

ЮНЫЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2409-546X

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

СПЕЦВЫПУСК

Путь к звёздам: специальный выпуск
ученических работ школы Летово
к 65-летию полёта Юрия Гагарина

Является приложением к научному журналу
«Юный ученый» № 7 (103) 2026

7.2

2026

6+

Юный учёный

Международный научный журнал

№ 7.2 (103.2) / 2026

Издается с февраля 2015 г.

СПЕЦВЫПУСК

Путь к звёздам: специальный выпуск ученических работ школы Лето-
во к 65-летию полёта Юрия Гагарина

Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

Редакционная коллегия:

Жураев Хусниддин Олтинбоевич, доктор педагогических наук (Узбекистан)

Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук

Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук

Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)

Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук

Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук

Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук

Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)

Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук

Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук (Казахстан)

Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук (Азербайджан)

Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук

Бердиев Эргаш Абдуллаевич, кандидат медицинских наук (Узбекистан)

Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук

Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук

Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук

Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук

Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук

Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук

Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения

Искаков Руслан Маратбекович, кандидат технических наук (Казахстан)

Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)

Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук

Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук

Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук

Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук

Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук

Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)

Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук

Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук

Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук

Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук

Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук

Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук

Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук

Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук (Казахстан)

Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии (Казахстан)

Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук

Рахмонов Азизхон Боситхонович, доктор педагогических наук (Узбекистан)

Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук

Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук

Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук

Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектуры (Узбекистан)

Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук

Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук

Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры

Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук (Узбекистан)

Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук

Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)
Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)
Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)
Ахмеденов Кажмурат Максutowич, кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)
Бидова Бэла Бертовна, доктор юридических наук, доцент (Россия)
Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)
Буриев Хасан Чутбаевич, доктор биологических наук, профессор (Узбекистан)
Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)
Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)
Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)
Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)
Демидов Алексей Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Досманбетов Динар Бакбергенович, доктор философии (PhD), проректор по развитию и экономическим вопросам (Казахстан)
Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)
Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)
Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)
Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, доктор педагогических наук, и. о. профессора, декан (Узбекистан)
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)
Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Кыят Эмине Лейла, доктор экономических наук (Турция)
Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)
Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)
Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)
Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)
Рахматуллин Рафаэль Юсупович, доктор философских наук, профессор (Россия)
Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)
Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, доцент (Узбекистан)
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры (Россия)
Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)
Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)
Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)
Шуклина Зинаида Николаевна, доктор экономических наук (Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово.....	1
Bazarsadaeva I. T. Pilot study: environmental and social color preference of zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	2
Давтян Н. А. Определение видовой принадлежности мяса в комбинированных продуктах методом полимеразной цепной реакции	9
Кривороль А. А. Исследование амплитудно-частотной характеристики звука колеблющейся линейки от ее существенных параметров	12
Ломакина М. П. Сравнительный анализ полимерных матриц для получения люминесцентных композитных плёнок на основе перовскитных наночастиц	18
Некрасов А. Е. Синтез и исследование частиц оксида кремния	22
Переверзева А. М. Создание автоматизированного гроубокса на основе гидропонного метода выращивания растений	30
Петросян Н. А. Коэффициент пропускания излучения в зависимости от угла падения света на интерференционный фильтр	36
Петросян Н. А. Зависимость максимального напряжения от скорости растяжения для хлопка, резины и нейлона	40
Сафронов П. А. Влияние противогололедных средств на экологическое сообщество городской среды	43
Токарева И. Н. Флуоресценция листьев крапивы двудомной как индикатор адаптации к условиям освещённости	47
Торбеева К. В. Оценка эффективности самодельного фотобиореактора для культивирования микроводорослей рода <i>Micractinium</i>	52

Вступительное слово

Для нашей школы этот специальный выпуск — важное событие. В нём собраны работы учеников, которые прошли путь от исследовательского вопроса и проектного замысла до текста, достойного публикации. В статьях отражаются не только научная тема, но и опыт самостоятельного поиска, проверки гипотез, работы с данными, консультаций с экспертами и ответственности за итоговый результат. Для нас особенно ценно, что в проектной деятельности ученик не просто выполняет задание, а постепенно занимает авторскую позицию: формулирует проблему, принимает решения, аргументирует выводы и планирует результаты своей работы за пределами учебной ситуации. Опыт подготовки специального выпуска — часть важнейшего процесса формирования в школе настоящей исследовательской и научно-популярной культуры, приобщения к ней всех учащихся.

Михаил Геннадьевич Мокринский,
директор школы Лето́во

Система проектной деятельности в школе выстроена как последовательный путь от зарождения интереса до получения осмысленного результата. В представленных работах эта логика прослеживается наиболее отчетливо: спектр исследований охватывает физику, химию, биологию, экологию, инженерию, материаловедение и молекулярные методы анализа. При всем разнообразии тем их объединяет общая структура: постановка проблемы, предпроектное исследование, выбор методологии, сбор и интерпретация данных, апробация решений, формулирование выводов и рефлексия пройденных этапов. Для координатора проектной деятельности принципиально важно, что публикация в сборнике в данном случае выступает не внешней наградой, а органичным продолжением образовательного процесса. Она требует от автора точности, научной добросовестности, ясности изложения и умения представить свою работу профессиональному сообществу.

Елена Борисовна Зеленина,
координатор проектной деятельности школы Лето́во

Работа над этим сборником стала также опытом взаимодействия учеников, педагогов, консультантов и лабораторной команды. На этапе исследований и подготовки статей ребята учились задавать уточняющие вопросы, работать с оборудованием и данными, корректировать формулировки, проверять обоснованность выводов и переводить результаты проекта в формат публикации. Для кафедры естественных наук школы особенно значимо видеть, как школьный исследовательский интерес превращается в оформленный результат, который можно обсуждать, проверять, развивать и предъявлять внешней аудитории. Мы надеемся, что этот выпуск станет для авторов не завершением, а началом дальнейшего исследовательского пути, а для школы — первым шагом к устойчивой традиции публикации ученических работ.

Павел Александрович Котин,
заведующий лабораторией школы Лето́во

Pilot study: environmental and social color preference of zebrafish (*Danio rerio*)

Bazarsadaeva Irina Tsybendorzhievna, 10th-grade student

Scientific adviser: Tretyakov Danila Olegovich, biology teacher

Letovo School (Moscow)

Zebrafish show well-documented environmental color preferences, use visual phenotypes for social discrimination, and employ body coloration as a social signal. However, it remains unclear whether these visual biases are associated with behavior in social contexts. This pilot study aims to examine whether environmental color preferences in zebrafish correlate with social preferences. Adult wild-type zebrafish ($n = 6$) underwent environmental color preference testing in a radial arm maze, and then their social preferences were assessed in a 24-hour free-interaction social test ($n = 4$) using transgenic fluorescent stimuli (Pink, Blue, Brown, Purple, and Green). Both assays revealed structured, non-random preference patterns (Environmental: $\chi^2(4) = 12.88$, $p = 0.012$; Social: $\chi^2(4) = 11.39$, $p = 0.022$). Blue and Pink consistently ranked highest, whereas Brown and Purple generally occupied intermediate positions, and Green was the least preferred color. A positive correlation of moderate magnitude ($\rho = 0.70$; $p = 0.233$; permutation $p = 0.235$) was observed between environmental and social preference rankings of colors, though it did not reach statistical significance. Notably, a convergence of interaction frequencies was observed during the free-interaction social test, despite high inter-individual variability. These findings suggest pre-existing visual biases may partially guide social target selection, though replication with larger cohorts is needed to confirm this association. Thus, the pilot study supports conducting a main study with enhanced design parameters to definitively assess cross-contextual consistency of color preferences.

Introduction

Animal social networks can be highly complex, and social associations between individuals are often non-randomly structured [1]. Such structured interactions are particularly evident in shoaling fish, where group composition can influence access to resources, information transfer, and protection from predation [2]. Decisions regarding interactions often depend on the behavioral and phenotypic characteristics of other group members. Interaction patterns are often shaped by body size [3], boldness [4], species, or individual familiarity [5].

Among other phenotypic traits, color was shown to be a critical factor in animal evolution, providing visual cues for various key behaviors, including sexual, social, and aggressive behaviors, in multiple species — and fishes in particular [6], [7]. For example, female guppies (*Poecilia reticulata*) prefer more colorful males for mating [8]. However, color cues may also confer higher risks of predation, as non-spotted and albino rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with brighter dorsal color are more frequently targeted by predators than white-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*) or regular rainbow trout [9]. Given that the color signals may carry competing fitness consequences for the individual displaying them, the behavioral relevance of color to observers may depend on whether it is presented as an environmental cue or as a phenotypic trait of a conspecific.

