

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ СКАНДИЯ (III) ИММОБИЛИЗОВАННЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ РЕАГЕНТОМ**

**UDK 543.421/424**

**Гофуров Абдушукур Абдужалол угли,**

*Докторант Национального Университета Узбекистана*

*E-mail: [syntaxma94@gmail.com](mailto:syntaxma94@gmail.com), ORCID: 0009-0009-2253-6248*

*Tel: (97)746 23 52*

**Сманова Зулайхо Асаналиевна,**

*Профессор, д.х.н. Национального Университета Узбекистана*

*E-mail: [smanova.chem@mail.ru](mailto:smanova.chem@mail.ru)*

**Азимова Дилафруз Акмал кизи,**

*Докторант Национального Университета Узбекистана*

**Мусакаева Сабина Ришатовна**

*Докторант Джизакского государственного педагогического университета*

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

**Усманова Хилола Умматалиевна**

*Институт общественной безопасности Республики Узбекистан*

**Ворисова Раъно Собировна**

*Заведующий кафедрой «Естественнонаучные дисциплины» Чирчикского высшего  
танкового командно-инженерного училища*

**Абдуллаева Муборак Махмусовна**

*Профессор, д.б.н. Национального Университета Узбекистана*

**Жумаева Элеонора Шухратовна**

*Доцент, PhD, Навоийский государственный университет*

**Аннотация**

Разработана и оптимизирована экспрессная, высокочувствительная и селективная методика сорбционно-спектроскопического определения ионов скандия(III). В качестве аналитического реагента использован арсеназо III, иммобилизованный на экологически безопасный волокнистый сорбент — фиброин шёлка (отход текстильной промышленности). Методами ИК- и электронной спектроскопии изучены условия комплексообразования и физико-химические характеристики системы. Установлено, что комплекс скандия(III) с иммобилизованным реагентом образуется при оптимальном значении pH = 3,0 и демонстрирует батохромный сдвиг максимума отражения в твердой фазе ( $\lambda = 615$  нм) по сравнению с водным раствором ( $\lambda = 600$  нм). Линейный диапазон определяемых концентраций (подчинение закону Бугера–Ламберта–Бера) составляет 5–33 мкг/л; константа устойчивости комплекса  $\beta_{уст} = 5,95 \cdot 10^{10}$ . Разработанный метод успешно апробирован при анализе ионов скандия в сложных модельных смесях и реальных объектах (техногенные и сточные воды Навоийской области). Результаты валидированы методами сравнения с классической спектрофотометрией с применением критериев Стьюдента и Фишера, что подтвердило высокую точность и отсутствие систематической ошибки.

**Ключевые слова:** скандий(III), арсеназо III, иммобилизация, фиброин шёлка, сорбционно-спектроскопический метод, спектроскопия отражения, ИК-спектроскопия, сточные воды.

### DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR SCANDIUM(III) ION DETERMINATION USING AN IMMOBILIZED ORGANIC REAGENT

#### Abstract

A rapid, highly sensitive, and selective method for the sorption-spectroscopic determination of scandium(III) ions has been developed and optimized. Arsenazo III immobilized on an environmentally friendly fibrous sorbent — silk fibroin (a textile industry waste product) — was used as an analytical reagent. The complexation conditions and physicochemical characteristics of the system were investigated using IR and electronic spectroscopy. It was established that the scandium(III) complex with the immobilized reagent forms at an optimal pH value of 3.0 and exhibits a bathochromic shift of the reflection maximum in the solid phase ( $\lambda = 615$  nm) compared to the aqueous solution ( $\lambda = 600$  nm). The linear range of determinable concentrations (conforming to the Beer–Lambert law) is 5–33  $\mu\text{L}$ ; the stability constant of the complex is  $\beta_{st} = 5.95 \cdot 10^{10}$ . The developed method was successfully validated through the analysis of scandium ions in complex model mixtures and real objects (industrial and wastewater samples from the Navoi region). The results were validated by comparison with classical spectrophotometry using Student's t-test and Fisher's F-test, confirming high accuracy and the absence of systematic error.

