*На правах рукописи*

**ЩЕМЕЛЕВ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ**

# ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТРИЦ СОСТАВА «СШИТЫЙ ПОЛИВИНИЛОВЫЙ СПИРТ – МАГНЕТИТ»

Специальность – 1.4.2 Аналитическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Москва

2026

Работа выполнена на кафедре аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель:**

**Иванов Александр Вадимович**
доктор химических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», химический факультет, доцент по кафедре аналитической химии

**Официальные оппоненты**

**Доронин Сергей Юрьевич**
доктор химических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», институт химии, профессор по кафедре аналитической химии и химической экологии

**Проскурнина Елена Васильевна**
кандидат химических наук, доктор медицинских наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН», главный научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита состоится 19 мая 2026 г. в. 15:00 на заседании диссертационного совета 01.4.002.92 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской Академии Наук по адресу 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться у Ученого секретаря ИОНХ РАН (Ленинский просп., д. 31) и на сайте ИОНХ РАН: https://igic.ras.ru/news/detail.php?nid=397&binn_rubrik_pl_news=168

Автореферат разослан 17 апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук М.С. Доронина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время одной из ключевых задач аналитической химии является развитие внелабораторных методов анализа, обладающих такими преимуществами по сравнению с существующими классическими методами, как компактность оборудования, его низкая стоимость, экологическая безопасность и, самое главное, простота использования, которая способствовала бы их применению лицами без профессиональной химико-аналитической подготовки. Некоторые исследователи пытаются решить данную задачу путем миниатюризации уже существующих приборов, однако высокая стоимость приборов и сложности в их квалификационном освоении не делают данный прием широко распространенным. Наибольшую перспективность в развитии представляют собой химические сенсоры, которые являются миниатюрными и дешевыми средствами современного химического анализа. Так, в быту широко используются различные устройства, такие как портативные глюкометры, алкотестеры, pH-метры и пр.

Среди них отдельно можно выделить оптические сенсорные системы, для применения которых не требуется конструирования дорогих чувствительных элементов и которые проще миниатюризировать. Однако зачастую авторы при создании селективных сенсоров для определения тех или иных веществ прибегают к помощи органических реагентов, прямо или косвенно приводящих к формированию аналитического сигнала. Это может усложнять использование таких сенсоров в быту и являться серьезным фактором, повышающим их стоимость и массовое распространение.

В течение последних лет большой интерес химиков-аналитиков представляют оптические сенсорные системы, основанные на применении набухающих гидрогелей и композитов на их основе в качестве чувствительных элементов. В этом случае воздействие аналита приводит к изменению структуры сенсорной матрицы, что меняет её оптические свойства. К таким сенсорным системам или элементам относят фотонные кристаллы, голографические пленки, сферические полимерные или композитные гранулы, принцип действия которых основан на использовании чувствительных полимеров, способных изменять свой объем под воздействием определяемых веществ. Общим преимуществом таких сенсоров является сведение к минимуму или же полное отсутствие применения дорогостоящих реагентов, а также принципиальная возможность применения современных смартфонов, снабженных цифровыми фотокамерами, в качестве измерительных устройств. При этом аналитическим сигналом может служить не только изменение цвета, но и другие факторы, такие как изменение объема сферической гранулы и пр.

В связи с этим актуальной задачей оказывается поиск полимера, способного селективно по отношению к определяемому веществу менять свой объем в сложном по составу объекте. Для этого возможно варьирование таких параметров, как природа полимерной цепи, природа функциональных групп полимера, природа окружающей полимер среды и пр. Другой не менее важной задачей является создание системы с заданными оптическими свойствами, изменение которых связано с изменением степени набухания чувствительного полимера.

**Целью** настоящей работы является создание сенсорных систем на основе производимого в широких масштабах и доступного поливинилового спирта и композита «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» для определения водорастворимых углеводов и спиртов в реальных объектах. Для достижения поставленных задач были решены следующие задачи:

1. Получить сшитый эпихлоргидрином поливиниловый спирт и изучить его свойства по отношению к растворам водорастворимых углеводов;
2. Сравнить степени набухания полученного поливинилового спирта в растворах углеводов со степенью набухания некоторых других гидрофильных полимеров, таких как катиониты типа КУ-2 и КБ;
3. Повысить чувствительность и селективность сшитого поливинилового спирта и композитных гранул на его основе к глюкозе, фруктозе, сахарозе и лактозе путем его импрегнирования тетраборатом натрия для определения данных аналитов в пищевых продуктах;
4. Создать композитные пленки на основе сшитого поливинилового спирта и проверить возможности применения цветометрии для регистрации их аналитического отклика;
5. Апробировать предложенные сенсорные матрицы на реальных объектах.

В качестве **объектов исследования** изучены сферические гранулы из сшитого поливинилового спирта, а также сферические композитные гранулы и пленки состава «сшитый поливиниловый спирт – магнетит», синтезированные с разной степенью сшивки полимера и количеством частиц магнетита в них.

**Научная новизна** работы заключается в:

1) разработке способа получения композитных сенсорных матриц на основе сшитого поливинилового спирта путем осаждения частиц $Fe_3O_4$ внутри геля сшитого полимера в атмосфере аммиака;
2) развитии и усовершенствовании метода оптической микрометрии для целей более селективного и чувствительного определения растворимых углеводов путем импрегнирования чувствительного полимера раствором тетрабората натрия;
3) создании нового подхода к регистрации аналитического отклика композитных материалов – аналогов фотонных кристаллов, способных менять цвет, с применением метода цифровой цветометрии.

**Практическая значимость** работы может быть выражена следующими положениями:

1. Разработан и апробирован подход к определению суммарного содержания глюкозы и фруктозы в натуральном меде и сиропах с применением сенсорных гранул и пленок состава «сшитый ПВС – магнетит», который является более дешевым и простым по сравнению с существующими методами химического анализа.
2. Показана принципиальная возможность создания новых сенсорных систем на основе композитных материалов состава «набухающий полимер – частицы металла / оксида металла» для целей внелабораторного анализа.

3. Показаны преимущества цветометрического измерения и обработки отклика композитных пленок на аналиты (углеводороды, спирты, сильные электролиты) с помощью смартфона.

**Положения, выносимые на защиту**:

1. Методы формирования композитных сферических гранул и пленок на основе сшитого поливинилового спирта позволяют создавать новые оптические сенсорные системы, которые могут в перспективе использоваться для внелабораторного анализа.
2. Предложенные конструкции установок оптических сенсорных систем с применением композитных чувствительных элементов позволяют осуществлять экспресс-анализ водных и водно-органических систем с более высокой воспроизводимостью аналитического сигнала как в рамках метода оптической микрометрии, так и с применением цифровой цветометрии как способа регистрации аналитического сигнала.
3. Импрегнирование сенсорной матрицы на основе сшитого поливинилового спирта раствором тетрабората натрия в оптимальных условиях (концентрации тетрабората натрия, времени контакта фаз, кислотности раствора, концентрации частиц $Fe_3O_4$ в геле) снижает предел обнаружения водорастворимых углеводов с 100 до 7,9 ммоль/дм$^3$, повышает селективность определения глюкозы и фруктозы в присутствии сахарозы, при этом наиболее воспроизводимые результаты наблюдаются при применении сенсорных композитных материалов состава «сшитый поливиниловый спирт – магнетит».
4. Апробация предложенных подходов при анализе образцов натурального мёда и антисептиков для рук демонстрирует селективность и хорошую правильность определения аналитов методами оптической микрометрии и цифровой цветометрии.

**Степень достоверности**

Достоверность полученных данных подтверждается методами статистической обработки получаемых результатов. В качестве способов валидации разработанных методов анализа в рамках настоящей работы используются метод «введено-найдено» и анализ исследуемых образцов независимыми методами, предложенными нормативной документацией (ГОСТ, МУ и пр.).

**Соответствие паспорту научной специальности**

Диссертационая работа соответствует паспорту специальности 1.4.2 «Аналитическая химия» по следующим областям исследований: методы химического анализа (химические, физико-химические, атомная и молекулярная спектроскопия, хроматография, рентгеновская спектроскопия, масс-спектрометрия, ядерно-физические методы и др.), аналитические приборы, анализ пищевых продуктов.

**Личный вклад автора**.

В основу научно-квалификационной работы были положены результаты экспериментальных исследований, проведенных в период с 2019 по 2025 гг. на

кафедрах аналитической и физической химии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Автором лично осуществлялась общая постановка задач исследования, поиск, систематизация и анализ литературы по теме исследования, организация и проведение экспериментов, получение, обработка и интерпретация результатов экспериментов, подготовка материалов к публикации и представлению в качестве докладов на конференциях, формулирование научных положений, выносимых на защиту. Отдельные этапы исследования были выполнены при участии студентов: А.В. Староверовой, Д.С. Бельковой, Д.С. Хасанова, М.А. Смирновой, Т.В. Зиновьева и Н.А. Зиновьева, у которых автор был соруководителем курсовых и дипломных работ.

**Объем и структура работы**

Представленная работа изложена на 149 страницах машинописного текста, иллюстрирована 44 рисунками и 14 таблицами. Работа состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, обсуждения полученных результатов, выводов и списка использованных источников и литературы, содержащего 305 работ зарубежных и отечественных авторов.

**Публикации и сведения об апробации работы**

По материалам диссертации опубликовано 10 статей, в том числе 8 статей в рецензируемых научных изданиях, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в ФГБУН Институте общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН. Опубликованы 12 тезисов докладов на российских и международных конференциях.

