные свойства материалов повышаются ~ в 2 раза, что подтверждается величиной краевого угла $\sim 20^\circ$.

Таблица 2 – Физико-химические параметры полученных НМ ($n=3; P=0,95$)

№ п/п	Параметр	ПАН	ПАН-1	ПАН-2*
1	Микрофотографии СЭМ			
	D , нм	235 ± 65	170 ± 30	120 ± 30
2	Краевой угол смачивания θ°			
		53 ± 2	18 ± 2	16 ± 3
3	$S_{уд\ пов-ти}$, $см^2/г$	33 ± 3	10 ± 3	6 ± 2
	$V_{уд\ пор}$, $см^3/г$	$0,018 \pm 0,001$	$0,003 \pm 0,002$	$0,011 \pm 0,002$
	$R_{пор}$, нм	$2,04 \pm 0,05$	$2,38 \pm 0,03$	$2,21 \pm 0,02$

Таким образом, относительная гидрофильность свидетельствует о возможности применения НМ ПАН в качестве твердофазных сорбентов для извлечения ионов металлов как в статическом, так и динамическом режимах, обеспечивая хорошую проницаемость водных растворов солей изучаемых металлов.

Кроме того, методами Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и Дубинина-Радужкевича определены удельные площадь поверхности и объёма, средний радиус пор (таблица 2, №3). Это позволило сделать вывод о том, что ключевой вклад в сорбционную ёмкость нетканых материалов вносит не их удельная площадь поверхности, которая после модификации исходного ПАН снижалась в 2-5 раз, а количество хелатных центров сорбента (хемосорбция).

Изучение сорбционных свойств модифицированных нановолокон по отношению к ионам тяжёлых металлов: Pb(II), Cu(II), Co(II), Mn(II), Fe(III)

Сорбционные свойства модифицированных нановолокон ПАН-1 и ПАН-2 изучали в статическом режиме на примере извлечения тяжелых металлов – ионы Pb^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} . Для этого предварительно изучена кинетика сорбции указанных ионов металлов на ПАН-1 (рисунок 2а), учитывалось влияние pH (рисунок 2б) на степени извлечения и сорбционную ёмкость.

Влияние pH изучали в интервале 2,0 – 8,0. Как видно из рисунка 2б, для всех исследованных ионов металлов, кроме Fe^{3+} (pH_{opt} 3,0), наблюдались незначительные изменения степеней извлечения в диапазоне pH 4,0 – 6,0.