**Keywords:** scandium(III), arsenazo III, immobilization, silk fibroin, sorption-spectroscopic method, reflection spectroscopy, IR spectroscopy, wastewater.

### IMMOBILIZATSIYALANGAN ORGANIK REAGENT YORDAMIDA SKANDIY(III) IONLARINI ANIQLASH SHAROITLARINI ISHLAB CHIQISH VA OPTIMALLASHTIRISH

#### Annotatsiya

Skandiy(III) ionlarini sorbsion-spektroskopik usulda aniqlashning ekspress, yuqori sezgir va selektiv metodikasi ishlab chiqildi va optimallashtirildi. Analitik reagent sifatida ekologik xavfsiz tolali sorbent — ipak fibroini (to‘qimachilik sanoati chiqindisi)ga immobilizatsiyalangan arsenazo III ishlatildi. IQ- va elektron spektroskopiya metodlari yordamida kompleks hosil bo‘lish sharoitlari va tizimning fizik-kimyoviy xarakteristikalari o‘rganildi. Immobilizatsiyalangan reagent bilan skandiy(III) kompleksi pH = 3,0 optimal qiymatida hosil bo‘lishi va suvli eritmadagiga  $\lambda = 600$  nm nisbatan qattiq fazada aks etish maksimumining batoxrom siljishini ( $\lambda = 615$  nm) namoyon qilishi aniqlandi. Aniqlanayotgan konsentratsiyalarning chiziqli diapazoni (Buger–Lambert–Ber qonuniga bo‘ysunishi) 5–33 mkg/l ni tashkil etadi; kompleksning barqarorlik konstantasi  $\beta_{barq} = 5,95 \cdot 10^{10}$ . Ishlab chiqilgan metod murakkab modeli aralashmalar va real obyektlardagi (Navoiy viloyatining texnogen va oqova suvlari) skandiy ionlarini tahlil qilishda muvaffaqiyatli aprobatseyadan o‘tkazildi. Olingan natijalar Styudent va Fisher mezonlarini qo‘llagan holda klassik spektrofotometriya usuli bilan solishtirilib validatsiyalandi, bu esa usulning yuqori aniqligini va tizimli xatolar yo‘qligini tasdiqladi.

**Kalit so‘zlar:** skandiy(III), arsenazo III, immobilizatsiya, ipak fibroini, sorbsion-spektroskopik usul, aks etish spektroskopiya, IQ-spektroskopiya, oqova suvlar.

**Введение:** Разработка сорбционно-спектроскопических методик для анализа ионов скандия в окружающей среде является весьма важной проблемой. Такие методы, как атомно-

абсорбционная спектроскопия, индуктивно-связанная плазменная спектроскопия и масс-спектрометрия, играют ключевую роль в обеспечении качества продукции, но не всегда доступны из-за дороговизны оборудования. Поэтому в экологическом мониторинге для оценки воздействия скандия на окружающую среду и здоровье человека необходимы доступные чувствительные методы определения содержания данного металла в природных объектах [1].

**Обзор литературы.** Несмотря на достигнутые успехи, остаются области, требующие дальнейшего изучения, особенно в отношении уменьшения влияния матрицы, повышения стабильности сорбентов и эффективного разделения сложных систем [1,2].

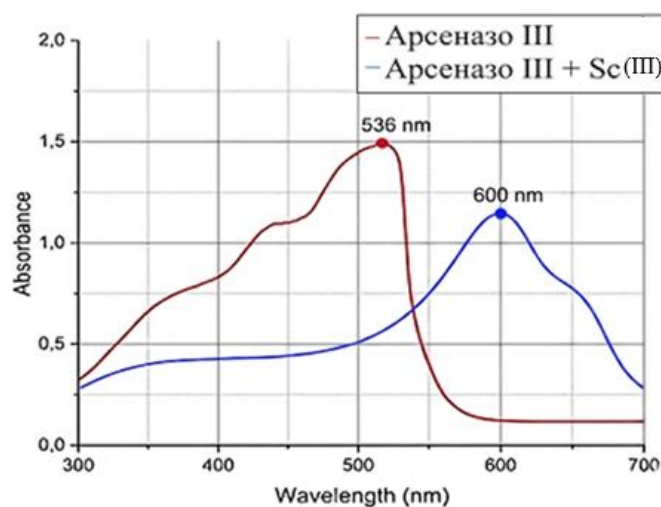
В свете растущих экологических проблем гибридные методы играют большое значение при защите окружающей среды и контроле данных ионов [3]. Разработка быстрых, высокоселективных сорбционно-спектрометрических методов анализа ионов скандия с использованием ИМОР на различных матрицах является предметом интенсивных исследований [4,5].