In this context, Zebrafish (*Danio rerio*) are a well-established model for studying visually guided social behavior. Zebrafish are shoaling fish with polychromatic vision and are active diurnal animals that heavily rely on vision and color cues in their social behavior. Previous work has demonstrated that zebrafish are capable of discriminating between conspecifics based on visual phenotypes [3], [10]. Multiple studies also suggest that in zebrafish, body coloration acts as a social signal, similarly to other species. For example, zebrafish can rapidly change body coloration depending on their general well-being, health, social status, dominance / aggression, or stress [11].

Such changes may, in turn, affect behaviors of conspecifics, as zebrafish are paler during sleep, stress, or sickness [12], [13], and generally darker and have more vivid colors during aggression and dominance [12], [14]. Additionally, zebrafish are capable of acquiring a learned social preference for certain phenotypes [10]. Therefore, this raises the possibility that zebrafish use body coloration when selecting social partners.

Studies [15], [16] have found that zebrafish also have innate and learned color preferences. These preferences indicate a strong sensory bias for specific visual cues. However, while much is known about how zebrafish respond to environmental color or individual phenotypes in isolation, whether environmental color preferences are associated with social interaction patterns remains unclear.

Based on established evidence of visual discrimination and color-dependent social signaling in zebrafish, it was hypothesized that environmental color preferences would generalize to social partner selection. Specifically, it was proposed that shared innate visual biases guide decision-making across both ecological and social contexts, such that colors preferred during environmental exploration would also predict higher interaction rates when presented as conspecific phenotypes.

This pilot study investigated the correlation between wild-type zebrafish color preference and the distribution of individual interactions with genetically modified ornamental zebrafish with 5 different body colors. As a feasibility study, the primary outcome was methodological validation, with behavioral findings considered exploratory. Transgenic fish were chosen as stimulus subjects because they provide a significant difference in body color. This study operates on the premise that social interaction frequencies between wild-type zebrafish are comparable to those between wild-type and transgenic individuals, given that these ornamental strains differ primarily in pigmentation, with no reported alterations to baseline social behavior [17], [18]. To assess color preference, a five-arm radial maze was used, with each arm's color matching

one of the transgenic zebrafish groups. Previous research on social preferences has tended to focus on shoal choice assays, in which focal fish were physically separated from the stimulus. This study employed an approach that allowed individuals to interact freely without physical barriers between fish, thus enabling interactions with both visual and physical cues to occur, providing a more natural context for assessing social behavior. The pilot specifically aimed to (1) test whether environmental color preferences are associated with social interaction patterns in a barrier-free setting and (2) compare individual and group-level color rankings across both contexts. Because of the small sample size, all behavioral findings were treated as exploratory.

Materials and methods

Animals and husbandry

Six wild-type zebrafish (*Danio rerio*) 3 ± 0.5 cm in length, 4 males and 2 females were purchased from the local aquarium retailer in Moscow, Russia. They were kept for 14 days in a 50 L glass tank to accustom them to the new environment. Fifteen transgenic fluorescent zebrafish 3 ± 0.5 cm in length of five color phenotypes: Green, Brown, Blue, Pink, and Purple, with three individuals per phenotype, were also purchased from the local aquarium retailer in Moscow, Russia, and were kept in a separate glass 50L tank for 2 months prior to the experiment.

Before the beginning of the experiment 2 transgenic fish died, leaving 13 fish total, 6 males and 7 females (two Green, two Brown, three Blue, three Pink, and three Purple individuals). During the experimental period, two WT fish died from unknown causes and were removed immediately.

Neon tetras (*Paracheirodon innesi*) were unintentionally added to the aquarium prior to the final WT fish undergoing color preference testing and remained co-housed with the remaining WT individuals for the duration of the study, possibly influencing the results of the social interaction test.

Fish in both tanks were fed daily (TetraPRO Colour Multi-Crisps) and kept in a 12:12 light-dark cycle. Water temperature was maintained at 22–25°C throughout the experiment, all tanks were equipped with internal water filters and aerators.

Color preference assessment

Color preference in wild-type zebrafish was assessed using a radial maze [7], [19]. Prior to testing, individual WT fish were gently placed into a 250-ml glass beaker containing system water matching the experimental temperature and transferred to the testing room to minimize stress. Following a 5-minute acclimatization period in the beaker, each fish was carefully introduced to the center of the plastic radial maze for a 10-minute trial. The maze arms were each lined with one of five distinct solid-color panels; a light source was placed directly above the maze. Test colors were selected to match those expressed by the transgenic zebrafish strains under study, and the maze was rotated before each trial to control for spatial bias. Color preference was assessed using a time-sampling approach: the focal fish's location was recorded at 3-second intervals throughout the 10-minute trial, and preference for each color was calculated as the percentage of total samples in which the fish occupied the corresponding arm. The preferred color for each individual was then defined as the one associated with the highest proportion of observations across the trial.

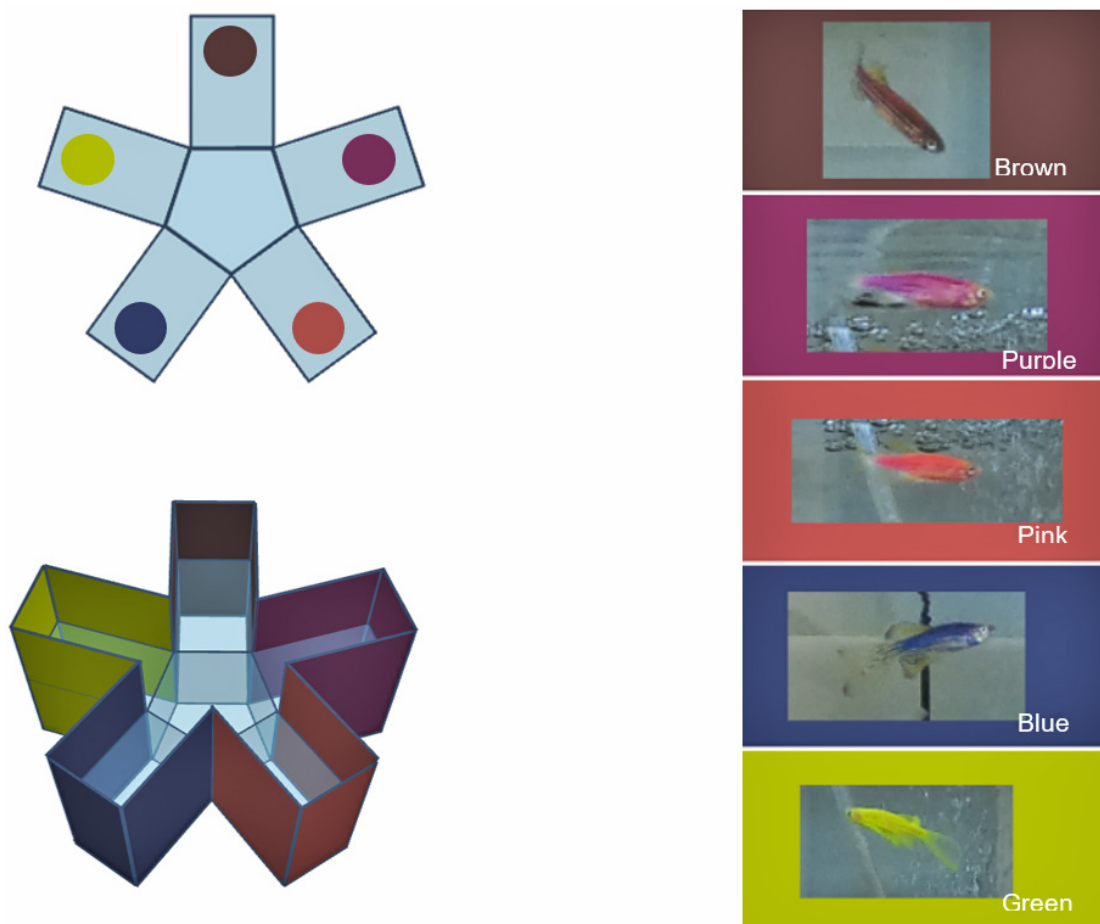


Fig. 1. Testing setup and colors used for color preference test

Social interactions assessment

The experimental protocol was partially adopted from [4], with adjustments to the camera angle, absence of food, and presence of LED lights for the duration of the observation. Social interactions were assessed in the $n = 4$ individuals that were alive at the start of the test.