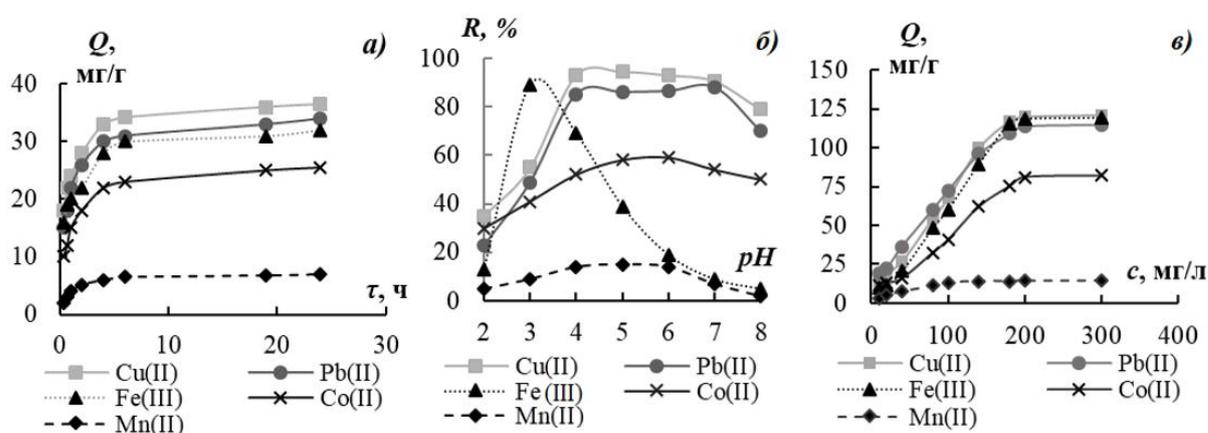


Рисунок 2 – а) Кинетика сорбции ионов тяжёлых металлов на ПАН-1. б) Зависимость степени извлечения (R) ионов металлов на ПАН-1 от pH; $c(Me^{n+}) = 10$ мг/л; $m_{НМ} = 0,030$ г.
в) Изотермы сорбции ионов тяжёлых металлов на ПАН-1.

Изотермы сорбции исследуемых ионов металлов на модифицированном волокне ПАН-2 (рисунок 3а), с учетом кинетики процесса (рисунок 3б), имеют классический Ленгмюровский вид, что указывает на мономолекулярный характер сорбции металлов, как и в случае ПАН-1 (рис. 2в). Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что сорбционные ёмкости материалов ПАН-1 и ПАН-2 увеличивались в ряду: $Mn^{2+} < Co^{2+} < Fe^{3+} < Pb^{2+} < Cu^{2+}$ и $Mn^{2+} < Co^{2+} < Cu^{2+} < Pb^{2+} < Fe^{3+}$ соответственно, что связано с различной способностью металлов вступать в реакции комплексообразования с хелатными группами волокон ПАН-1 и ПАН-2.

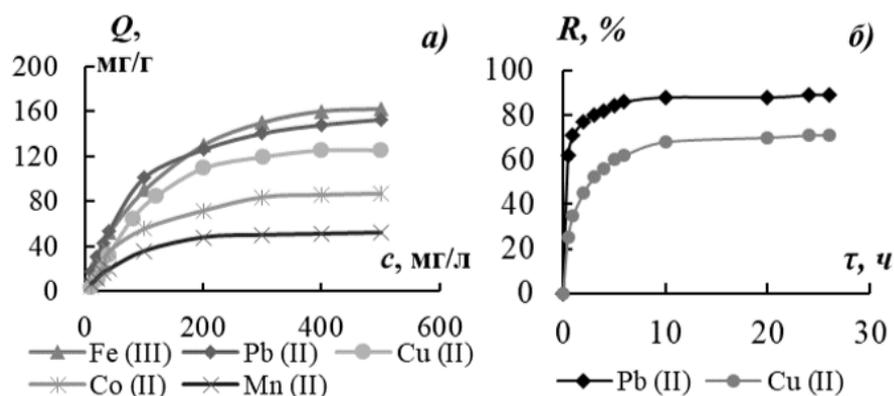


Рисунок 3 – Сорбция ионов металлов на ПАН-2: а) изотермы сорбции ионов металлов; б) кинетика сорбции ионов металлов (при $c(\text{NaOH}) = 0,50 \text{ M}$, $c(\text{Pb}^{2+}) = 20 \text{ мг/л}$).

В результате исследования установлено, что наилучшим сорбентом тяжелых металлов является нановолокно ПАН-2.

На основании этого были изучены сорбционные свойства модифицированных нановолокон в динамическом варианте, на примере извлечения материалом ПАН-2 ионов свинца.

В результате установлено, что спустя 40 – 50 прогонов раствора через фильтр степень извлечения металла достигает $\sim 98 \%$. Что позволяет значительно сократить время сорбции и, следовательно, применять НМ в качестве экспрессного тест-средства.

Влияние концентраций HCl , HNO_3 , ЭДТА на десорбцию ионов тяжелых металлов

Для реализации возможности повторного применения нетканых материалов в качестве сорбентов ТМ в рамках исследования проводилась их десорбция, на примере ионов свинца и меди для материалов ПАН-1 и ПАН-2 в статическом режиме.