В сорбционно-спектрометрических методах анализа ионов скандия в качестве носителей для органических реагентов предлагаются различные силикагели, модифицированный кремнезем, природные цеолиты, полимерные мембраны и другие материалы [6-10]. Предложено много различных сорбентов в качестве матрицы для определения многих элементов [11-18], но для определения ионов скандия сорбционно-спектрометрическим методом публикаций очень мало.

**Методология исследования.** В нашей работе мы получали комплексное соединение ионов скандия(III) с реагентом арсеназо III. Определяли длину волны при которой наблюдалось максимальное светопоглощение и в дальнейшем измеряли светопоглощение комплекса при данной длине волны. Затем, опираясь на закон Бугера-Ламберта-Бера определяли область в которой концентрация комплекса изменяется пропорционально светопоглощению.

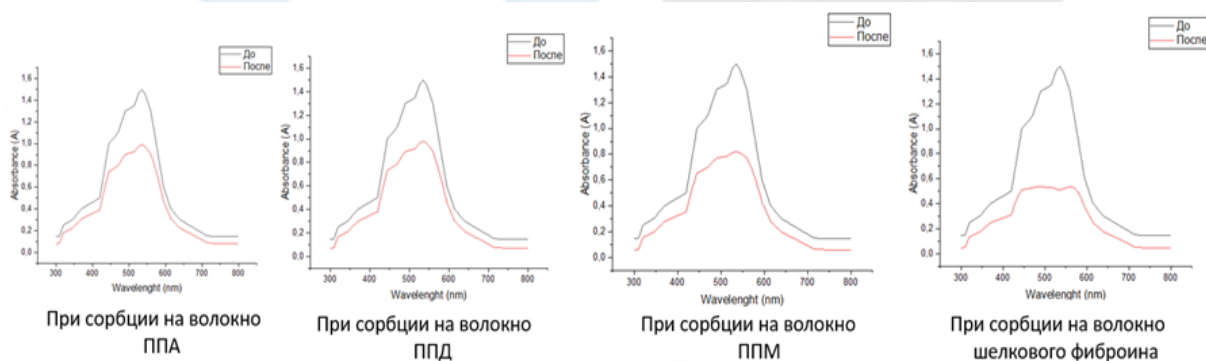
**Анализ и результаты.** В нашей работе для определения ионов скандия(III) мы использовали реагент арсеназо III. Для начала мы готовили 0,001 М раствор арсеназо (III) следующим образом: 0,0776 грамм реагента арсеназо III растворяли в 100 мл воды и получали 0,001 М раствор реагента. Затем, разбавляя его часть с водой в соотношении 1:10 готовили 0,0001 М раствор реагента и использовали его в дальнейшей работе.

Ионы скандия(III) образовали комплексное соединение с реагентом арсеназо III при участии универсального буфера при pH=3,0. Максимальное светопоглощение комплекса наблюдалось при  $\lambda=600$  нм, в то время когда для самого реагента максимальное светопоглощение было в области  $\lambda=536$  нм.