Prior to the beginning of the experiment, all fish were fed to satiation to standardize initial hunger levels. Afterwards, one WT zebrafish was transported to the testing room using a 250 ml beaker and, following a 5-minute acclimatization period in the beaker, released into an experimental arena containing transgenic zebrafish. The experimental area consisted of a 40 L tank the floor of which was covered with dark brown aquarium gravel; the top was covered with a black plastic lid with LED light; and three sides of the tank were covered with black fabric to minimize stress and disturbance and to encourage natural behaviour.

An action camera (GoPro HERO8 Black) was positioned in front of the uncovered side of the arena and captured still images of the fish at regular 1 minute intervals over the subsequent 24 hours. Visual differences between fish allowed manual extraction of the two-dimensional spatial positions (i.e., x- and y-coordinates) of each individual in each image, and thus enabled analysis of individual interactions and movement over time. After the 24-hour observation period, each WT fish was transferred back to the tank with other WT fish.

For analysis, dyadic interactions involving WT were scored in each image: fish were considered interacting if within one body length (≤ 35 mm) of each other. Light reflections on the tank walls and WT color adaptation to the background sometimes obscured identification, so images were grouped into 5-minute blocks (5 consecutive images), and out of them the first image where all individuals could be distinctly identified and their spatial relationship clearly determined was used in the analysis. Interaction counts were normalized by the number of available individuals of each color. Because Green and Brown groups contained two individuals instead of three, their interaction counts were scaled by a factor of 1.5.

Statistical analysis

Color preference and social interaction tests

To assess whether zebrafish exhibited structured color preferences, we computed the mean proportion of trial time (environmental test) and normalized interaction rate (social test) for each color, with 95% bootstrap confidence intervals (1,000 resamples, resampling fish with replacement) to visualize uncertainty.

To test whether preferences deviated from random exploration, Friedman rank-sum tests were used (non-parametric repeated-measures ANOVA; $\alpha = 0.05$).

Cross-contextual consistency

To evaluate whether color preferences generalized across behavioral contexts, individual preference profiles were compared across the assays. For each of the four surviving wild-type subjects (F1, F2, F4, F6), preference profiles were constructed as (1) the proportion of total trial time spent in each colored arm of the radial maze (environmental assay) and (2) the proportion of normalized dyadic interactions with each transgenic color phenotype during the 24-hour free-interaction period (social assay).

Additionally, Spearman's rank correlation coefficients (ρ) were computed between mean environmental and social

preferences across the five color categories ($n = 5$). Given the small sample sizes, asymptotic p-values were supplemented with permutation tests (10,000 iterations) to assess robustness. All analysis was done in R

Results

Assessment of environmental color preference was done using a 5-arm radial maze, in which each arm matched the color of one group of transgenic conspecifics. To determine whether time allocation differed across the available colors, a Friedman rank-sum test was applied within the environmental context. The test revealed a significant deviation from a uniform time allocation (Friedman $\chi^2(4) = 12.88$, $p = 0.012$), indicating that focal WT fish exhibited structured, non-random environmental color preferences. Mean preferences ranked: Blue (33.5%) > Pink (28.1%) > Brown (15.1%) > Purple (13.6%) > Green (9.6%) (Fig. 2).

Additionally, the same test was applied to 4 individuals that underwent social testing, yielding the results (Friedman $\chi^2(4) = 12.80$, $p = 0.012$) that also suggest non-random environmental color preferences. Mean preferences ranked: Blue (39.7%) > Pink (32.4%) > Purple (12.9%) > Brown (8.4%) > Green (6.7%).

Individual-level preference patterns revealed substantial variation among subjects (Fig. 2). While Blue and Pink consistently ranked among the most preferred colors across most individuals, the magnitude of these preferences varied considerably. For instance, Fish 4 spent the majority of time (~60% of trial time) in the Pink compartment, which was used as a sign of its preference for Pink, whereas Fish 6 spent nearly two thirds of the time in the Blue arm, thus indicating a pronounced preference for this color. In contrast, Green was consistently the least or second-least preferred color across all subjects, with most fish spending less than 15% of time in the green arm.

In the social testing, focal WT fish could freely approach transgenic conspecifics of five colors during a 24-hour free-interaction period. To assess whether social interactions were distributed non-randomly across the available color phenotypes, a Friedman rank-sum test was applied within the social context. The test revealed a significant deviation from a uniform distribution of interactions ($\chi^2(4) = 11.39$, $*p = 0.022$), suggesting that focal WT fish exhibited structured, non-random preferences. Mean interaction rates ranked: Pink (30.2%) > Brown (21.5%) > Blue (20.4%) > Purple (14.9%) > Green (13.0%) (Fig. 3).

After conducting the statistical analyses described above, individual preference profiles to visualize cross-contextual consistency at the subject level were constructed (Fig. 3). The figure displays, for each of the four surviving wild-type fish (F1, F2, F4, F6) and the group mean, the proportional time spent in each colored arm during the environmental assay alongside the normalized proportion of dyadic interactions with each transgenic color phenotype during the social assay. These values were derived directly from the time-sampling records (3-second intervals over 10 minutes) for the radial maze test and from the interaction scoring in the 24-hour free-interaction videos. Plotting both metrics side-by-side enables direct visual comparison of how environmental and social color preferences are related.