Основные результаты были представлены на всероссийских и международных конференциях: XXXI, XXXII Российских молодежных научных конференциях с международным участием «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (РФ, Екатеринбург, УрФУ, 2021, 2022 г.), XXVII, XXVIII Международных ежегодных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (РФ, Москва, МГУ, 2020, 2021 г.), международной научно-технической конференции молодых ученых «Инновационные материалы и технологии – 2021» (Беларусь, Минск, БелГТУ, 2021 г.), IX Всероссийской конференции с международным участием «ФАГРАН – 2021» (РФ, Воронеж, ВГУ,2021 г.), IV Съезде аналитиков России (РФ, пос. Московский, Московская обл., НСАХ РАН, 2022 г.), XIII, XIV и XV Конференциях молодых ученых по общей и неорганической химии (РФ, Москва, ИОНХ РАН, 2023 г., 2024 г., 2025 г.).

**Гранты**

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 18-03-00397.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описана актуальность темы научно-квалификационной работы, сформулированы цель и поставленные задачи, раскрыта научная новизна работы, показана ее научно-практическая значимость, обозначены степень достоверности, апробация работы, структура и объем.

### Обзор литературы

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме исследования. Рассмотрены различные набухающие и ненабухающие полимерные матрицы, нашедшие свое применение в аналитических целях для разделения и концентрирования определяемых веществ, в качестве неподвижных фаз в различных вариантах жидкостной хроматографии и в качестве чувствительных матриц в сенсорах для простого экспрессного определения аналитов в объектах окружающей среды. Особое внимание уделено композитным материалам состава «сшитый полимер – наночастицы металлов / оксидов металлов», являющихся весьма перспективными материалами для применения в сенсорных уствройствах в качестве чувствительного элемента. Рассмотрены современные способы регистрации аналитического сигнала оптических сенсорных систем, такие как измерение диаметра колец Дебая для 2D фотонно-кристаллических сенсоров, метод оптической микрометрии и метод цифровой цветометрии с применением бытовых устройств (цифровых фотокамер, камер смартфонов, сканеров и пр.) для регистрации отклика. На основании проанализированных литературных источников сделаны выводы об актуальности темы и дальнейших путях ее развития.

### Экспериментальная часть

**Во второй главе** описана используемая аппаратура, а также методики эксперимента.

Объектами исследования в настоящей работе являлись чувствительные матрицы на основе сшитого поливинилового спирта (ПВС), а также на основе композитов состава «сшитый ПВС – магнетит». Чувствительный полимер получали в виде сферических гранул и пленок толщиной около 1 мм путем сшивки ПВС эпихлоргидрином после предварительного подщелачивания водного раствора полимера. Затем полученные пленки и гранулы импрегнировали растворами, содержащими соли железа (III) и железа (II) в мольном соотношении 2:1. Импрегнированные пленки помещали в эксикатор, заполненный парами аммика, где происходило формирование частиц магнетита по реакции соосаждения.

Контроль сшивки ПВС эпихлоргидрином осуществляли методом ИК-спектроскопии с помощью ИК-Фурье спектрометра Vertex 70 (Bruker), снабженного системой продувки ультрасухим воздухом и приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) GladiATR (Pike Technologies) с алмазным кристаллом.

Магнитные свойства композитных материалов исследовали на установке «весы Фарадея», изготовленной в ИХТТ УрО РАН. Кривые намагниченности регистрировали в магнитных полях с максимальной напряженностью 18 кЭ при

комнатной температуре. При этом погрешность измерения магнитного момента составляла 3%, погрешность измерения приложенного магнитного поля – ± 100 Э.

Содержание железа в сенсорных пленках определяли путем растворения частиц $Fe_3O_4$ в пленках с последующим фотометрическим определением железа (III) с помощью реакции с сульфосалициловой кислотой и железа (II) по реакции с о-фенантролином.

Аналитический отклик сенсорных полимерных гранул регистрировали методом оптической микрометрии, определяя объем гранул как набухших в фоновом растворе, так и в исследуемых растворах. Эксперимент проводили, либо дожидаясь равновесной степени набухания гранул в исследуемых растворах, либо регистрируя отклик через определенные промежутки времени.

Для регистрации аналитического отклика пленок из сшитого ПВС, содержащих в своем составе частицы магнетита, были рассмотрены 2 варианта конструкции измерительного прибора: с фотосъемкой чувствительного тела в проходящем свете и съемкой чувствительного тела в отраженном свете. На рисунке 11 изображена установка для осуществления съемки в проходящем свете. Ее основными узлами являются смартфон – 5 и штатив – 1, снабженный источником освещения – 2. Измеряемый образец помещается на столик – 3. Специальное крепление для смартфона – 4 позволяет использовать для работы смартфоны любых габаритов. Особое внимание в конструкции ячейки следует уделить расположению источника света. В данном случае объектив камеры расположен напротив источника излучения, поэтому такой вариант измерительного устройства можно рассматривать как альтернативу спектрофотометрическому анализу.

**Рис. 1.** Установка для цветометрического исследования пленок в проходящем свете. Пояснения в тексте

Принципиальное отличие установки для съемки в отраженном свете заключается в том, что источник света направлен в ту же сторону, что и объектив фотокамеры: на исследуемый объект, как показано на рисунке 2. А применение нескольких точечных светодиодов, расположенных вокруг объектива камеры, позволяет избежать бликов света на исследуемом объекте, искажающих результаты измерений.

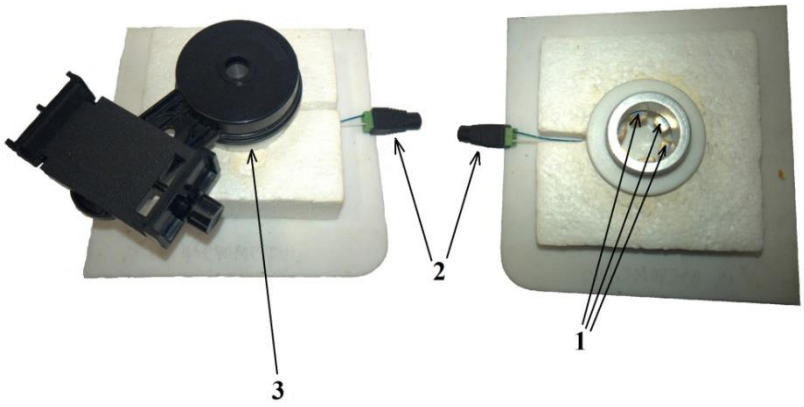


**Рис. 2.** Установка для съемки композитных пленок в отраженном свете: *1* – светодиоды, *2* – гнездо для питания светодиодов, *3* – держатель для смартфона

Полученные фотоизображения пленок обрабатывали в программе ImageJ, где находили цветовые координаты исследуемых пленок, которые использовали для получения равновесных и кинетических зависимостей. Величину аналитического сигнала рассчитывали по следующей формуле:

$$Ar = \sqrt{(R_0 - R)^2 + (G_0 - G)^2 + (B_0 - B)^2}\,, \qquad (1)$$

где $R_0$, $G_0$, $B_0$, $R$, $G$, $B$ – цифровые значения интенсивностей красного, зеленого, синего цветов для композита в воде и анализируемом растворе соответственно. Расчет сигнала данной формуле позволяет измерять одновременно холостую и анализируемую пробу в одинаковых условиях. Кроме того, данный способ позволяет работать с разным композитами, полученными в пределах одной партии, что позволяет учитывать некоторые изменения в составе получаемых композитов.

## Результаты и их обсуждение

**Третий раздел** работы посвящен исследованию свойств полученных сенсорных элементов на основе сшитого поливинилового спирта. Методом ИК-спектроскопии показано, что при подщелачивании раствора исходного ПВС часть щелочи неизбежно расходуется на гидролиз ацетатных групп, эта часть зависит от доли ацетатных групп в исходном сырье. Косвенно это подтверждается возрастанием интенсивностей полос, соответствующих колебаниям гидроксильных групп. Наиболее ярко эффект заметен при сшивке ПВС марки 18/11, так как в этом случае количество ацетатных групп выше (около 14,5 %). В то же время процесс сшивки в соответствие с приведенным выше уравнением реакции уменьшает общее число гидроксильных групп в 2-х 1,3-диольных фрагментах на 1. Поэтому уменьшение интенсивности полосы валентных колебаний гидроксильных групп при переходе от ПВС-20.15 к ПВС-20 свидетельствует об увеличении степени сшивки полимера при увеличении доли исходного ПВС в прекурсоре. При 1080 $см^{-1}$ заметно резкое увеличение интенсивности полосы, что обусловлено образованием поперечных сшивок за счет получения групп простого эфира.

Впоследствии сферические полимерные гранулы были использованы для получения композитных гранул состава «сшитый ПВС – магнетит» с разным содержанием частиц $Fe_3O_4$. Для оценки количества магнетита в полученных композитных гранулах были получены кривые их намагниченности. Установлено,

что массовая доля магнетита в высушенных гранулах, которая составила 0.44, 1.54 и 3.63 %, что соответствует концентрациям солей железа (III) в прекурсоре 0.02, 0.05 и 0.10 моль/дм$^3$.