**Рис.1.** Спектры светопоглощения раствора реагента арсеназо III и комплекса данного реагента с ионами скандия(III)

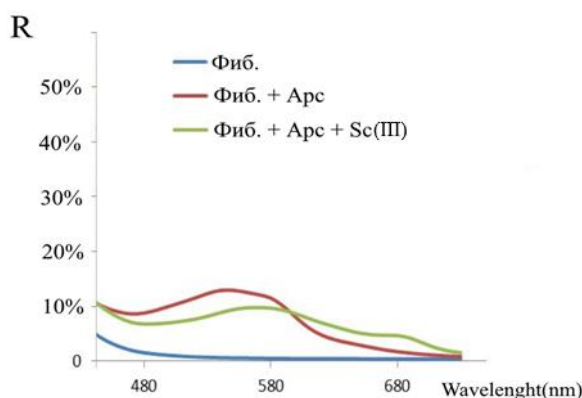
Затем мы начали подбор оптимального сорбента для иммобилизации органического реагента. В растворы органического реагента с концентрацией 20 мкг/литр объем каждого из которых составил 10 мл были помещены образцы различных волокон масса каждого из которых составляла 0,2 грамм на протяжении 25 минут. Для определения самого лучшего сорбента были проведены измерения спектров светопоглощения при  $\lambda=536$  нм.



**Рис.2.** Спектры поглощения реагента Арсеназо III до и после иммобилизации ( $C_R=20$  мкг/л,  $m_{\text{сорб.}}=0,2$  г,  $V_R=10$  мл,  $t=25$  мин).

На рис.2. приведены спектры поглощения растворов органических реагентов арсеназо III на сорбенты различной природы до и после проведения иммобилизации. Как видно из рис. 2, максимальный аналитический сигнал в спектре поглощения растворов реагента арсеназо III наблюдали при длинах волн 535 нм, соответствующий его спектрам поглощения. Уменьшение оптической плотности реагента после пропускания через носители служит основанием для вывода об его иммобилизации. Оптимальным сорбентом для иммобилизации арсеназо является сорбент фиброин шелка, являющийся отходом текстильной промышленности.

Светоотражение комплекса, полученного путем воздействия ионов скандия III на арсеназо, III иммобилизованный на шелковый фиброин показано на рисунке 3.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента светоотражения (функция Кубелки-Мунка) от длины волны реагента

Из полученных результатов можно сделать вывод, что в спектроскопии отражения на матрице Фиброин/Арс/Sc(III) батохромный сдвиг составляет  $\Delta\lambda_{\text{MeArs}} = 15$  нм. Это свидетельствует об увеличении устойчивости комплексного соединения, что обусловлено прочным закреплением органического реагента на полимерных носителях в твердой фазе а также снижением электростатических сил притяжения по сравнению с раствором.

**Таблица 1**

**Оптимизация условий комплексообразования ионов Sc (III) и с иммобилизованными арсеназо III**

Ион металла	Реагент	Цвет комплекса	$\lambda_{\text{нр}}$ , нм	pH	Максимум поглощения в водной среде, нм	Максимум спектра отражения в твердой фазе, нм	$\lambda_{\Delta\text{MeL}}$ , нм	Объем реагента, мл	Масса сорбента, г
Sc (III)	Арс.	Тёмно-синий	535	3	600	615	15	10	0,20

Как видно из данных таблицы 1 комплексы ионов скандия(III) с иммобилизованным арсеназо III имеют высокую контрастность, что даёт возможность применения данных органических реагентов в качестве чувствительных аналитических реагентов. На основании проведенных опытов были найдены оптимальные условия и разработана методика сорбционно-спектроскопического определения ионов скандия(III).

Полученное комплексное соединение подчинялось закону Бугера-Ламберта-Бера в области 5-33·мкг/литр. Что позволило определять концентрацию ионов скандия(III) в растворах с высокой точностью.