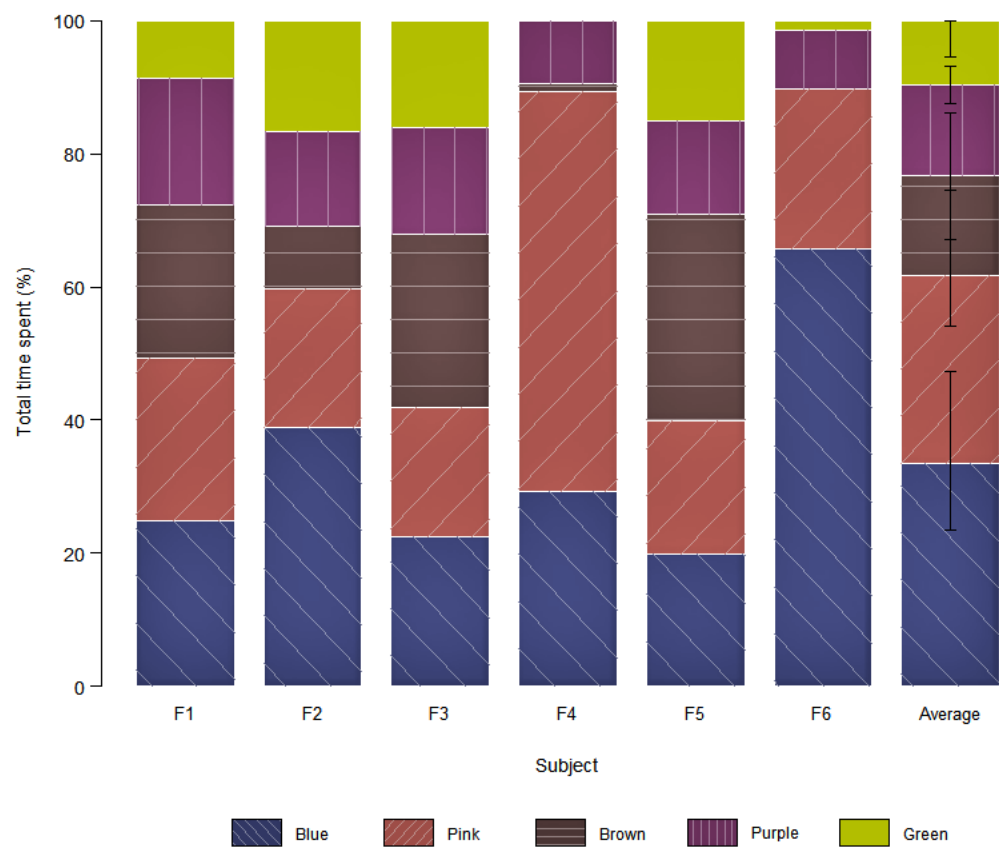


Fig. 2. Portion of time spent in each color zone

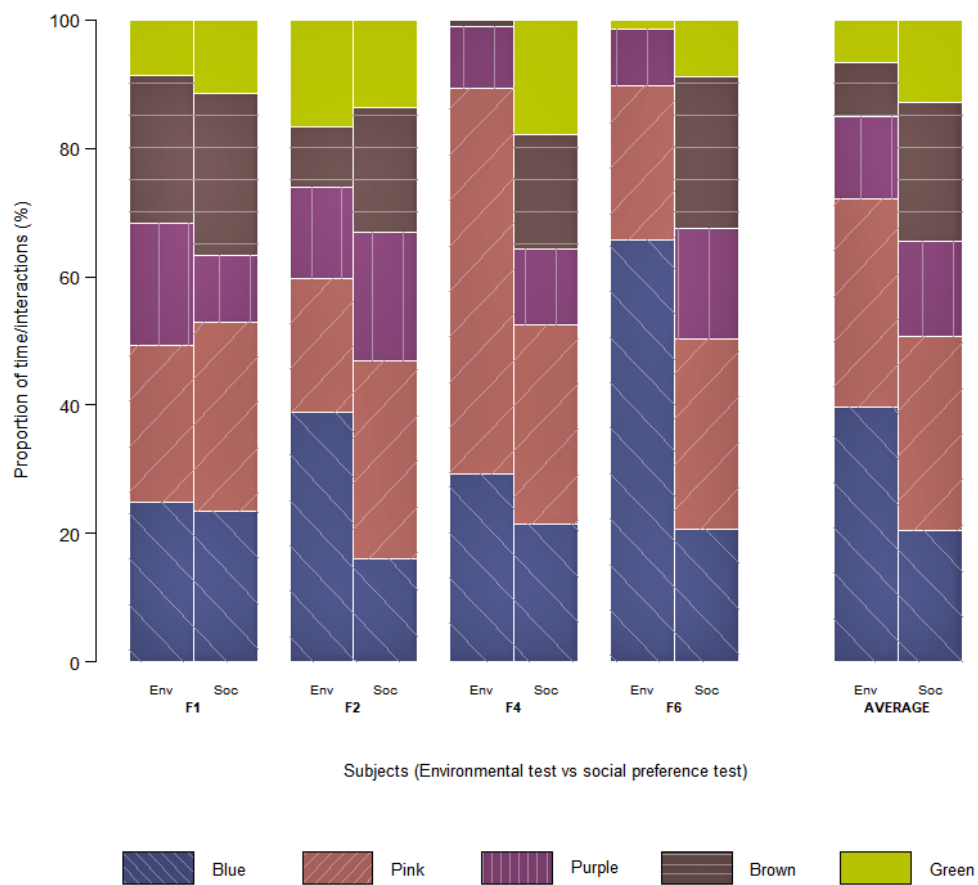


Fig. 3. Individual color preference profiles across environmental and social contexts

Fish 1 exhibited relatively consistent preferences, maintaining Pink, Blue, and Brown as the most preferred colors across both assays while consistently avoiding Green (though social interactions with Green increased slightly). For Fish 2 and Fish 6, Blue dominated the environmental test but declined substantially in the social assay. In the meantime, for Fish 6 Pink and Brown preferences increased, whereas Fish 2 exhibited a pronounced increase in values for Purple and Brown. Fish 4 showed a strong, stable preference for Pink, which noticeably decreased in the social context, yet also exhibited a notable emergence of Brown and Green in the social test, which were nearly absent in the environmental one.

While individual preference profiles (Fig. 3) capture subject-specific behavioral patterns, the variability across a small sample ($n = 4$) and inconsistent individual profiles limit the ability to discern statistically reliable context-dependent shifts at the individual level. To address this and identify broader

trends, we aggregated the normalized preference scores across all surviving subjects and calculated group means with 95% bootstrap confidence intervals (Fig. 4). These metrics reflect the proportional time allocation in the radial maze and the dyadic interaction rates from the 24-hour assay.

Despite high individual variation, the cohort consistently shifts from a strong environmental bias toward Blue to a socially driven preference for Pink and Brown, while Green and Purple remain persistently ranked lowest. While these patterns are evident, the overlapping confidence intervals preclude definitive conclusions regarding other distinctions: the relative ranking between Pink and Brown in the social assay remains ambiguous, as does the precise magnitude of Green's increase between contexts. Similarly, although Purple appears stable across both assays, its wide confidence intervals overlap with those of Brown and Green, making it statistically indistinguishable from those colors.

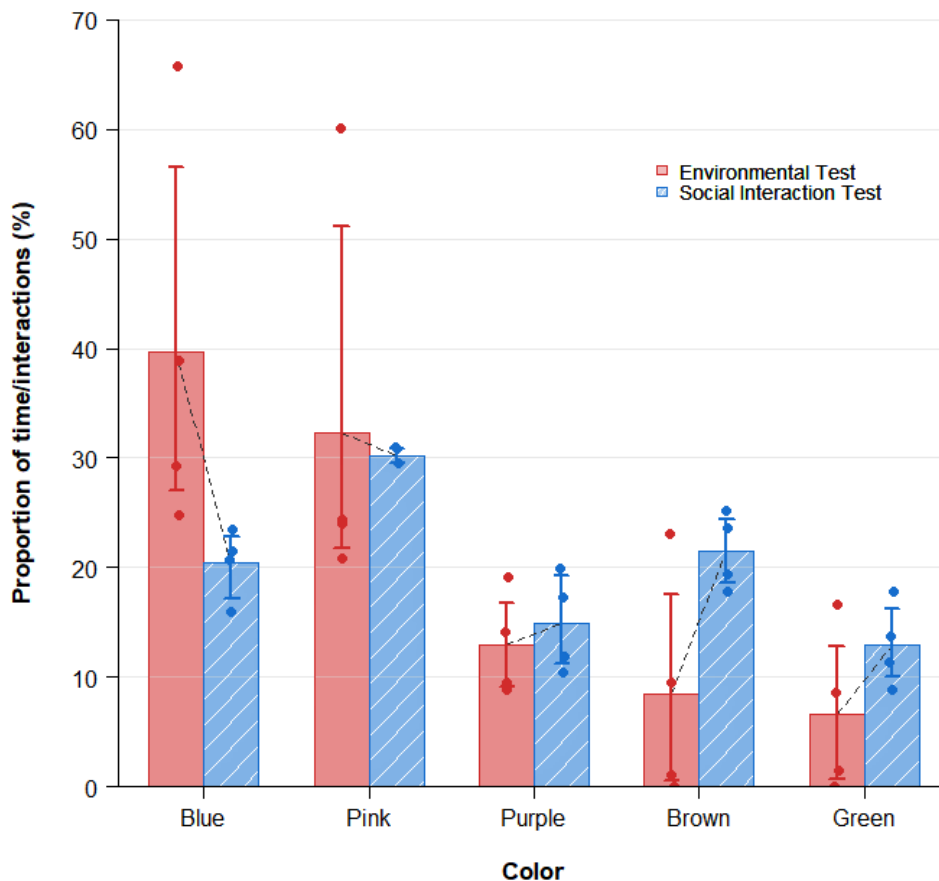


Fig. 4. Cross-contextual comparison of color preferences

Overall, Pink, Blue, and Brown occupied the highest ranks in both assays, although their internal hierarchy shifted between contexts. Conversely, Green and Purple consistently ranked the lowest, with Green being the least preferred color overall. In the social test, preference distributions tended to level out across the color cohort. Preference for Pink tended to slightly decline compared to the environmental assay, but despite this, Pink on average became the most preferred color, while values for Blue decreased descriptively in the social assay. Preference for Brown and Green showed a tendency to grow, while that for Purple stayed nearly stable on the cohort level across both contexts, despite high individual variability.

Although Spearman's rank correlation suggested a moderately strong positive trend linking environmental and social color preferences ($\rho = 0.70$), the result did not achieve statistical significance ($p = 0.233$; permutation $p = 0.235$).