Для получения чувствительных пленок в качестве прекурсора был выбран ПВС марки 18/11, так как свойства сшитого полимера на его основе ранее были хорошо изучены. По аналогии с гранулами, для обеспечения более высокой чувствительности были синтезированы пленки из ПВС-20.15. Средняя толщина пленок составила около 0.97 мм, что является весьма удобным параметром для дальнейшей их эксплуатации. При выращивании частиц $Fe_3O_4$ в пленках в качестве были выбраны концентрации солей железа (III) и железа (II) 0.10 и 0.05 моль/дм3 соответственно. Однако концентрация раствора аммиака, расположенного на дне эксикатора была уменьшена в 10 раз для получения более мелких по размеру частиц. Оптические свойства полученных образцов были исследованы методами спектрофотометрии и спектроскопии диффузного отражения. Представленные на рисунке 3 спектры пропускания демонстрируют, что полученные пленки обладают свойствами, присущими коллоидным системам, а именно монотонным возрастанием светопропускания. Причем, в соответствии с основным законом светопоглощения, чем выше концентрация частиц $Fe_3O_4$, тем меньше светопропускание.

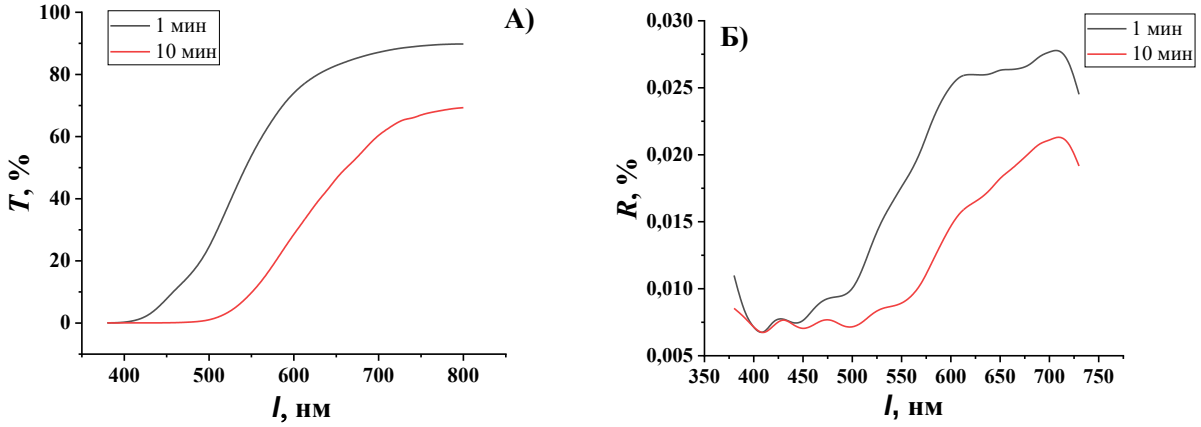


**Рис. 3.** Спектры пропускания (А) и отражения (Б) пленок, полученных выдерживанием в течение разного времени в солях железа: $C_{Fe(III)}$ = 0.10 моль/дм$^3$, $C_{Fe(II)}$ = 0.05 моль/дм$^3$, мощность УЗ излучения 60 Вт, частота 40 кГц.

На спектрах диффузного отражения в коротковолновой области на спектрах наблюдается несколько локальных максимумов при длинах волн 428.2 и 474.5 нм. Это свидетельствует о возможной Брэгговской дифракции света исследуемыми пленками в данном диапазоне длин волн, поскольку окрашенных в синий или фиолетовый цвет продуктов в системе нет. Косвенно данный факт подтверждается небольшим фиолетовым оттенком исследуемого образца. Таким образом, полученные пленки можно по праву считать аналогами ФК и, несомненно, использовать в качестве сенсорных элементов при проведении химического анализа.

Результаты фотометрического определения железа (III) и железа (II) в пленках показали, что содержание железа (III) в пленках значительно превышает содержание магнетита в них. Это может быть объяснено более быстрым окислением двухвалентного железа в присутствии ультразвука, однако сорбция

железа в данном случае протекает быстрее, чем в отсутствии ультразвуковой обработки. Однако основным веществом, придающим окраску композитным пленкам, является магнетит. Именно он является компонентом, обеспечивающим аналитический отклик полученных сенсорных пленок, что впоследствии было продемонстрировано в главе 5.

**В четвертой главе** приведены результаты поиска чувствительного элемента, пригодного для определения концентрации растворимых в воде углеводов в реальных объектах. Для этого было изучено изменение степени набухания гранул состава «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» в водных растворах глюкозы и сахарозы. Показано, что определение концентрации углеводов равновесным методом невозможно ввиду слабого изменения равновесной степени набухания указанных полимеров при их перемещении из воды в исследуемый раствор, однако на всех кинетических кривых наблюдаются характерные минимумы, с помощью которых количественный анализ возможен. Однако низкая селективность и высокие пределы обнаружения препятствуют использованию гранул в аналитических целях.

Для решения поставленной проблемы было предложено импрегнирование гранул из сшитого поливинилового спирта раствором тетрабората натрия, что, как было ранее показано в варианте создания фотонно-кристаллических сенсоров, является эффективным инструментом для повышения чувствительности и селективности полимера к растворам углеводов. На первом этапе исследования была получена зависимость равновесной степени набухания гранул из сшитого ПВС от кислотности фонового раствора в присутствии глюкозы, фруктозы, лактозы и сахарозы (см. рис. 4). Форма данных зависимостей может быть объяснена различным составом исходных комплексов в слабокислой и слабощелочных средах. Чувствительность полимера к лактозе оказалась примерно в 2 раза ниже, чем к глюкозе. Это связано с тем, что константа устойчивости боратных комплексов с лактозой ниже, чем с глюкозой. В случае сахарозы не происходит заметного изменения степени набухания импрегнированного ПВС во всем исследованном диапазоне pH, что, вероятно, связано с отсутствием цис-диольных фрагментов в структуре этого углевода, в отличие от фруктозы и глюкозы.

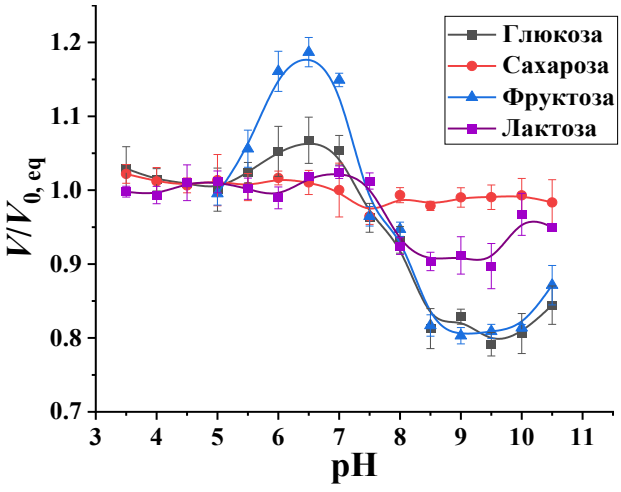


**Рис. 4**. Зависимость степени набухания ПВС, импрегнированного тетраборатом натрия, от pH раствора углеводов с концентрацией 40 ммоль/дм$^3$

Следующим этапом исследования было изучение кинетики изменения объема гранул при их перемещении из фонового раствора в растворы, содержащие углеводы. Полученные зависимости приведены на рисунке 5. Время достижения равновесия при этом, как и в случае перемещения гранул из воды в фоновый раствор, составляет около 30 мин, что свидетельствует о том, что скорость изменения объема гранул связана со скоростью лигандообменного процесса между ПВС, бором и углеводом.

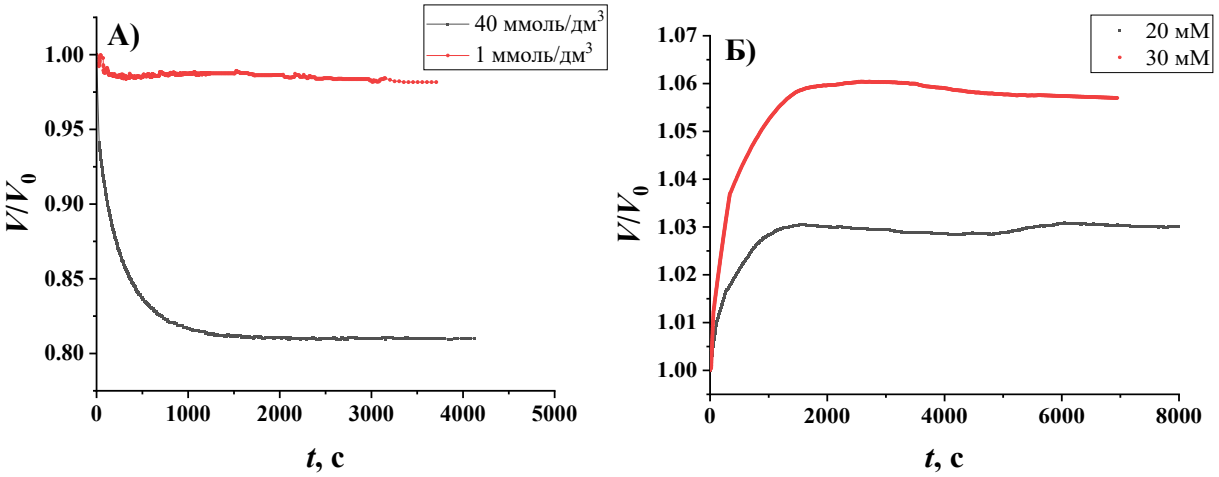


**Рис. 5**. Кинетические кривые изменения объема гранул ПВС при их перемещении из фонового раствора в растворы глюкозы с разными концентрациями при значениях pH 6.8 (А) и 8.6 (Б), $C_{буф}$ = 0.05 моль/дм$^3$

В случае лактозы зависимость отличается от предыдущих равновесным значением, которое по величине убывания в 2 раза меньше, чем для глюкозы, в той же слабощелочной области pH, а также временем установления равновесия, которое составляет больше 1 ч. Это подтверждает меньшую термодинамическую устойчивость комплекса бора с лактозой по сравнению с комплексами бора с глюкозой и фруктозой.