На рисунке 4 представлены рассчитанные степени десорбции для ионов свинца и меди с НМ на примере ПАН-1. В качестве десорбентов применяли HCl и HNO_3 в диапазоне концентраций (0,01 – 1) М.

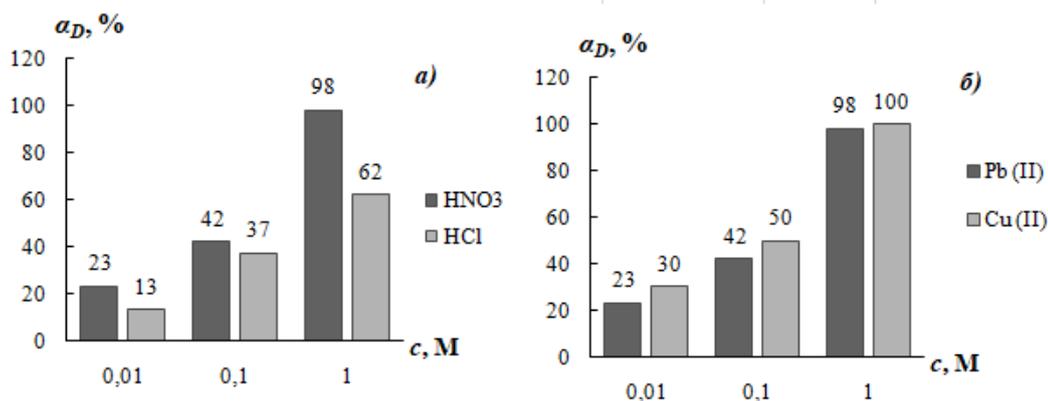


Рисунок 4 – а) Десорбция ионов свинца различными реагентами (соляной и азотной кислотой); б) десорбция ионов свинца и меди азотной кислотой:

$\tau_{\text{десорбции}} = 1$ ч; $V = 5$ мл. Материал – ПАН-1.

Увеличение концентрации кислот (рисунок 4 и 5а), с одной стороны, приводило к увеличению степеней десорбции ионов металлов изучаемых НМ, при этом 1М HNO_3 позволяла десорбировать ионы свинца и меди со степенью ~100%. С другой стороны, десорбция сильными кислотами приводила к изменению структуры модифицированного нановолоконного сорбента. Поэтому в качестве мягкого десорбирующего агента был выбран ЭДТА, в диапазоне концентраций 0,001 – 0,05 М.

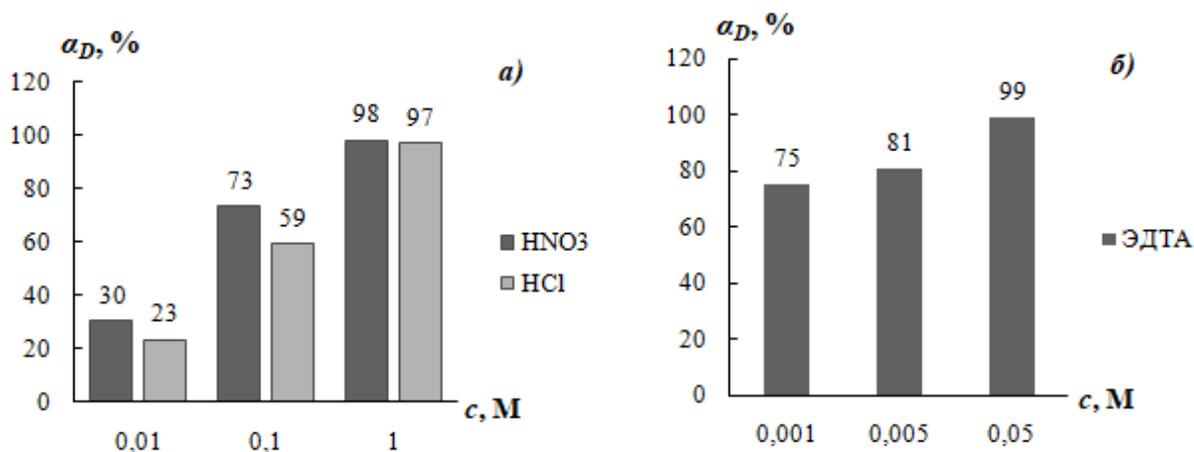


Рисунок 5 – а) Десорбция ионов свинца соляной и азотной кислотой; б) десорбция ионов свинца ЭДТА: $\tau_{\text{десорбции}} = 1$ ч; $V = 5$ мл. Материал – ПАН-2.