Discussion

This study demonstrates that wild-type zebrafish exhibit structured, non-random color preferences in both environmental exploration and social interaction contexts. Across both assays, Pink and Blue consistently emerged as the most preferred stimuli, Brown and Purple were intermediates, while Green was the least preferred color. Although the precise rank order shifted between contexts, the overall color ranking

remained relatively stable despite a tendency for preference values to level out across color groups, likely reflecting the homogenizing effect of continuous free-swimming and natural shoal cohesion. A positive correlation ($\rho = 0.70$) of moderate magnitude was observed between environmental color preference and social interaction preference, but did not reach statistical significance ($p = 0.233$). Given the small sample size, this should be interpreted as preliminary evidence of potential cross-context consistency, requiring validation in larger cohorts. This suggests that sensory biases for specific visual cues may be one of the factors influencing behavior in social contexts. However, the partial, rather than complete cross-context consistency, aligns with the dual nature of coloration as both an environmental feature and a social signal. Notably, while aggregated data showed a tendency for preference values to level out or converge during the free-interaction social test, individual preference profiles often exhibited more pronounced biases. This contrast suggests that continuous social engagement may moderate extreme environmental preferences at the cohort level, whereas visual preferences remain highly variable at the individual level.

The finding that interaction rates differed across color phenotypes align with established research that indicates that zebrafish are capable of using visuals to differentiate between conspecifics [3], [10] and rely heavily on visual signals to mediate social behaviors. Previous work has documented various color preferences in zebrafish, including preference for red/pink and blue and aversion to green [20]. However, the literature is not entirely uniform; other studies have documented reversed or context-dependent preferences [21], [22], [23], likely attributable to variations in assay design, ambient lighting spectra, motivational state, or prior visual experience. The reproducibility of the pink/blue preference across our two distinct assays indicates that these color preferences may generalize across different experimental setups, though further validation is warranted.

Social preference in zebrafish is influenced by stimulus phenotype, test setup, visual access, and whether fish are separated by barriers [24]. In particular, many standard assays rely on transparent partitions, which preserve visual contact but prevent direct interaction. Unlike traditional assays using transparent partitions, our barrier-free approach allows individuals to interact freely, thus enabling interactions with both visual and physical cues to occur, providing a more natural context for assessing social behavior.

The primary limitation of this study was the small sample size, particularly in the social interaction assay where mortality reduced the number of subjects to 4. While our findings suggest non-random color preference patterns, the small sample size ($n = 4$ and $n = 6$ fish) limits statistical power to resolve pairwise differences and confirm cross-context correlations; replication with larger cohorts is required for definitive inference.

Introduction of Neon Tetras (*Paracheirodon innesi*) into the home tank of the wild-type zebrafish is another limitation to the conclusions of the study. While the majority of subjects ($n = 5$) underwent color preference testing prior to the introduction of the tetras, the last fish underwent testing after being co-housed with these brightly colored, blue-and-red-striped heterospecifics. Moreover, it is possible that exposure to the vivid blue and red/pink coloration of the tetras in the

period between color preference and social interaction assays could have reinforced or «primed» the innate preference for similar wavelengths and influenced the outcomes of the social interaction test. Additionally, usage of TetraPRO Colour Multi-Crisps, which has a distinct orange/red coloration, could potentially influence the color preferences, by creating a positive association with color.

Even though different fish availability was accounted for during the statistical analysis, fish sometimes join conspecific shoals characterized by a high degree of phenotypic homogeneity regardless of their own phenotype [25] to maximize the predator confusion effect and reduce their per capita risk through the oddity effect [26], [27]. This may partially explain why Green colored fish, whose numbers were less than those of other colors, were avoided in the social interaction test.

Additionally, unlike the other transgenic strains, the brown fish possessed dark stripes similar to those of wild-type *Danio rerio*. This potentially modulated social preferences, as zebrafish typically shoal with individuals that match the phenotype of those they were reared with [10].

Future research should aim to increase sample sizes to improve statistical power and enable detection of individual-level correlations between environmental and social color preferences. To minimize sensory priming effects, co-housing with brightly colored heterospecifics such as Neon Tetras and the use of vividly colored diets should be avoided. Expanding the range of social stimuli to include both conspecifics and heterospecifics would provide insight into the breadth and flexibility of color-related sensory biases. It would also be valuable to determine whether social interactions themselves can alter environmental color preferences. Finally, ensuring equal numbers of fish representing each color phenotype will help control for potential confounding effects of availability and allow obtaining more accurate results.

Conclusion

This pilot study indicates that wild-type zebrafish exhibit structured color preferences in both environmental and social contexts. In the environmental test, preferences were more pronounced, with Blue and Pink occupying the highest ranks and Green remaining the least preferred color. In the free-interaction social test, the distribution of interactions became more even across color phenotypes, but the general hierarchy was not completely lost: Pink and Blue remained among the highest-ranked colors, Brown occupied an intermediate-to-high position, and Green remained the least preferred stimulus.

The correlation between environmental and social color rankings was positive and of moderate magnitude, but it did not reach statistical significance. Therefore, the present data do not allow us to conclude that environmental color preference reliably predicts social partner choice. However, individual profiles suggest that cross-contextual consistency may still be present in some fish. For example, several individuals retained similar high-ranking colors across assays, whereas others showed redistribution of preferences in the social context. This indicates that environmental color preferences may contribute to social targeting, but their expression is likely modified by additional social factors, including free-swimming interactions, proximity constraints, shoal cohesion, and individual behavioral variability.

Thus, the main outcome of this pilot study is not a definitive confirmation of cross-contextual color preference, but the identification of a promising behavioral tendency that should be tested further. The observed individual patterns and group-level shifts justify conducting a larger study with improved design parameters. Future experiments should increase sample size, standardize the number of stimulus fish across

color phenotypes, avoid prior exposure to brightly colored heterospecifics or vividly colored diets, and include more controlled assessment of individual-level correlations. Such improvements would make it possible to determine whether the tendencies observed here reflect a reproducible relationship between environmental color preference and social interaction patterns in zebrafish.

REFERENCES:

1. D.P. Croft, R. James, A.J. W. Ward, M.S. Botham, D. Mawdsley, and J. Krause, Assortative interactions and social networks in fish, *Oecologia*, vol. 143, no. 2, pp. 211–219, Mar. 2005.
2. J. Krause and G.D. Ruxton, *Living in Groups*. Oxford University Press, 2002.
3. M. Aslanzadeh et al., The body size of stimulus conspecifics affects social preference in a binary choice task in wild-type, but not in *dyrk1aa* mutant, zebrafish, *Zebrafish*, vol. 16, no. 3, pp. 262–267, Jun. 2019.
4. T.W. Pike, M. Samanta, J. Lindström, and N.J. Royle, Behavioural phenotype affects social interactions in an animal network, *Proc. Biol. Sci.*, vol. 275, no. 1650, pp. 2515–2520, Nov. 2008.
5. I. Barber and H.A. Wright, How strong are familiarity preferences in shoaling fish? *Anim. Behav.*, vol. 61, no. 5, pp. 975–979, May 2001.
6. P.D. Dijkstra, C. Hemelrijk, O. Seehausen, and T.G. G. Groothuis, Color polymorphism and intrasexual competition in assemblages of cichlid fish, *Behav. Ecol.*, vol. 20, no. 1, pp. 138–144, Jan. 2009.
7. M. S. de Abreu et al., Color as an important biological variable in zebrafish models: Implications for translational neurobehavioral research, *Neurosci. Biobehav. Rev.*, vol. 124, pp. 1–15, May 2021.
8. J.G. Godin and L.A. Dugatkin, Female mating preference for bold males in the guppy, *Poecilia reticulata*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 93, no. 19, pp. 10262–10267, Sep. 1996.
9. K. Miyamoto, Effects of body color luminance and behavioral characteristics on predation risk in salmonid fishes, *Hydrobiologia*, vol. 783, no. 1, pp. 249–256, Dec. 2016.
10. R.E. Engeszer, M.J. Ryan, and D.M. Parichy, Learned social preference in zebrafish, *Curr. Biol.*, vol. 14, no. 10, pp. 881–884, May 2004.
11. J. Cachat et al., Unique and potent effects of acute ibogaine on zebrafish: the developing utility of novel aquatic models for hallucinogenic drug research, *Behav. Brain Res.*, vol. 236, no. 1, pp. 258–269, Jan. 2013.
12. R. Gerlai, M. Lahav, S. Guo, and A. Rosenthal, Drinks like a fish: zebra fish (*Danio rerio*) as a behavior genetic model to study alcohol effects, *Pharmacol. Biochem. Behav.*, vol. 67, no. 4, pp. 773–782, Dec. 2000.
13. A.P. Singh and C. Nüsslein-Volhard, Zebrafish stripes as a model for vertebrate colour pattern formation, *Curr. Biol.*, vol. 25, no. 2, pp. R81–92, Jan. 2015.
14. Â.L. Piato et al., Unpredictable chronic stress model in zebrafish (*Danio rerio*): behavioral and physiological responses, *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry*, vol. 35, no. 2, pp. 561–567, Mar. 2011.
15. R. Spence and C. Smith, Innate and Learned Colour Preference in the Zebrafish, *Danio rerio*, *Ethology*, vol. 114, no. 6, pp. 582–588, Jun. 2008.
16. P. Siregar et al., Method standardization for conducting innate color preference studies in different zebrafish strains, *Biomedicines*, vol. 8, no. 8, p. 271, Aug. 2020.
17. J.L. Snekser, S.P. McRobert, C.E. Murphy, and E.D. Clotfelter, Aggregation behavior in wildtype and transgenic zebrafish, *Ethology*, vol. 112, no. 2, pp. 181–187, Feb. 2006.
18. J. De Oliveira, E. Chadili, C. Turies, F. Brion, X. Cousin, and N. Hinfray, A comparison of behavioral and reproductive parameters between wild-type, transgenic and mutant zebrafish: Could they all be considered the same «zebrafish» for reglementary assays on endocrine disruption? *Comp. Biochem. Physiol. C. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 239, no. 108879, p. 108879, Jan. 2021.
19. R.N. Hughes and C.M. Blight, Algorithmic behaviour and spatial memory are used by two intertidal fish species to solve the radial maze, *Anim. Behav.*, vol. 58, no. 3, pp. 601–613, Sep. 1999.
20. S. Zhang et al., Reversal of reserpine-induced depression and cognitive disorder in zebrafish by sertraline and Traditional Chinese Medicine (TCM), *Behav. Brain Funct.*, vol. 14, no. 1, p. 13, Jun. 2018.
21. C. Saverino and R. Gerlai, The social zebrafish: behavioral responses to conspecific, heterospecific, and computer animated fish, *Behav. Brain Res.*, vol. 191, no. 1, pp. 77–87, Aug. 2008.
22. A. Buatois, S. Nguyen, C. Bailleul, and R. Gerlai, Colored-light preference in zebrafish (*Danio rerio*), *Zebrafish*, vol. 18, no. 4, pp. 243–251, Aug. 2021.
23. X. Li et al., SiO₂ nanoparticles change colour preference and cause Parkinson's-like behaviour in zebrafish, *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, p. 3810, Jan. 2014.
24. A. Ogi et al., Social preference tests in zebrafish: A systematic review, *Front. Vet. Sci.*, vol. 7, p. 590057, 2020.
25. S. Cattelan and M. Griggio, Within-shoal phenotypic homogeneity affects shoaling preference in a killifish, *Biol. Lett.*, vol. 14, no. 8, p. 20180293, Aug. 2018.

26. L. Landeau and J. Terborgh, Oddity and the «confusion effect» in predation, Anim. Behav., vol. 34, no. 5, pp. 1372–1380, Oct. 1986.
27. D. C. Krakauer, Groups confuse predators by exploiting perceptual bottlenecks: a connectionist model of the confusion effect, Behav. Ecol. Sociobiol., vol. 36, no. 6, pp. 421–429, Jun. 1995.

Определение видовой принадлежности мяса в комбинированных продуктах методом полимеразной цепной реакции

Давтян Наре Арменовна, учащаяся 10-го класса

Научный руководитель: Лазарева Евгения Михайловна, учитель биологии

ОАНО «Школа «Лето́во» (г. Москва)

В статье представлены результаты пилотного исследования по выявлению ДНК свиньи (*Sus scrofa domestica*) в комбинированных продуктах питания методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени. Целью работы было выявление ДНК свиньи в готовых комбинированных продуктах и оценка применимости данного подхода для контроля достоверности маркировки. Проанализированы четыре образца, по маркировке не содержащие свинину: варёная колбаса из индейки, сосиски из индейки, пельмени говяжьи и влажный корм для собак с кроликом. Выделение ДНК проводилось с помощью коммерческого набора. ПЦР в реальном времени выполнялась с использованием набора *Sus scrofa Ident RT* с видоспецифичными праймерами и флуоресцентным зондом. ДНК свиньи обнаружена только во влажном корме для собак ABBA Adult «С кроликом с рисом», что указывает на несоответствие фактического состава продукта заявленной маркировке. В трёх продуктах для человека ДНК свиньи не выявлена. Метод ПЦР-РВ продемонстрировал применимость для качественных проверок сложных пищевых продуктов. Результаты подчёркивают важность контроля маркировки, что имеет особое значение для потребителей с религиозными, этическими и аллергическими ограничениями.

Ключевые слова: ПЦР в реальном времени, детекция свинины, *Sus scrofa domestica*, видовая идентификация, фальсификация пищевых продуктов, корм для животных, маркировка, цитохром *b*.

1. Введение
Достоверность маркировки пищевых продуктов — один из ключевых элементов защиты прав потребителей. Несоответствие фактического состава заявленному создаёт риски для людей с пищевыми ограничениями религиозного, аллергического или этического характера.

Проблема фальсификации видового состава мясной продукции зафиксирована в многочисленных исследованиях [1, 2]. Наиболее известным примером стал «скандал с кониной» 2013 года в Европе, когда ДНК лошади была обнаружена в говяжьих полуфабрикатах [3]. В России контроль состава продуктов осуществляется в рамках технических регламентов Таможенного союза, однако случаи несоответствия состава маркировке периодически фиксируются надзорными органами [4].

Среди методов видовой идентификации мяса особое место занимают ДНК-методы. В отличие от иммунологических (ИФА) и спектрометрических подходов, они сохраняют работоспособность в термически обработанных

продуктах [8]. Наибольшей специфичностью и чувствительностью обладает ПЦР в реальном времени (ПЦР-РВ), позволяющая детектировать видоспецифичные фрагменты ДНК даже в сложных многокомпонентных продуктах [5, 7].

Целью исследования было **выявление ДНК свиньи в готовых комбинированных продуктах методом ПЦР в реальном времени и оценка применимости данного подхода для контроля достоверности маркировки.**

2. Материалы и методы

2.1. Объекты исследования

Для анализа отобраны четыре продукта, приобретённые в розничных магазинах г. Москвы. Критерий отбора — отсутствие свинины в декларируемом составе:

1. Колбаса варёная «Индейкайт» из филе индейки;
2. Сосиски «Индейкайт Градос» из индейки;
3. Пельмени «Мясной Дворник» фирменные (в маркировке заявлена говядина, свинина не указана);
4. Влажный корм для собак ABBA Adult «С кроликом с рисом» (кат. 850 г) — на этикетке свинина не указана.



Рис. 1. Образцы продуктов, использованных в исследовании: 1 — колбаса из индейки; 2 — сосиски из индейки; 3 — пельмени говяжьи; 4 — корм ABBA Adult с кроликом

2.2. Выделение ДНК

Из каждого образца отбирали приблизительно 100–200 мг, которые гомогенизировали механически. Выделение ДНК проводилось с помощью коммерческого набора для экстракции нуклеиновых кислот из продуктов питания (метод сорбции на силикагелевой мембране в хаотропных условиях). Протокол включал: лизис образца в буфере с протеиназой К; связывание ДНК на мембране; трёхкратную отмывку буферами; элюцию в 100 мкл воды, свободной от нуклеаз. Концентрацию и чистоту элюата (соотношение A_{260}/A_{280}) контролировали спектрофотометрически.

2.3. ПЦР в реальном времени

Для детекции ДНК свиньи использовался набор «Sus scrofa Ident RT» (кат. № ID-203, ООО «Синтол», Россия). Набор содержит видоспецифичные праймеры и флуоресцентный TaqMan-зонд к консервативному участку митохондриального гена цитохрома *b* (*Cyt b*) *Sus scrofa domestica*. Выбор митохондриального гена обусловлен высоким числом его копий в клетке, что повышает чувствительность анализа при работе с деградированной ДНК из термически обработанных продуктов [5, 7].