При pH=6.8 было исследовано влияние концентрации тетрабората натрия на отклик импрегнированного ПВС на фруктозу и глюкозу. Концентрации $Na_2B_4O_7$ составляли 30, 50 и 75 ммоль/дм$^3$. На рисунке 6 представлены полученные кинетические зависимости степени набухания гранул импрегнированного ПВС в растворе фруктозы с концентрацией 20 ммоль/дм$^3$.

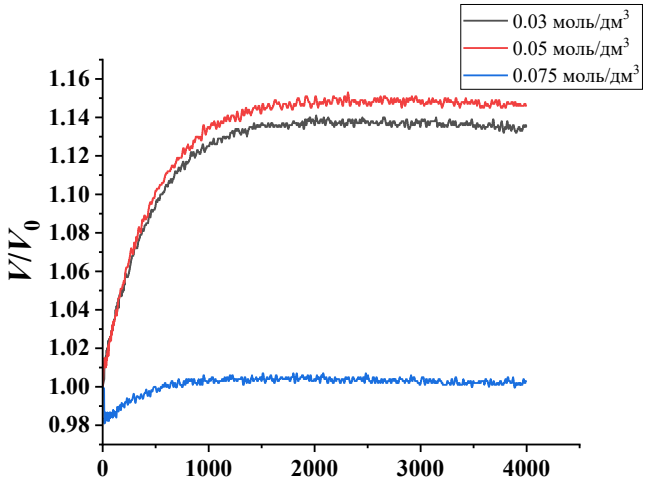


**Рис. 6.** Экспериментальные кинетические кривые набухания гранул импрегнированного ПВС в растворах 20 мМ фруктозы при различных концентрациях тетрабората в фоновом растворе

Как видно из полученных зависимостей, отклик ПВС, импрегнированного 30 ммоль/дм$^3$ и 50 ммоль/дм$^3$ растворами тетрабората, на раствор фруктозы с концентрацией 20 ммоль/дм$^3$ не отличается на всех участках кинетических кривых, а отклик ПВС, импрегнированного 75 ммоль/дм$^3$ раствором тетрабората, отсутствует. Аналогичная тенденция прослеживается и для растворов глюкозы.

Для решения вопроса о применении в аналитических целях гранул из импрегнированного сшитого ПВС были получены концентрационные зависимости степени набухания для растворов глюкозы и фруктозы при выбранных ранее значениях pH. Графики данных зависимостей приведены на рисунке 7.

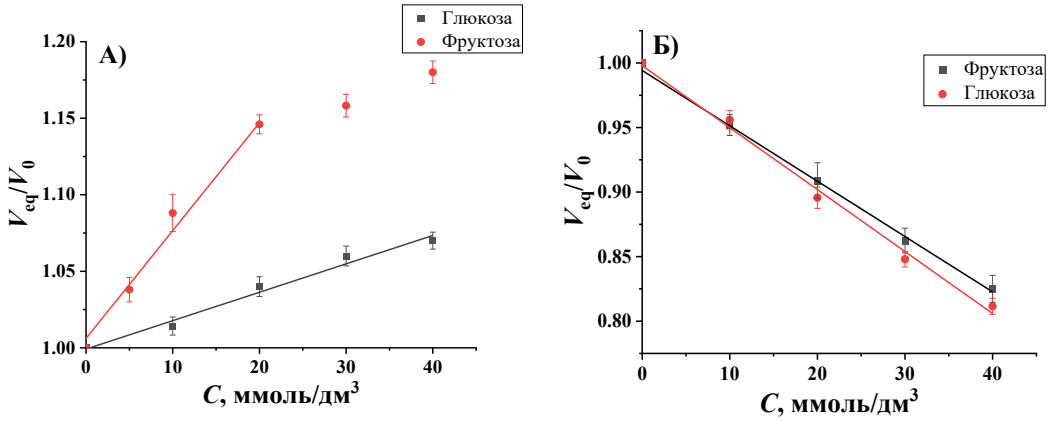


**Рис. 7**. Зависимость относительного объема гранул ПВС-20 от концентрации углеводов при значениях pH фонового раствора 6,8 (А) и 8,6 (Б), $C_{фона}$ = 0.05 моль/дм$^3$

Стоит отметить, что при значении pH фонового раствора 6.8 чувствительность полимера к глюкозе и фруктозе различна, что согласуется с данными, полученными при изучении влияния кислотности фонового раствора. Однако диапазон линейности при определении концентрации фруктозы оказывается ниже, чем для глюкозы. Предел обнаружения глюкозы составляет 11 ммоль/дм$^3$, а фруктозы – 4.3 ммоль/дм$^3$. Пределы же определения глюкозы и фруктозы составляют 36.7 и 14.3 ммоль/дм$^3$ соответственно. В слабощелочной среде глюкоза и фруктоза статистически неразличимы между собой, поэтому при значении pH фонового раствора 8.6 возможно определение суммарного содержания глюкозы и фруктозы, что оказывается полезным при анализе таких объектов, как натуральный мед. Предел обнаружения моносахаридов при этом составляет 7.9 ммоль/дм$^3$, а предел определения – 26.3 ммоль/дм$^3$.

В качестве чувствительного элемента для определения лактозы, кроме ПВС-20, был рассмотрен также ПВС-20.15. В случае последнего в диапазоне концентраций до 40 ммоль/дм$^3$ концентрационная зависимость приобретает линейный характер (см. рис. 8). Тем самым, несмотря на повышение предела обнаружения с 2.7 до 17.8 ммоль/дм$^3$, в связи с расширением диапазона определяемых содержаний ПВС-20.15 оказывается пригодным для определения лактозы в пищевых продуктах, не содержащих моносахариды, таких как сливки, молоко, пломбир без фруктовых наполнителей и пр.

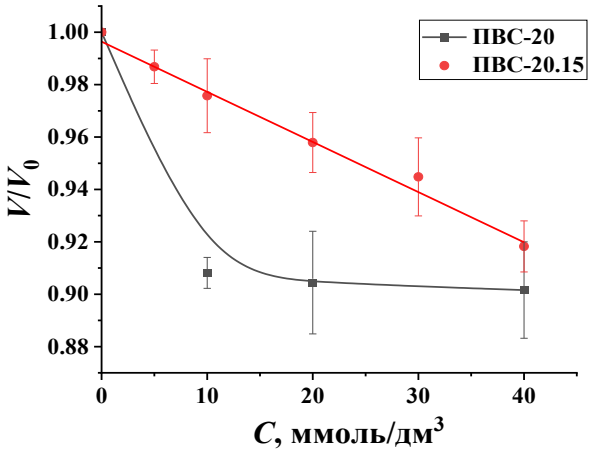


**Рис. 8**. Зависимость степени набухания импрегнированного ПВС от концентрации лактозы: pH = 9.0, t = 40 мин

В дальнейшем было изучено влияние концентрации магнетита в гранулах из сшитого ПВС на величину аналитического сигнала. На рисунке 9 приведены зависимости относительного объема гранул импрегнированного ПВС от концентрации растворов глюкозы и фруктозы при значении pH 6.8. Как видно, во всех приведенных случаях внедрение магнетита одновременно сужает диапазон определяемых концентраций и понижает чувствительность. Наиболее

ярко это наблюдается в случае глюкозы, где внедрение даже малого количества частиц $Fe_3O_4$ практически вдвое снижает тангенс угла наклона градуировочной зависимости. Таким образом, из-за сильного влияния магнетита, а также узости диапазона определяемых содержаний гранулы с магнетитом не могут быть использованы в аналитических целях при данном значении pH.

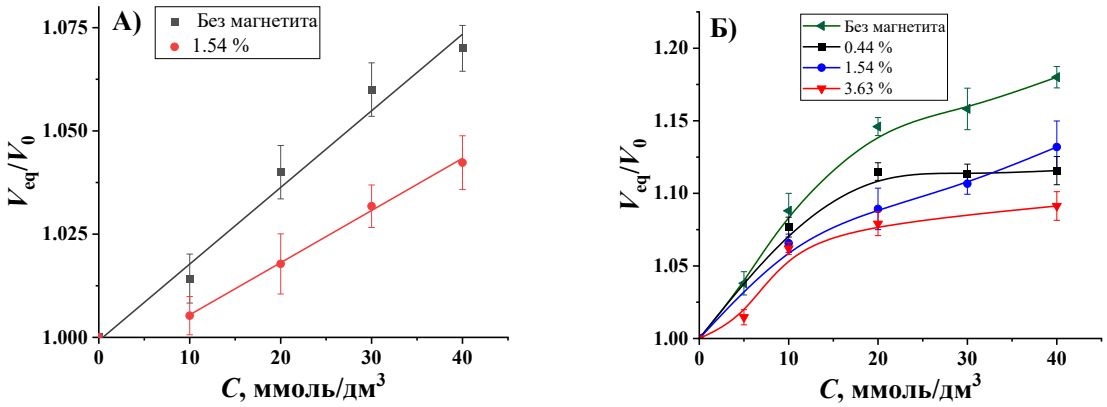


**Рис. 9.** Концентрационные зависимости степени набухания гранул импрегнированного ПВС в растворах глюкозы (А) и фруктозы (Б) с разным содержанием магнетита: pH = 6.8, $C_{буф.}$ = 0.05 моль/дм$^3$

Иная картина обстоит при работе в слабощелочном растворе (pH 8.6). Как видно из представленных на рисунке 10 зависимостей степени набухания гранул от концентрации углеводов, магнетит не оказывает влияния на чувствительность полимера. В этом случае при перемещении гранул из воды в фоновый раствор их объем меняется слабо, а значит, слабо меняется и концентрация частиц магнетита. Кроме того, в данных условиях сильно уменьшается доля хелатов состава 1 : 1 при попадании углеводов в раствор, следовательно, экранирования заряда частицами магнетита не происходит. Анализ полученных зависимостей методом статистической зависимости показал, что, как и в случае с немодифицированными магнетитом гранулами ПВС, глюкоза и фруктоза между собой неразличимы. Это дает возможность применения гранул с магнетитом для суммарного определения глюкозы и фруктозы.