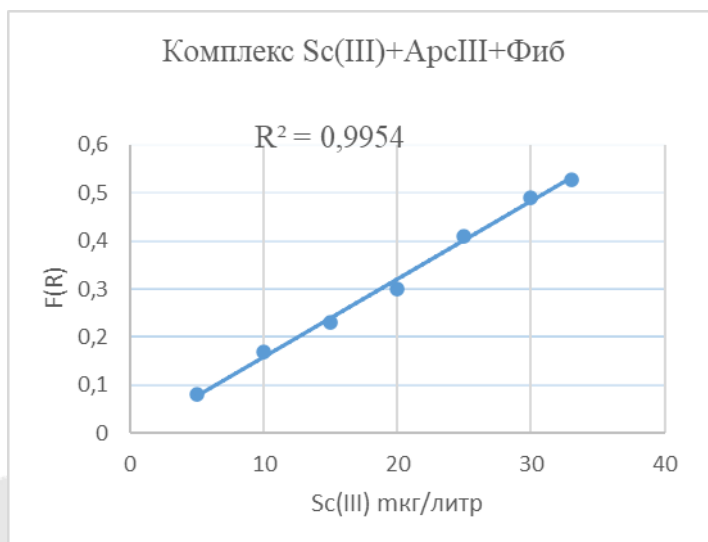


Рис. 4. Градуировочные графики для комплексов Sc(III)

Приведены результаты ИК-спектроскопических анализов определения комплексов ионов скандия с иммобилизованными арсеназо III на сорбенте фиброин шелка.