Реакционная смесь объёмом 20 мкл включала: мастер-микс (содержащий HotStart ДНК-полимеразу, dNTPs, $MgCl_2$), праймеры и зонд из набора, а также 5 мкл выделенной ДНК-матрицы. Амплификацию проводили по следующему протоколу: начальная денатурация — 95 °C, 5 мин; 40 циклов: денатурация 95 °C — 15 с, отжиг и элонгация 60 °C — 40 с. Флуоресцентный сигнал детектировался в канале FAM.

2.4. Контрольные реакции

Каждый эксперимент включал следующие контроли:

— **Положительный контроль:** геномная ДНК свиньи из набора — подтверждает работоспособность реагентов

— **Отрицательный контроль:** ДНК другого вида — проверяет видоспецифичность праймеров; сигнал должен отсутствовать.

— **Контроль ингибирования:** внутренний положительный контроль (канал R6G/HEX/Yellow), входящий в состав набора, амплифицирующийся в той же реакционной смеси, что и целевая ДНК, позволяла выявить ПЦР-ингибиторы в выделенной ДНК. Каждый образец анализировался в двух технических повторностях.

2.5. Интерпретация результатов

Образец считался **положительным**, если в канале FAM сигнал пересекал пороговую линию (значение $C_t \leq 40$) в обеих повторностях. Образец считался **отрицательным**, если сигнал отсутствовал в обеих повторностях ($C_t > 35$). Значение C_t отражает номер цикла ПЦР, на котором интенсивность флуоресценции пересекает пороговое значение: чем ниже C_t — тем больше исходная концентрация ДНК-мишени в образце.

2.6. Лабораторное оснащение

Работа выполнялась в лаборатории школы «Летово». Использовалось следующее оборудование: микроцентрифуга, автоматические дозаторы с аэрозольными барьерами, амплификатор с детекцией в реальном времени, одноразовые пробирки, наконечники для дозаторов. Для предотвращения контаминации использовались физически разделённые зоны для пробоподготовки, постановки ПЦР и детекции результатов.

3. Результаты

По результатам ПЦР-РВ из четырёх проанализированных образцов ДНК свиньи обнаружена только в одном — во влажном корме для собак ABBA Adult «с кроликом с рисом» (образец № 4). Сводные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты ПЦР-РВ детекции ДНК свинины в исследованных образцах

№	Образец / маркировка	C_t (повтор 1)	C_t (повтор 2)	C_t (эталон)	Результат
1	Колбаса «Индийкайт» (индейка)	—	—	23,7	Отрицательный
2	Сосиски «Индийкайт Грандос» (индейка)	—	—	23,7	Отрицательный
3	Пельмени «Мясной Дворник» (говядина)	—	—	23,7	Отрицательный
4	Корм ABBA Adult «с кроликом с рисом»	31,7	31,3	23,7	Положительный*
Контрольные реакции					
	Положительный контроль (ДНК свиньи)	23,7	23,7	23,7 (эталон)	+
	Отрицательный контроль (ДНК другого вида)	—	—	23,7	—

* — положительный результат подтверждён в обеих повторностях; « — » — сигнал не зарегистрирован ($C_t > 35$).

В образцах № 1–3 сигнал в канале FAM в обеих повторностях не обнаружен. Отрицательный контроль сигнала не давал. Во всех образцах, включая отрицательный контроль, регистрировался сигнал внутреннего контроля по каналу HEX (Ct от 29,8 до 30,9), что свидетельствует об отсутствии значимого ингибирования во всех образцах.

В образце № 4 (корм АВВА) сигнал в канале FAM зарегистрирован в обеих технических повторностях: Ct = 31,7 и Ct = 31,3. Положительный контроль (чистая ДНК свиньи) давал сигнал при Ct = 23,7. Чтобы понять, что означает разница в ~8 циклов, нужно вспомнить принцип ПЦР: в каждом цикле количество копий ДНК удваивается. Значит, 8 дополнительных циклов, потребовавшихся для детекции в образце № 4, соответствуют примерно $2^8 \approx 250$ -кратной меньшей исходной концентрации ДНК свиньи по сравнению с положительным контролем. Иными словами, свинина в корме есть, но в следовых количествах. Такой уровень совместим как с производственной контаминацией, так и с присутствием незаявленного ингредиента — и то, и другое недопустимо, является нарушением.

4. Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют следовое присутствие ДНК свиньи в корме АВВА Adult «с кроликом с рисом», тогда как три продукта для человека соответствуют заявленной маркировке по критерию отсутствия ДНК *Sus scrofa domestica*. Необходимо подчеркнуть, что использованный метод является качественным: он позволяет надёжно зафиксировать сам факт присутствия ДНК, но без специальной калибровки не даёт точной оценки массовой доли свинины в продукте. Таким образом, корректнее говорить об обнаружении следов ДНК, а не о числовом подтверждённом превышении допустимых норм содержания.

Причины присутствия ДНК свиньи в корме могут быть различными: перекрёстная контаминация на производственной линии, использование незаявленного сырья с целью снижения себестоимости, либо ошибка в рецептуре или маркировке. Разграничить эти варианты на основании качественного ПЦР-анализа одной партии не представляется возможным.

Тем не менее факт обнаружения ДНК свинины в продукте, маркировка которого её не предполагает, актуален с точки зрения защиты потребителей. Даже корма для домашних животных нередко выбираются с учётом рели-

гиозных или этических предпочтений владельца, а также при аллергии питомца на конкретные вещества. Недостоверность маркировки в таком случае создаёт реальные риски.

С методической точки зрения исследование подтверждает применимость ПЦР-РВ для исследования сложных пищевых продуктов, включая термически обработанные продукты, где иммунологические методы (ИФА) могут давать ложноотрицательные результаты вследствие денатурации антигенов [6]. Использование двух технических повторностей и полного набора контролей повышает достоверность полученных данных.

Ограничения исследования: пилотный характер работы (n = 4 образца), отсутствие количественной оценки содержания ДНК, анализ единственной партии каждого продукта. Для статистически значимых выводов о распространённости нарушений маркировки необходима расширенная выборка.

5. Выводы

— Метод ПЦР в реальном времени применим для качественной идентификации ДНК свинины в комбинированных продуктах питания и кормах для животных, включая термически обработанные матрицы.

— Из четырёх проанализированных образцов следы ДНК свинины (*Sus scrofa domestica*) выявлены только в одном — во влажном корме для собак АВВА Adult «с кроликом с рисом» (Ct = 31,7 и 31,3 в двух повторностях). Три продукта для человека по данному критерию соответствуют заявленному составу.

— Полученные данные показывают, что ПЦР в реальном времени может применяться как инструмент предварительной молекулярной проверки маркировки, в том числе в сегменте кормов для домашних животных

Практическая значимость

Полученные результаты могут быть использованы:

— Потребителями-как наглядное подтверждение важности изучения состава продуктов и кормов при наличии пищевых ограничений;

— В образовательных целях -для демонстрации возможностей метода ПЦР при решении прикладных задач контроля качества;

— Производителями-как напоминание о необходимости контроля перекрёстного загрязнения на производственных линиях;

— Как основа для расширенного исследования с увеличенной выборкой и количественным анализом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Nicolai, Z. B. Species determination — Can we detect and quantify meat adulteration? / Z. B. Nicolai, K. V. Finn, H. K. Anders. — Текст: непосредственный // Meat Science. — 2009. — № 83 (2). — С. 165–174.
2. Cawthorn, Donna-Mareè A high incidence of species substitution and mislabelling detected in meat products sold in South Africa / Donna-Mareè Cawthorn, A. S. Harris, C. H. Louwrens. — Текст: непосредственный // Food Control. — 2013. — № 32 (2). — С. 440–449.
3. Michael, J. W. Horse Meat in Beef Products — Species Substitution 2013 / J. W. Michael. — Текст: электронный // ResearchGate: [сайт]. (дата обращения: 14.05.2026).
4. Роспотребнадзор О результатах надзора за соответствием требованиям технических регламентов промышленной продукции / Роспотребнадзор. — Текст: электронный // zpp.rosпотребнадзор.ru: [сайт]. (дата обращения: 14.05.2026).

5. López-Andreo, M. Evaluation of post-PCR melting temperature analysis for meat species identification in mixed DNA samples / M. López-Andreo, A. Garrido-Pertierra, A. Puyet. — Текст: непосредственный // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2006. — № 21. — С. 7973–7978.
6. Sentandreu M. Á., Sentandreu E. Authenticity of meat products: tools against fraud // Food Research International. — 2014. — Vol. 60. — P. 19–29.
7. López-Andreo, M. Evaluation of post-PCR melting temperature analysis for meat species identification in mixed DNA samples / M. López-Andreo, A. Garrido-Pertierra, A. Puyet. — Текст: непосредственный // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2006. — № 21. — С. 7973–7978.