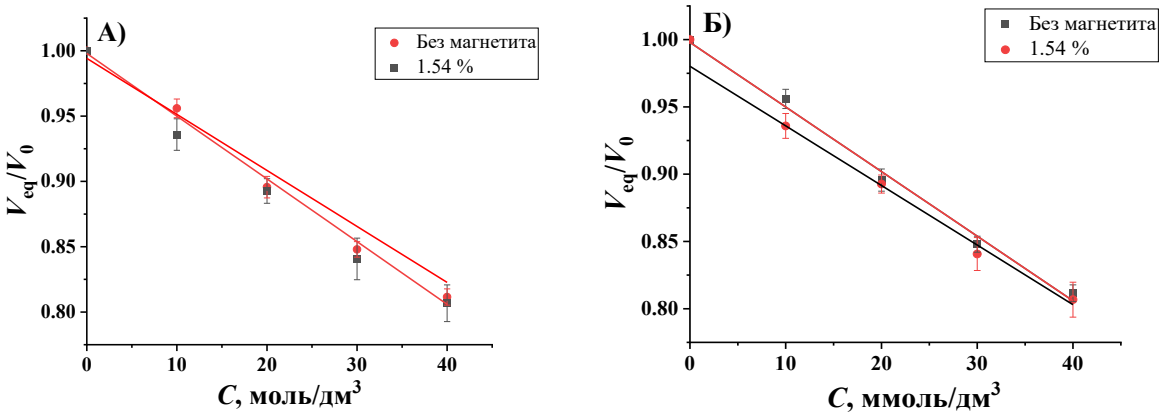


**Рис. 10**. Концентрационные зависимости степени набухания гранул импрегнированного ПВС в растворах глюкозы (А) и фруктозы (Б) с разным содержанием магнетита: pH = 8.6, $C_{буф.}$ = 0.05 моль/дм$^3$

Также было проанализировано влияние магнетита на определение лактозы при использовании буферного раствора со значением pH 9.0. На рисунке 11

приведены полученные при этом концентрационные зависимости. Видно, что концентрационная зависимость степени набухания гранул с магнетитом не является монотонной. Кроме того, присутствие магнетита в гранулах заметно снижает чувствительность метода определения лактозы, а также несколько сужает диапазон определяемых концентраций. Следовательно, гранулы с магнетитом, равно как и другие композитные материалы состава «сшитый ПВС – магнетит» не являются пригодными для определения лактозы.

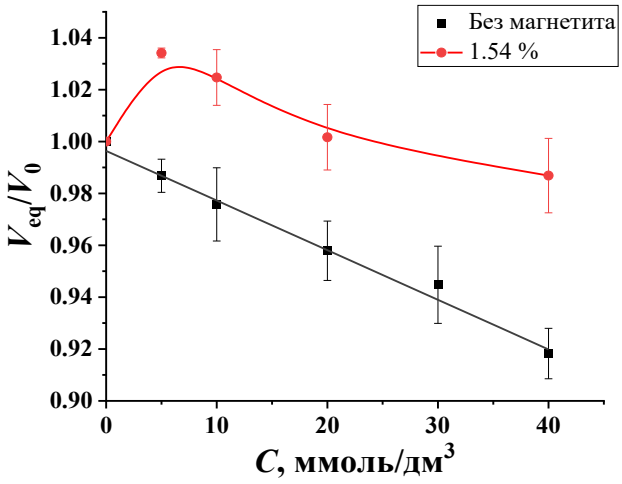


**Рис. 11**. Зависимость степени набухания импрегнированных гранул ПВС с магнетитом и без него от концентрации лактозы: pH = 9.0, $C_{буф.}$ = 0.05 моль/дм$^3$

Исследованные гранулы ПВС без магнетита, а также гранулы с магнетитом были апробированы в качестве чувствительного элемента для определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах натурального меда. А также в сиропах, предназначенных для диабетического питания (см. табл. 1, 2). Как было установлено, во всех случаях относительное стандартное отклонение не превышает 6 %, а полученные результаты хорошо согласуются с принятыми опорными значениями. Таким образом, с использованием гранул на основе ПВС, импрегнированного тетраборатом натрия, можно проводить анализ углеводсодержащей продукции на предмет выявления фальсификатов.

**Таблица. 1**. Результаты определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах натурального мёда

| **Образец** | **Иодометрия, мас. %** | **ОМ, мас. %** | **Sr, % (для МОМ)*** | **R, %**** |
|---|---|---|---|---|
| Липовый мёд | 72 | 71 ± 7 | 2.85 | 98.2 |
| Смешанный мёд | 73 | 69 ± 14. | 5.69 | 94 |
| Падевый мёд | 69 | 65 ± 6 | 2.52 | 93.5 |
| Гречишный мед | 59 | 61 ± 5 | 1.82 | 103.5 |

*n = 3, P = 0,95

**Таблица. 2**. Результаты определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах сиропов

| Образец | Заявлено производителем, мас. % | ОМ*, мас. % | Sr, % (для МОМ) |
|---|---|---|---|
| Финиковый сироп | 77 | 78 ± 5 | 2.90 |
| Сироп агавы | 78 | 78 ± 3 | 1.38 |

*n = 3, P = 0,95

В **пятой главе** приведены результаты исследования возможности применении метода цифровой цветометрии с применением смартфона в качестве измерительного устройства для получения аналитического сигнала с композитных пленок из сшитого поливинилового спирта.

Композитные пленки состава «сшитый ПВС – магнетит» были исследованы в качестве чувствительных элементов для определения объемных долей этанола и изопропанола в водно-спиртовых растворах. Были получены концентрационные зависимости величины аналитического сигнала (*Ar*) для пленки, выдержанной в течение 2 минут в солях железа. Выбор пленки было обусловлен наибольшей контрастностью изображения набухшей и сжавшейся пленок, поскольку основной процесс при воздействии спирта на гель ПВС – сжатие. Полученные графики зависимости сигнала от объемной доли спиртов приведены на рисунке 12. Как видно из представленных ниже фотографий, с увеличением доли спирта в растворе пленка становится более темной.

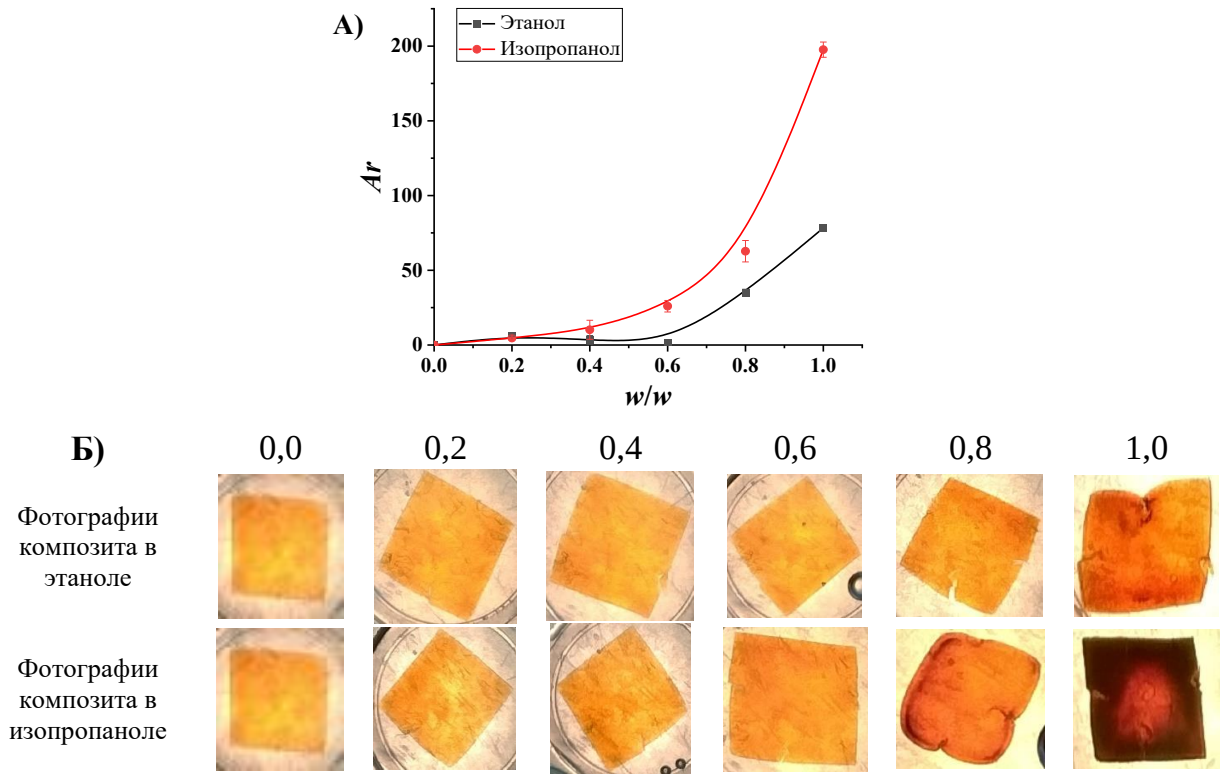


**Рис. 12**. Зависимость аналитического сигнала от объемной доли спиртов в индивидуальных растворах (А) и фотографии пленки после выдерживания в растворах (Б)