Из диаграммы (рисунок 5б)) видно, что с увеличением концентрации ЭДТА степень десорбции ионов металлов из ПАН-2 возрастала, при этом 0,05 М раствор ЭДТА позволил десорбировать ионы свинца со степенью ~100%.

Таким образом, экспериментально установлено, что ЭДТА является менее агрессивным и более эффективным десорбентом. При оптимальной концентрации ЭДТА, можно рекомендовать данные материалы для повторного использования в качестве твердофазных сорбентов для извлечения ионов тяжелых металлов из растворов.

Методика сорбционно-цветометрического определения ионов металлов и их суммы

Цветометрическому определению ионов ТМ предшествовало их сорбционное концентрирование неткаными материалами на основе ПАН-2. После обработки поверхности сорбентов водно-аммиачным раствором реагента ПАР, образующего устойчивые при $pH = 10$ комплексы с ионами металлов и окрашенные в контрастный по сравнению с подложкой (желтая окраска) цвет (красный для всех металлов), образцы НМ фотографировали фотоаппаратом Nikon D 5100 в специальном боксе. Затем, посредством математической обработки цифровых изображений с помощью графического редактора Adobe PhotoShop CS6 рассчитывали параметры цветности ($\Delta I_{R/G}$, S , P).

Согласно предварительно проведенным экспериментам, варьирование анализируемого объёма водного объекта в статических условиях сорбции, при постоянной массе сорбентов и концентрации металлов позволяет достигать практически 100%-ной степени извлечения нанограммовых содержаний ТМ. Для этого, при фиксированном значении массы сорбента (0,030 г) варьировали объёмы проб модельных растворов, содержащих ионы металлов, в диапазоне от 25 до 250 мл (таблица 3). Концентрацию ионов металлов выбирали, исходя из минимального значения ПДК (СанПиН 2.1.5.980-00, ГН 2.1.5.1315-03) исследуемых металлов в водах.

Согласно таблице 3, с увеличением объёма проб изучаемых ионов ТМ от 25 до 250 мл наблюдалось изменение цвета ПАН-2 (после сорбции и обработки аммиачным раствором ПАР) от жёлтого до красно-коричневого, что позволило

снизить уровень определяемых концентраций исследуемых ТМ от единиц до сотых долей ПДК.

Таблица 3 – Зависимость интенсивности окраски ПАН-2 от объёма раствора исследуемого металла ($c(Me(n)) = 1$ мкг/л)

$Me(n)$ V, мл	-	<i>Pb(II)</i>	<i>Cu(II)</i>	<i>Co(II)</i>	<i>Mn(II)</i>
25					
100					
250					

В результате, объём анализируемой воды 250 мл выбран в качестве оптимального для построения градуировочных зависимостей, а также для определения ионов ТМ в реальных объектах на уровне сотых долей ПДК.

Для количественной оценки содержания ионов металлов, после стадии их концентрирования ПАН-2 рассчитывали параметр $\Delta I_{R/G}$ по формуле:

$$\Delta I_{R/G} = I_{R/G, Me(n)} - I_{R/G, холостой}$$

где $I_{R/G, Me(n)}$ – интенсивность отношения параметров цветности R и G для пробы, содержащей ион металла, $I_{R/G, холостой}$ – соответствующая интенсивность для холостой пробы, используя для этого значения интенсивностей R, G, B .