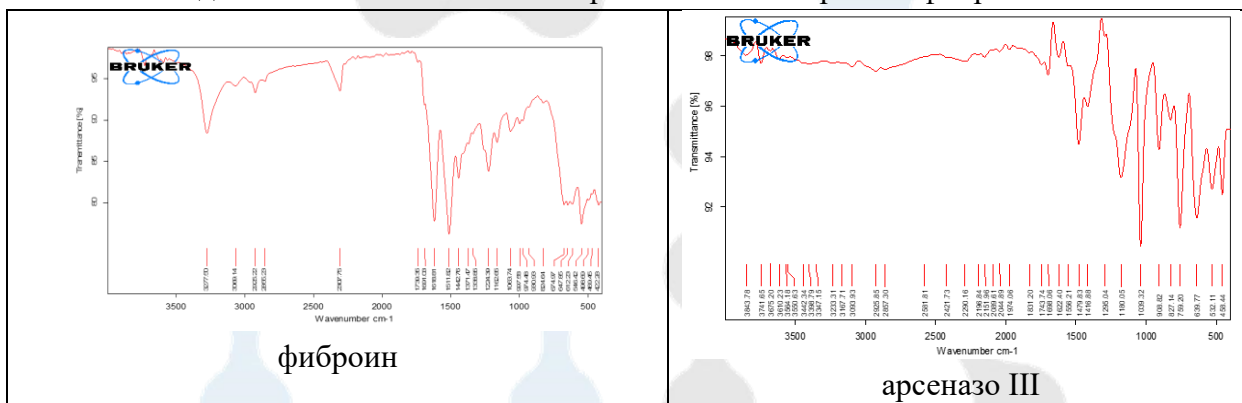


Рис.5. ИК-спектр сорбента фиброин и реагента Арсеназо III

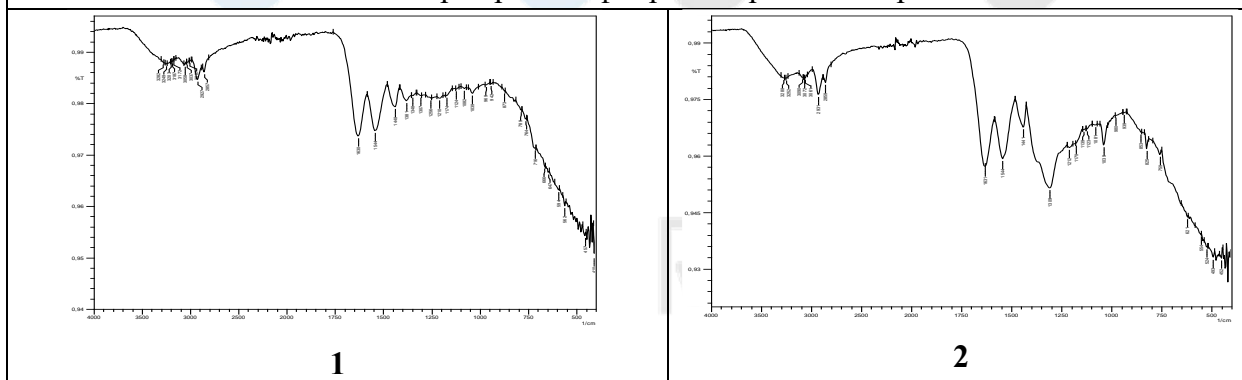


Рис.6. ИК-спектры иммобилизованной Арсеназо III (1) и комплекса иона Sc(III) с иммобилизованным арсеназо III (2).

Для определения состава комплексов скандия с иммобилизованными арсеназо на сорбенте фиброин шелка были изучены ИК-спектроскопическим методом анализа. На рисунках 5-6 представлены ИК-спектр реагента Арсеназо III, сорбента шелковый фиброин, иммобилизованного реагента и его комплекса с ионами скандия(III).

Из результатов ИК-спектроскопического анализа видно, что после иммобилизации реагента Арсеназо на сорбент шелковый фиброин наблюдается новая полоса поглощения в областях  $3053 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая связи  $-C-H (sp^2)$  ароматического кольца реагента, колебания в области  $1609-1554 \text{ см}^{-1}$  характерные для связи  $-C=C-$  ароматического кольца, полоса поглощения в области  $1309 \text{ см}^{-1}$  свидетельствует о наличии связи сульфо группы, участвующей в иммобилизации и расширение в области  $3330-3184 \text{ см}^{-1}$  характерное для межмолекулярных водородных связей через  $-OH$  группы.

Данные изменения свидетельствуют о взаимодействии ионов скандия с иммобилизованным Арсеназо на шелковом фиброине. При изучении ИК-спектра комплекса  $Sc(III)$  с иммобилизованным арсеназо наблюдаются полосы поглощения в области  $670-534 \text{ см}^{-1}$ , характерные для связи  $-O-Me$  (рис. 6).

В табл. 2 приведены результаты определения ионов скандия сорбционно-спектроскопическим методом в сложных модельных смесях, соответствующих реальным природным объектам и скандийсодержащих шламов. При проведении определения ионов скандия разработанным методом в составе модельных смесей промышленных сточных и технических вод относительное стандартное отклонение не превышает 0,111, что указывает на правильность и воспроизводимость предлагаемого метода.

Таблица 2

**Результаты определения ионов скандия в модельных смесях  
( $P=0,95; x \pm \Delta X$ )**

Природа металла	Концентрация компонентов в пробе и состав смеси, мкг	Найдено металла, мкг	n	S	$S_r$
Sc(III)	Sc(10,0)+Si(29,0)+Mg(7,0)	10,00±2,76	5	1,11	0,111
	Sc(15,0)+Fe(30,0)+Al(60,0)	15,00±3,65	6	1,47	0,098
	Sc(20,0)+Mg(1,5)+Ca(5,0)	20,00±2,33	4	0,94	0,047
	Sc(25,0)+Al(150,0)+Si(7,0)	25,00±1,24	5	0,50	0,020
	Sc(30,0)+Fe(4,0)+Si(73,0)	30,00±0,52	5	0,21	0,007

Для установления точности и воспроизводимости разработанного сорбционно-спектроскопического метода определения ионов скандия(III) иммобилизованным арсеназо III на сорбенте фиброин были проанализированы образцы сточных вод промышленной зоны Навоийской области (табл. 3.).

Таблица 3

**Сорбционно-спектроскопическое определение ионов скандия(III) в сточных водах  
методом «введено-найденно» ( $P=0,95, n=3$ )**

Определяемый ион	Система	Введено металла, мкг/л	Найдено металла, мкг/л	S	$S_r$
Sc(III)	Фиб.:АрсIII	0	6,08±0,56	0,225	0,037
		10,0	16,09±0,88	0,354	0,022
		20,0	26,08±0,84	0,339	0,013

	0	6,58±0,39	0,158	0,024
	25,0	31,57±1,65	0,663	0,021
	50,0	56,64±1,55	0,623	0,011

Из таблицы видно, что относительное стандартное отклонение разработанного метода не превышает 0,037. Оценку сходимости результатов параллельных определений для каждого образца проводили расчетом двух независимых методов – критериев Стьюдента и Фишера (табл. 4).