Для применения пленок в аналитических целях удобно пользоваться линейными зависимостями. Для этанола линейная зависимость сигнала от концентрации наблюдается в высокой области (0.6 – 1). Чтобы получить линейную концентрационную зависимость сигнала для изопропанола, было принято решение прологарифмировать величину сигнала. На основании полученных зависимостей было установлено, что предел обнаружения этанола составляет 0.63, а изопропанола – 0.24. Таким образом, композитные пленки состава «ПВС – магнетит» наилучшим образом подходят для анализа объектов с высоким содержанием спиртов для их определения или оценки степени их чистоты. Основным недостатком на текущий момент является долгое время установления равновесия (около 1 ч), что совпадает с результатами, полученными методом оптической микрометрии. Вполне вероятно, что уменьшение толщины пленки или изменение природы полимера способно значительно сократить время отклика.

Для увеличения чувствительности метода цифровой цветометрии с применением композитных сенсорных пленок была предложена ячейка, позволяющая регистрировать фотоизображения пленок в отраженном свете. При этом оказалось возможным регистрировать сигнал через определенные промежутки времени. Как и в рамках метода оптической микрометрии, становится возможным анализ водных или водно-органических систем по кинетическим характеристикам. На рисунке 13 приведены кинетические кривые изменения цветовой координаты по каналу Red и интегрального аналитического сигнала *Ar* для пленки, выдержанной в течение 2 мин в растворе солей железа.

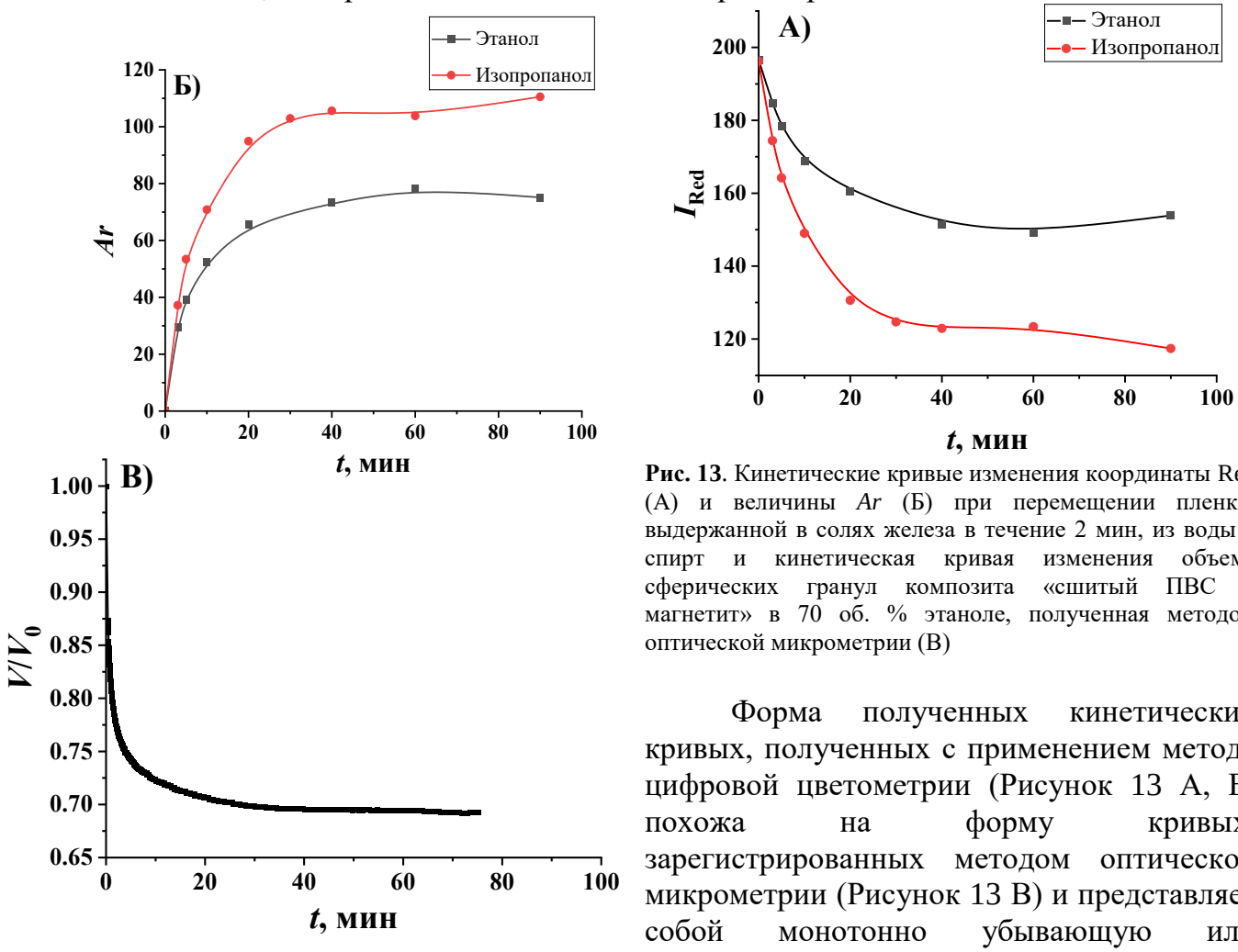


**Рис. 13**. Кинетические кривые изменения координаты Red (А) и величины *Ar* (Б) при перемещении пленки, выдержанной в солях железа в течение 2 мин, из воды в спирт и кинетическая кривая изменения объема сферических гранул композита «сшитый ПВС – магнетит» в 70 об. % этаноле, полученная методом оптической микрометрии (В)

Форма полученных кинетических кривых, полученных с применением метода цифровой цветометрии (Рисунок 13 А, Б) похожа на форму кривых, зарегистрированных методом оптической микрометрии (Рисунок 13 В) и представляет собой монотонно убывающую или

возрастающую функцию, выходящую на равновесие. Видно, что для достижения равновесной величины аналитического сигнала требуется около 40 минут как в случае использования координаты Red, так и в случае величины *Ar*, что тоже согласуется с результатами, полученными методом оптической микрометрии. Равнозначность двух способов выражения отклика связана, в основном, с достаточно высоким изменением объема геля ПВС при перемещении пленки из воды в этанол или изопропанол. По той же причине в равной степени возможно проведение измерений как в проходящем, так и в отраженном свете.

Далее была проведена оценка повторяемости аналитического сигнала одной и той же пленки при ее неоднократном перемещении из воды в спирт. Было показано, что результаты определения величины аналитического сигнала являются достаточно воспроизводимыми для сенсорных систем. При этом наиболее прецизионными являются результаты, получаемые по каналам R и G: относительное стандартное отклонение для интенсивностей данных каналов не превышает 5 %. Относительное стандартное отклонение величины интенсивности канала B может достигать и 10%, что связано с особенностями цветопередачи цифровых фотокамер. При использовании в качестве аналитического сигнала величины *Ar* относительное стандартное отклонение, в среднем, составляет 6,8 %. Такое стандартное отклонение является стандартным для современных цифровых фотокамер.

Предложенный для определения водорастворимых углеводов подход в рамках метода оптической микрометрии был протестирован на композитных полимерных пленках состава «сшитый ПВС – магнетит». Для измерения выбрали установку для регистрации сигнала в отраженном свете, а в качестве меры сигнала – интегральную величину *Ar*. В качестве фонового раствора, как и в методе оптической микрометрии, использовали фосфатно-боратный буферный раствор со значением pH 8.5 и концентрацией тетрабората натрия 0.05 моль/дм$^3$. При этом время выдержки пленок в растворах составляло 40 мин. На рисунке 14 представлены зависимости относительных интенсивностей отклика пленок с разным содержанием $Fe_3O_4$ при их перемещении из фонового раствора в раствор глюкозы с концентрацией 40 ммоль/дм$^3$.