Также строили лепестковые диаграммы, с помощью которых, вычисляли периметры P и площади S ЛД:

$$P = \sum \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(ab)} \quad S = \sum \left(\frac{1}{2} \cdot a \cdot b \cdot \sin(ab) \right)$$

где a, b – стороны треугольника; $\cos(ab)$ – \cos угла между сторонами a, b ; $\sin(ab)$ – \sin угла между сторонами a, b (соседними радиусами на лепестковой диаграмме).

Сравнение цифровых сигналов $\Delta I_{R/G}$ и S лепестковых диаграмм, используемых при построении градуировочных графиков для определения

ионов ТМ в водах, показало возможность их альтернативного применения в анализе ТМ.

Контроль правильности разработанной методики цветометрического определения осуществлён методом «введено-найдено» (таблица 4).

Таблица 4 – Контроль правильности цветометрического определения суммарного содержания ионов металлов методом «введено-найдено» ($n=3$; $P=0,95$)

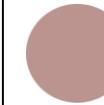
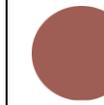
Методика	Параметр	Введено, мкг/л	Найдено, мкг/л	ПрО, мкг/л	S_r
Сорбционно-цветометрическое определение Σ металлов	$I_{\Delta R/G}$	5,00	$4,9 \pm 0,6$	2,5	0,08
		10,0	$9,9 \pm 0,7$		0,09
		20,0	$20 \pm 2,0$		0,09
	S	5,00	$4,6 \pm 0,6$	1,2	0,009
		10,0	$9,0 \pm 0,9$		0,008
		20,0	$19 \pm 1,5$		0,01

Согласно данным таблицы 4, применение цветометрических методик для определения суммарного содержания металлов с регистрацией в качестве аналитического сигнала площадей лепестковых диаграмм позволило улучшить сходимость результатов практически на порядок, о чём свидетельствуют величины S_r .

Разработанная методика сорбционно-цветометрического, а также визуального тест-определения (на нетканых материалах ПАН-2) суммы ионов металлов реализованы на реальных объектах – природных и питьевых водах: река Волга, родник Андреевский (9^я дачная), г. Саратов, пруд г. Красноармейск (Саратовская область), водопроводная вода, г. Красноармейск (таблица 5).

По цветовой шкале (таблица 5) видно, что суммарное содержание ионов металлов в роднике Андреевский превышает значение 20 мкг/л.

Таблица 5 – Результаты тест-определения суммарного содержания ионов металлов в природных и питьевых водах по цветовой шкале (нановолокно ПАН-2, после сорбции)

$c (Me^{n+})$, мкг/л	0	0,01	0,05	0,1	0,5	1	>> 20
ΣMe^{n+}							
Река Волга	Пруд, г. Красноармейск		Вода из водопровода, г. Красноармейск		Родник Андреевский		
							

ААС определение индивидуальных металлов в их смесях

Для определения ультрамалых остаточных концентраций ионов металлов после их сорбции неткаными материалами применяли метод ААС с электротермической атомизацией.

В ходе исследования, разработана и апробирована на реальных объектах – природных и питьевых водах методика ААС определения. Результаты апробации ААС определения ионов исследованных металлов в реальных объектах и правильность результатов, выявленная методом добавок, приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты определения содержания ионов металлов в природных водах методом ААС (методика № 4; $n=3$; $P=0,95$)

Объект	Металл	Найдено без добавки, мкг/л	Добавка ГСО, (x_1), мкг/л	Найдено с добавкой (x_2), мкг/л	$c_{Me} = (x_2 - x_1)$, мкг/л	S_r
Река Волга	Cu	$1,23 \pm 0,01$	5,00	$6,02 \pm 0,05$	1,02	0,009
	Pb	$2,51 \pm 0,06$	5,00	$8,06 \pm 0,08$	3,06	0,005
	Mn	$1,01 \pm 0,08$	2,00	$3,52 \pm 0,06$	1,52	0,005
	Co	$0,81 \pm 0,09$	5,00	$5,95 \pm 0,09$	0,95	0,004
Родник Андреевский	Cu	$9,0 \pm 0,1$	5,00	$15,2 \pm 0,1$	10,2	0,008
	Pb	$2,11 \pm 0,03$	5,00	$8,53 \pm 0,06$	3,53	0,006
	Mn	$72,0 \pm 0,3$	2,00	$75,0 \pm 0,09$	73,0	0,009
	Co	$1,15 \pm 0,08$	5,00	$7,12 \pm 0,07$	5,12	0,005