Сопоставление результатов анализов по критериям Фишера и Стьюдента показало, что рассчитанные значения F- и t- критериев не превышают табличных значений. Это указывает на отсутствие значимых расхождений между результатами методов и отсутствием систематической ошибки.

Полученные данные показывают, что разработанные сорбционно-спектроскопические методы определения ионов Sc (III) можно применить к анализу различных в промышленных сточных и технологических вод.

Таблица 4

**Оценка конкурентоспособности метода сорбционно- спектроскопического определения ионов Sc(III) в техногенных водах методом спектрофотометрии (СФ)  
(n=12, f1 = 11, P = 0,95)**

Объект анализа	Разработанный метод		Метод спектрофотометрии	
	Образец $\bar{x}$ , мкг/л	S <sub>r</sub>	Образец $\bar{x}$ , мкг/л	S <sub>r</sub>
Фиброин+R+Sc(III)	0,50	0,024	0,48	0,068
t-критерий	t <sub>эсп</sub> = 1,24; t <sub>табл</sub> = 2,83		t <sub>эсп</sub> < t <sub>табл</sub>	
F-критерий	F <sub>эсп</sub> = 2,83; F <sub>табл</sub> = 4,47		F <sub>эсп</sub> < F <sub>табл</sub>	

**Выводы.** На основании спектроскопических исследований определены оптимальные условия комплексообразования ионов скандия(III) с иммобилизованным арсеназо III, подобраны оптимальные условия (среда, стехиометрическое соотношение) комплексообразования иммобилизованных органических реагентов с ионами скандия(III), установлена область подчинения закону Бугера–Ламберта–Бера. При этом доказано, что ион скандия(III) образует устойчивый комплекс с реагентом арсеназо III при pH = 3. Подчинение закону Бугера–Ламберта–Бера выполняется в диапазоне концентраций 5–33 мкг/л. За счет иммобилизации повышена чувствительность реагентов при определении исследуемых ионов металлов. Константы устойчивости комплексов, образованных с участием иммобилизованных реагентов, составляют:  $\beta_{уст} = 5,95 \cdot 10^{10}$  для Sc(III). Максимумы поглощения комплексов в твердой фазе батохромно смещены на 15 нм по сравнению с раствором, что свидетельствует о уменьшении колебательных и вращательных движений в молекуле комплекса.

Использование иммобилизованных органических реагентов при выделении и концентрировании позволило добиться 10-кратного повышения чувствительности и селективности (избирательности). Результаты подтверждены методом валидации, при этом

расчетные значения F- и t-критериев не превысили критических значений, что доказывает отсутствие систематической ошибки.