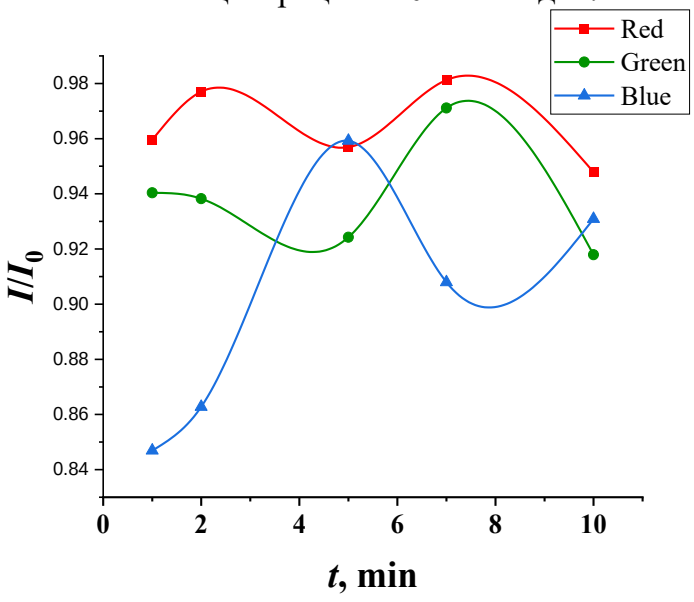


**Рис. 14**. Относительные интенсивности цветовых каналов пленок с разным содержанием частиц $Fe_3O_4$

Оптимальной для определения углеводов, как и в случае со спиртами, является пленка ПВС, импрегнированная солями железа в течение 2 мин. Для выбранной пленки построили концентрационные зависимости отдельных цветовых координат и интегральной величины *Ar* (Рисунок 15). Заметно, что зависимости интенсивностей отдельных цветовых каналов не являются монотонными, поэтому не могут

использоваться в аналитических целях. Основная причина данного явления – невысокое изменение степени набухания геля ПВС. Напротив, зависимость величины сигнала *Ar* от концентрации является линейной в диапазоне концентраций глюкозы 0 – 60 ммоль/дм$^3$ и описывается уравнением $Ar = 0.27C - 0.43$ с коэффициентом корреляции 0,99 (Рисунок 15 Б).

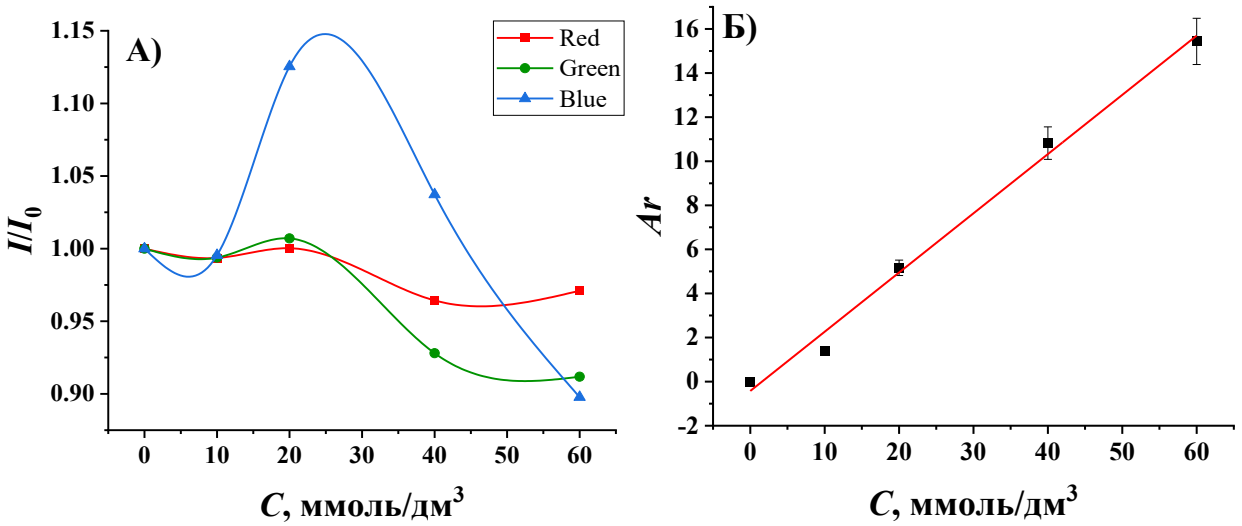


**Рис. 15**. Концентрационные зависимости относительных цветовых координат (А) и интегральной величины *Ar* (Б) в растворах глюкозы для пленки № 2

Разработанный метод получения аналитического сигнала с композитных пленок состава «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» был апробирован при определении объемной доли спирта в антисептиках для рук марок Dettol Original © и Sanitelle © на основе этанола. Для получения аналитического сигнала применяли установку для съемки в проходящем свете. Полученные результаты (таблица 3) сравнивались с заявленными производителями на упаковках, а также проводили валидацию разработанного подхода методом «введено-найдено».

**Таблица 3**. Результаты определения объемной доли этанола в антисептиках для рук

| **Название антисептика** | **Заявлено производителем, об. %** | **Найдено* (без добавки), %** | **Введено, об. %** | **Найдено* (с добавкой), об. %** | **$\Delta_{отн.}$, %** |
|---|---|---|---|---|---|
| Dettol original | 68.0 | 66 ± 3 | 10 | 76 ± 5 | 3.19 |
| Sanitelle | 66.2 | 65 ± 3 | 10 | 75 ± 5 | 1.32 |

*n = 3, P = 0,95

Видно, что результаты, полученные методом цифровой цветометрии, хорошо согласуются с принятыми опорными значениями. Погрешность определения не превышает 4%. При этом присутствующие в анализируемых образцах антисептиков не мешают определению спиртов, что может быть связано с образованием сильных межмолекулярных водородных связей в сумме с небольшим размером молекул определяемых спиртов, в то время как многоатомные спирты и их сополимеры не проникают в объем композитных пленок и тем самым не влияют на их равновесный объем и цветометрические параметры пленок.

Установку для съемки в отраженном свете использовали для определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах натурального

монофлорного мёда. Для анализа выбрали мёд липовый марки «Каждый день» и мёд гречишный марки «Ашан». В качестве независимого метода анализа использовали спектрофотометрический метод по измерению оптической плотности щелочного раствора гексацианоферрата (III) калия («красной кровяной соли»). Результаты приведены в таблице 4.

**Таблица 4**. Результаты определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах натурального мёда с помощью композитных плёнок «ПВС – магнетит»

| **Образец** | **Найдено методом цифровой цветометрии*, мас. %** | **$S_r$, %** | **Найдено по ГОСТ 32167-2013 (п. 6)*, мас. %** | **$S_r$, %** | **R, %** |
|---|---|---|---|---|---|
| Мёд липовый «Каждый день» | 51 ± 1 | 2.7 | 65 ± 5 | 8.1 | 77.9 |
| Мёд гречишный «Ашан» | 77 ± 2 | 2.7 | 77 ± 6 | 8.0 | 100.5 |

*n = 3, P = 0,95

Из приведенных данных видно, что результаты анализа гречишного меда, полученные методом цифровой цветометрии и независимым методом, хорошо согласуются между собой. Однако результаты анализа образца липового меда, полученные разными методами, не совпадают. Причина такого различия может заключаться в том, что гексацианоферрат (III) калия – реактив, который взаимодействует практически со всеми восстановителями, содержащимися в образце меда (включая оксиметилфурфурол), в то время как ПВС, импрегнированный тетраборатом натрия, откликается исключительно на молекулы, содержащие *цис*-диольные фрагменты. Относительное стандартное отклонение предложенного цветометрического метода меньше, чем у фотометрического метода, предложенного в ГОСТе, и у метода оптической микрометрии (гл. 4) при условии, что измерение пробы осуществляют с помощью одной и той же пленки (в условиях повторяемости). Таким образом, предложенный для определения сахаров способ является более селективным по сравнению с предложенным в нормативном документе.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы были предложены недорогие и простые методы определения водорастворимых в воде веществ, основанные на применении набухающих полимеров и композитов на их основе в качестве чувствительных элементов. Метод оптической микрометрии, ранее применяемый лишь для модельных бинарных растворов, нашел свое применение и для анализа реальных объектов. Это было продемонстрировано при анализе образцов мёда и натуральных сиропов. В качестве перспектив развития направления можно выделить несколько аспектов. Во-первых, применение поливинилового спирта в качестве чувствительного набухающего элемента может являться хорошим «трамплином» для перехода к применению в данных целях материалов из природных полимеров, таких как крахмал, целлюлоза, хитозан и пр. Во-вторых, способ модификации подобных полимеров путем их импрегнирования подходящими дешевыми реагентами, показавший свою эффективность при определении углеводов, может быть распространен и на определение других природных веществ. С другой стороны, перспективы в данном направлении могут быть связаны и с усовершенствованием существующего оборудования и его миниатюризации. Так, вместо больших микроскопов, применяемых в методе оптической микрометрии, вполне возможно обойтись обычной линзой с достаточной увеличительной способностью и использовать в качестве измерительного устройства обычный смартфон.

В то же самое время, отклик, связанный с изменением степени набухания чувствительных полимеров, может быть трансформирован в оптический сигнал, проявляющийся в изменении окраски композитных полимерных пленок. Так, впервые метод цифровой цветометрии был применен к регистрации сигнала композитных пленок состава «сшитый ПВС – магнетит». Установлено, что композитные пленки подобного состава являются подходящими материалами для анализа водно-спиртовых систем в большей степени, чем для анализа растворов электролитов, поскольку для низших спиртов возможно определение растворенных в воде веществ. Наиболее подходящими объектами для анализа являются антисептики, дезинфицирующие средства, парфюмерные изделия. Импрегнирование ПВС раствором тетрабората натрия делает метод возможным и для определения углеводов в образцах пищевых продуктов, как это было показано при анализе образцов натурального монофлорного мёда.

Возможным способом решения проблемы работы с окрашенными средами может служить калибровка фотокамеры по стандартным шаблонам, с помощью которых возможно было бы нахождение поправочных коэффициентов на цвет пробы. Предложенный подход может применяться не только с чувствительными матрицами из ПВС, но и с другими полимерными матрицами. Также возможно и изменение природы внедряемых в полимерный гель наночастиц. Другой нерешенной проблемой является низкая скорость отклика, которая, возможно, может быть решена путем варьирования природы полимера или степени его сшивки в разумных пределах. Следовательно, применение композитных пленок на основе набухающих полимеров в сочетании с цифровой цветометрией является новым шагом для развития внелабораторного анализа в будущем.