Пруд, г. Красно- армейск	Cu	$3,31 \pm 0,09$	5,00	$9,17 \pm 0,02$	4,17	0,01
	Pb	$0,89 \pm 0,07$	5,00	$6,03 \pm 0,09$	1,03	0,006
	Mn	$3,55 \pm 0,06$	2,00	$6,02 \pm 0,04$	1,02	0,009
	Co	$0,99 \pm 0,09$	5,00	$6,06 \pm 0,05$	1,26	0,01
Вода из водопровода, г. Красно- армейск	Cu	$1,65 \pm 0,07$	5,00	$7,99 \pm 0,03$	2,99	0,009
	Pb	$0,15 \pm 0,05$	5,00	$5,35 \pm 0,02$	0,35	0,006
	Mn	$0,18 \pm 0,09$	2,00	$2,26 \pm 0,01$	0,26	0,008
	Co	$0,09 \pm 0,04$	5,00	$5,16 \pm 0,09$	0,16	0,005

Таким образом, относительная погрешность определения ионов ТМ не превышает 8-9%. А оценка правильности полученных результатов показала, что предложенные сорбционно-цветометрические и ААС методики определения ионов металлов и их суммы в водных объектах позволяют получать достоверные результаты, не содержащие систематической погрешности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проделанной работы, методом бескапиллярного электроформования, с последующей модификацией нановолокон гидроксиламином (аминирование) и гидроксидом натрия (щелочной гидролиз), получены новые высокоэффективные сорбенты ионов тяжелых металлов (Pb(II), Cu(II), Co(II), Mn(II), Fe(III)).

2. Установлены оптимальные концентрации модификаторов, время и температура процесса модификации и ИК-спектроскопически доказано успешное его протекание.

3. Изучены физико-химические свойства исходного ПАН-нановолокна и модифицированных нетканых материалов ПАН-1 и ПАН-2. Диаметры нановолокон составили 90 – 200 нм, величины краевых углов смачивания – (18 – 53°), удельные площади поверхностей – (6 – 33 см²/г), объёмы и радиусы пор – (0,003 – 0,0018 см²/г) и (2,0 – 2,4 нм), соответственно.

4. Проведена сравнительная характеристика сорбционных свойств модифицированных нановолоконных сорбентов по отношению к ионам Pb(II), Cu(II), Co(II), Mn(II), Fe(III). Установлено, что наилучшие сорбционные свойства проявляют образцы нетканых материалов, полученные модификацией полиакрилонитрила 1,25 М раствором NaOH.

5. Установлена возможность концентрирования и последующего определения тяжёлых металлов на уровне десятых и сотых долей ПДК методами колориметрии, спектрофотометрии и ААС-определения.

6. Для реализации возможности повторного применения нетканых материалов в качестве сорбентов тяжелых металлов, изучена их десорбция на примере ионов свинца и меди. Установлено, что ЭДТА ($c = 5 \cdot 10^{-2}$ М), позволяет за минимальный промежуток времени десорбировать из матрицы НМ ионы ТМ, сохранив при этом его сорбционные свойства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будников, Г.К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем / Г.К. Будников // Соровский обозревательный журнал. - 1998. - № 5. - С. 23–29.
2. Теплая, Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (Обзор литературы) / Г.А. Теплая // Астраханский вестник экологического образования. - 2013. - Т. 1, № 23. - С. 182–192.