### Список литературы

1. Pyrzynska, K., & Sentkowska, A. (2022). Biosorption of scandium: A review of performance and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107931.
2. Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 2012; 133–164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
3. Yu G., Chen F., Zhang H., Wang Z. Pollution and health risk assessment of heavy metals in soils of Guizhou, China. *Ecosystem Health and Sustainability* 2020; 7(1). <https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1859948>.
4. Золотов, Ю. А., Цизин, г. и., Дмитриенко, С. Г., Моросанова, Е. И. Сорбционное концентрирование микрокомпонентов из растворов. Применение в неорганическом анализе //–М.: Наука.– 2007.– 320с.
5. Sayfiyev M.N., Nazarova M.A., Boqiyev Q.S., Ziyayev D.A., Gofurov A.A. Determination of Zinc ion by inversion voltammetric method from the composition of wastewater using electrochemical sensor. *International Journal of Materials and Chemistry* 2024, 14(2): 19-23.
6. Рахимов С.Б., Раджабова К.К., Касимова Х.Р., Мадатов У.А., Халилова Л.М., Гофуров А.А. Переработка волокон шелковых отходов и их использование в качестве экологического сорбента для обнаруживания ионов тяжелых металлов в сточных водах. *Узбекский химический журнал*, 2025, №5, 74-80
7. Данилин Л. Д. и др. Ионообменные тонкопленочные сорбенты для концентрирования элементов в рентгенофлуоресцентном анализе // *Российский химический журнал*. – 2001. – Т. 45, № 5-6. – С. 64 – 72.
8. Usmanova K.U., Bobojonov K.Sh., Smanova Z.A., Abdullayeva M.M., Tojiboyeva F.M., Atamurodova M.Sh., Akhmadjonov U.G., Gofurov A.A. Priority toxic metals arsenic, cadmium, mercury and lead in ecosystems: A review of sources, toxicity and regulatory approaches. *Chemical review and letters*, 8(2025) 883-902.
9. Гофуров А.А., Сманова З.А., Юсупова З.У. Сорбционно-спектроскопическое определение ионов скандия (III) с помощью реагента арсеназо III, иммобилизованного на волокно шелкового фиброина. *Central Asian Food Engineering and Technology*. 2026. Volume 4, Issue 4. –P. 301-305.
10. Дмитриенко С.Г. Синтез и исследование сорбционных свойств полимеров // *Журн.аналит.химии*.-2006.- Т.61.- №1.- с. 18-24.
11. Золотов Ю.А., Иванов В.М., Амелин В.Г. Химические тест-методы анализа. // М., Наука- 2002.-152 с.
12. Bobojonov, B., Madatov, U., Usmanova, X., Zulayho, S., Ahmadjonov, U., Demir, M., & Berdimurodov, E. (2024). Efficient and cost-effective determination of Cr(VI) ions using immobilized 4,5-dihydroxynaphthalene-2,7-disulfonic acid disodium salt dihydrate: a novel analytical reagent with high selectivity and sensitivity. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(20), 9528–9548. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2235562>
13. Bobojonov, K. Shavkatovich, Usmanova, K. Umatalievna, Smanova, Z. Asanalievna, Todjiyev, J. Nasiriddinovich, Gafurova, D. Anvarovna, Abdullaeva, M. Maksumovna, Tursunqulov, J.

- Baxtiyorovich, Sapaev, I. Bayramdurdiyevich, Fathullaeva, M. and Yuldasheva, U. Asanaliyevna (2025). Sorption–fluorescence determination of aluminum(III) and gallium(III) using immobilized organic reagents. *Chemical Review and Letters*, 8(6), 1295-1306. doi: 10.22034/crl.2025.540565.1674
14. Usmanova, K., Smanova, Z., Ermatova, A., Bobojonov, K., Akhmadjonov, U., & Nasirdinov, D. (2025). Sorption–spectrophotometric determination of lead and zinc ions in agroecosystem samples using immobilised sulfarsazen. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/03067319.2025.2573779>.
15. Nguyen T, Vo T, Tran H. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of factors influencing biosorption efficiency. *Chemosphere*. 2022;303:134958.
16. Singh P, Kumar S. The status of scientific development on biosorption of heavy metals at laboratory and pilot scale: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;12(4):113456.
17. Taresh R. R., Roushani M., Karazan Z. M. Selective electrochemical detection of chromium ions in water samples by poly(rutin)/carbon black–chitosan nanocomposite-modified glassy carbon electrode. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2024; 54(7), 1627–1636. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-02054-z>
18. Umataliyevna, U. Khilola, Bobojonov, K. Shavkatovich, Asanaliyevna, S. Z., Muxsimovna, A. M. , Mamadjanovna, T. F. , Shavkatovna, A. M. , G'ulom o'gli, A. U. and Abdualol o'g'li, G. A. (2025). Priority toxic metals arsenic, cadmium, mercury, and lead in ecosystems: A review of sources, toxicity, and regulatory approaches. *Chemical Review and Letters*, 8(5), 883-902. doi: 10.22034/crl.2025.526745.1616