# ВЫВОДЫ

1. Предложен новый способ формирования чувствительного материала для определения содержания углеводов в водных растворах методом оптической микрометрии, основанный на формировании частиц магнетита в гранулах сшитого ПВС в насыщенных парах аммиака с последующим импрегнированием гранул раствором тетрабората натрия. Проведено исследование влияния концентрации солей железа (II) и железа (III) на количество образующегося в полимерном геле $Fe_3O_4$. Полученные образцы композитов охарактеризованы методами ИК-спектроскопии и магнетохимии.

2. Изучено влияние кислотности на степень набухания импрегнированного тетраборатом натрия композитного материала на основе сшитого ПВС. Найдено оптимальное значение pH и концентрация тетрабората натрия в буферном растворе для суммарного определения содержания глюкозы и фруктозы в присутствии сахарозы, а также лактозы в отсутствии моносахаридов. Предел обнаружения глюкозы и фруктозы составляет 7.9 ммоль/дм$^3$ (предел определения – 26.3 ммоль/дм$^3$), а лактозы – 17.8 ммоль/дм$^3$. Показано влияние времени контакта фаз на величину аналитического сигнала. Установлено оптимальное количество внедряемого в гранулы магнетита.

3. Продемонстрирована принципиальная возможность применения разработанного способа определения суммарного содержания глюкозы и фруктозы в пищевых продуктах на примере образцов натурального меда и сиропов.

4. Предложен новый способ получения аналогов фотонных кристаллов на основе пленок из сшитого поливинилового спирта, заключающийся в формировании частиц магнетита в насыщенных парах аммиака в присутствии постоянного магнитного поля. Полученные композитные пленки исследованы методами спектрофотометрии и спектроскопии диффузного отражения.

5. Впервые при работе с композитными пленками состава «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» в качестве метода измерения аналитического сигнала применена цифровая цветометрия с использованием в качестве измерительного устройства смартфона. Сконструированы устройства для измерения цветометрических параметров композитной пленки в проходящем и отраженном свете. Продемонстрировано изменение аналитического сигнала при варьировании состава растворов сильных электролитов и спиртов. Исследовано поведение пленок, импрегнированных раствором тетрабората натрия, в растворах глюкозы. Проведена апробация предложенного подхода при определении объемной доли спирта в антисептиках для рук и при определении суммарного содержания глюкозы и фруктозы в образцах натурального мёда.

**Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:**

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в ФГБУН Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН:*

1 *Большаков Е.С.,* ***Щемелев И.С.****, Иванов А.В., Козлов А.А.* Фотонные кристаллы и их аналоги как средство химического анализа (обзор) // Журн. аналит. химии. 2022. Т. 77, № 10. С. 875–898 (*Bolshakov E. S., Shchemelev I. S., Ivanov A. V., Kozlov A. A.* Photonic crystals and their analogues as tools for chemical analysis (a review) // J. Anal. Chem. 2022. V. 77. № 10. P. 1215–1235.) EDN: KFINWA. – 0.87 п.л. Вклад автора 20 %. Импакт-фактор 0,704 (JIF)

2 ***Щемелев И.С.****, Староверова А.В., Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б.* Применение полиэлектролитов для определения концентрации сахарозы в растворе методом оптической микрометрии // Сорбц. хромат. процессы. 2021. Т. 21, № 6. С. 841–849. EDN: OKRCFQ. – 0,63 п.л. Вклад автора 60 %. Импакт-фактор 0,26 (JIF).

3 ***Щемелев И.С.****, Смирнова М.А., Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б.* Применение комплексообразующего импрегнированного поливинилового спирта для определения углеводов методом оптической микрометрии // Журн. коорд. химии. 2022. Т. 48, № 10. С. 625–631 (*Shchemelev I.S., Smirnova M.A., Ivanov A.V., Ferapontov N.B.* Application of complex forming impregnated polyvinyl alcohol for the determination of carbohydrates by optical micrometry // Russ. J. Coord. Chem. 2022. V. 48, № 10. P. 638–643). EDN: SQHSYP. – 0,44 п.л. Вклад автора 65 %. Импакт-фактор 0,67 (JIF).

4 ***Shchemelev I.S****., Khasanov D.S., Smirnova M.A., Ivanov A.V., Ferapontov N.B., Tokmachev M.G.* Determination of reducing carbohydrates in natural honey samples by optical micrometry method // CTA. 2022. V. 9, № 4. 20229417. EDN: DXCALY. – 0,31 п.л. Вклад автора – 70 %. Импакт-фактор 0,63 (JIF).

5 ***Щемелев И.С.****, Зиновьев Н.А., Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б., Михеев И.В., Гагарин А.Н.* Сенсорный гранулированный материал на основе импрегнированного композита «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» для определения углеводов методом оптической микрометрии // Зав. лаб. Диагн. матер. 2024. Т. 90, № 6. С. 5–14. EDN: EQNIDX. – 0,63 п.л. Вклад автора 50 %. Импакт-фактор 0,46 (JIF).

6. ***Shchemelev I.S.****, Ivanov A.V., Ferapontov N.B.* Composite “cross-linked polyvinyl alcohol-magnetite” as a stimuli-responsive matrix for optical methods // Molecules. 2024. V. 29. 2794. EDN: IKDJXJ. – 0,87 п.л. Вклад автора 10 %. Импакт-фактор 4,6 (JIF).

7. ***Щемелев И.С.****, Зиновьев Т.В., Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б.* Цифровой цветометрический анализ водных и водно-органических систем с применением композитных пленок «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» // Журн. аналит. химии. 2024. Т. 7, № 9. С. 960–970. (*Shchemelev I.S., Zinov’ev T.V., Ivanov A.V., Ferapontov N.B.* Digital colotimetric analysis of aqueous and aqueous-organic systems using “polyvinyl alcohol – magnetite” hydrophilic composite films // J. Anal. Chim. 2024. V. 7, № 9. P. 1204–1213.) EDN: TJBVVG. – 0,69 п.л. Вклад автора 65 %. Импакт-фактор 0,704 (JIF).

8. ***Щемелев И.С.****, Иванов А.В., Ферапонтов Н.Б.* Применение сенсорных композитных пленок «поливиниловый спирт – магнетит» для цифрового цветометрического определения глюкозы и фруктозы в меде // Журн. неорг. химии. 2025. Т. 70, № 10. С. 1428–1436. (*Shchemelev I.S., Ivanov A.V., Ferapontov N.B.* The

use of polyvinyl alcohol – magnetite sensing composite films for the digital image colorimetric determination of glucose and fructose in honey // Rus. J. Inorg. Chem. 2025. V. 70, № 10. P. 1613–1620.) EDN: WLPRXF. – 0.56 п.л. Вклад автора 70 %. Импакт-фактор 0,935 (JIF).

*Прочие статьи:*

1 ***Щемелев И.С.**, Ферапонтов Н.Б., Иванов А.В.* Кинетические аспекты определения содержания углеводов в водных растворах методом оптической микрометрии // Науч. вестн. СамГУ. 2021. № 3(127). С. 14–19. DOI: 10.59251/2181-1296.v.3.1272.719. – 0,37 п.л. Вклад автора 70 %.

2 ***Щемелев И.С.**, Староверова А.В., Ферапонтов Н.Б., Иванов А.В.* Определение сахарозы в растворах методом оптической микрометрии с применением нового композита «поливиниловый спирт – магнетит» / Инновационные материалы и технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Минск, 19–21 янв. 2021 г. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 395–398. EDN: DUQSSG. – 0,25 п.л. Вклад автора 60 %.

*Тезисы докладов на всероссийских и международных конференциях:*

Опубликовано 12 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

**Благодарности**

*Автор работы выражает глубочайшую благодарность д.х.н., в.н.с.* ***Ферапонтову Н.Б.*** *за неоценимую помощь на протяжении всех 6 лет выполнения работы в поиске, обсуждении и систематизации литературных источников, планировании экспериментов, обсуждении и интерпретации полученных данных, подготовке публикаций и выступлений с докладами. Также автор выражает благодарности: к.ф-м.н., доц.* ***Токмачеву М.Г.*** *за предоставленное программное обеспечение, позволяющее проводить обработку данных в рамках метода оптической микрометрии, к.х.н., с.н.с.* ***Гавлиной О.Т.*** *за консультации, к.х.н., доц.* ***Михееву И.В.*** *за помощь при регистрации ИК-спектров исследуемых полимеров, к.х.н., доц.* ***Васильеву А.В.*** *за регистрацию кривых намагничивания исследуемых образцов, а также к.х.н.* ***Постникову В.А.*** *за ценную помощь при обсуждении ряда экспериментов с гидрофильными полимерами. Кроме того, выражается благодарность студентам, которые внесли свой вклад в выполнение данной работы: Староверовой А.В., Смирновой М.А., Бельковой Д.С., Хасанову Д.С., Зиновьеву Т.В., Зиновьеву Н.А. Отдельное спасибо к.х.н. Большакову Е.С. и к.х.н. Фурлетову А.А. за помощь в освоении метода спектроскопии диффузного отражения. Отдельная благодарность выражается родным, близким и друзьям, оказывающим моральную и материальную поддержку на протяжении всех лет обучения в аспирантуре.*