Исследование амплитудно-частотной характеристики звука колеблющейся линейки от ее существенных параметров

Кривороль Анна Александровна, учащаяся 10-го класса

Научный руководитель: Сухов Артем Дмитриевич, учитель физики

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В данной работе был исследован механизм образования звука при колебаниях закрепленной консольно-балочным способом линейки и связь механических затухающих колебаний линейки со спектром излучаемого звука. Была применена классическая модель Эйлера-Бернулли изгиба тонких балок, на основе которой были проведены теоретический частотный анализ звука и его дальнейшая экспериментальная проверка, а также исследованы амплитуда спектральных компонент через модовое разложение формы линейки и коэффициент затухания наблюдаемых частот.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, спектр звука, консольная балка, собственные частоты.

Введение
В данной работе исследуются колебания свободного края линейки, закрепленной другим концом на поверхности, и возникающий вследствие возбуждения колебаний системы звук. С точки зрения сопротивления материалов подобная система с хорошей точностью описывается консольно-балочной моделью закрепления [1]. Консольной балкой называют упругое тело, жестко зафиксированное с одного конца и не имеющее опоры с другого. Для таких систем теория Эйлера-Бернулли изгиба тонких балок, в которой прогиб балки незначителен по сравнению с ее длиной, предполагает наличие дискретного набора собственных частот колебаний со своими пространственными формами.

Рассматриваемая в статье модель закрепления линейки удовлетворяет критериям применимости модели консольной балки, так как один ее конец был жестко закреплен на поверхности стола, а свободная часть линейки имеет длину, значительно превышающую толщину, из-за чего система может рассматриваться в приближении тонкой балки. Более того, малые деформации линейки по сравнению с длиной ее свободного края, наблюдаемые в наших экспериментах, обуславливают применимость теории Эйлера-Бернулли [1] малых изгибов.

Следует отметить, что в общей постановке задачи упругое тело способно испытывать несколько типов деформаций: продольные растяжение и сжатие, кручение, поперечный сдвиг и изгиб. Однако в рассматриваемой задаче наиболее существенным механизмом является именно изгиб, что связано с характером возбуждения системы.

Отклонение свободного конца линейки от положения равновесия создает поперечную нагрузку, вызывающую распределенный вдоль длины балки изгибающий момент. При этом продольные деформации пренебрежимо малы, так как смещения происходят преимущественно перпендикулярно оси линейки, а крутильные частоты практически не возбуждаются из-за симметричности приложения нагрузки относительно центральной оси линейки, расположенной вдоль ее длины.

Таким образом, в приближении динамика системы может рассматриваться как чисто изгибная, что позволяет использовать классическую модель тонкой балки без необходимости учитывать более сложные эффекты, такие как вращательная инерция поперечных сечений и поперечный сдвиг, являющиеся существенными лишь при больших частотах, малых длинах свободного края или значительных толщинах балки.

Теория Эйлера-Бернулли основывается на предположении, что поперечные сечения балки остаются плоскими до и после деформации, а также сохраняют перпендикулярность нейтральной оси балки [1]. Данные рассуждения существенно упрощают описание изгибных колебаний и приводят к основному волновому уравнению четвертого порядка (описанному ниже в статье). Именно эта теория используется далее в работе для расчета собственных частот линейки и анализа спектрального состава излучаемого звука.

Дополнительно в начале работы исследовалось влияние способа возбуждения колебаний в системе на набор частот излучаемого звука. Экспериментально были рас-

смотрены 2 таких способа: отклонение линейки от положения равновесия и сброс попрыгунчика на свободный конец линейки. Было установлено, что при различных методах возбуждения колебаний в системе набор наблюдаемых мод остается одинаковым, что согласуется с теорией колебаний.

Рассматриваемая система линейна, так как в ней частоты не меняются со временем и не демонстрируют амплитудную зависимость, поэтому собственные моды определяются только геометрическими размерами линейки, ее материалом и условиями закрепления, а способ возбуждения влияет на распределение передаваемой системе энергии между частотами и на их амплитуду мод колебаний соответственно [1]. Поскольку первичной целью работы является исследование частотной характеристики звука системы, в работе был применен самый воспроизводимый метод — отклонение свободного края линейки с последующим отпусканием.

Таким образом, общей целью работы являются анализ механизма образования звука при колебаниях консольно-закрепленной линейки и исследование амплитудно-частотной характеристики данного звука.

Определение механизма образования звука

Первым этапом работы было определение объекта, являющегося непосредственным источником звука. Была выдвинута гипотеза о достоверности одного из двух предполагаемых механизмов звукообразования при колебаниях линейки: акустического излучения самой линейки или поверхности стола вследствие передачи ему энергии линейки.

Для проверки была проведена серия измерений громкости звука в пяти местах вокруг установки: микрофон располагался над и под свободным концом линейки, перед линейкой, над закрепленным концом линейки и над закрепляющей его на конце стола струбциной.

Эксперимент показал выраженную анизотропию звукового излучения. Максимальная громкость наблюдалась в областях, расположенных над и под свободным концом линейки, тогда как вблизи поверхности стола (над струбциной и закрепленным концом линейки) интенсивность звука была существенно ниже, а перед линейкой — умеренной. Полученные результаты позволяют предположить, что основной вклад в образование звука вносит именно линейка, что согласуется с рассуждениями об образовании по разные стороны от поверхности линейки при совершении ею колебаний переменных зон разрежения и сжатия [6], соответствующих локальным изменениям давления, из-за чего возмущения, возникающие за счет компенсации разницы давления, распространяются от балки в виде продольной звуковой волны [6].

Исследование механических колебаний линейки

Для исследования механических колебаний линейки с помощью скоростной камеры была снята зависимость координаты свободного конца линейки от времени, причем движение края в полной мере описывалось моделью затухающих колебаний [7]:

$$x = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (\text{Уравнение 1})$$

где A — начальная амплитуда, γ — коэффициент затухания, ω — угловая частота, φ — начальная фаза.

Использование модели затухающих колебаний обусловлено тем, что реальная система не является консервативной: при движении часть механической энергии рассеивается за счет внутреннего трения материала линейки, передачи энергии в место закрепления, вязкого сопротивления воздуха и акустического излучения.

Аппроксимация экспериментальных данных с хорошей точностью соответствия теоретической модели, из чего можно сделать вывод, что в первом приближении суммарные диссипативные потери могут быть эффективно описаны одним коэффициентом затухания. По результатам обработки была найдена соответствующая механическая частота затухающих колебаний линейки, равная 39.1 Гц.

Спектральный анализ звука

Излучаемый колеблющейся линейкой звук записывался на профессиональный рекордер в комнате звукозаписи для избежания влияния шумов на получаемый спектр и далее обрабатывался в программе Audacity при помощи преобразования Фурье, которое позволяет представить временной сигнал как суперпозицию синусоидальных компонент различных частот [5]. Для линейных систем это особенно удобно, так как каждая собственная мода проявляется в спектре звука как отдельный пик.

Спектральный анализ звука показал наличие выраженных пиков мод на широком диапазоне частот, и первая наблюдаемая частота соответствовала вышеупомянутой механической частоте затухающих колебаний линейки.

Наличие множества частот соответствует теории колебаний консольной балки. В теоретической постановке подобная система обладает бесконечным набором собственных мод, каждая из которых обладает собственной пространственной формой изгиба. Например, вышеупомянутая механическая частота колебаний линейки является первым пиком в спектре звука. Именно первая мода обычно возбуждается наиболее эффективно при простом отклонении свободного конца, поскольку начальная форма деформации имеет наибольшее перекрытие с пространственной формой первой собственной моды (см. рис. 1).

Теоретически форма линейки в движении может быть представлена в качестве суперпозиции бесконечного числа независимых мод колебаний, однако в реальном эксперименте наблюдаются только те частоты, которым при возбуждении колебаний линейки передается достаточное для возникновения количество энергии, и амплитуда данных мод которых превышает чувствительность детектирования программы.

Кроме того, высокочастотные моды обычно возбуждаются сложнее по двум причинам: начальное отклонение линейки по форме сильнее похоже на низшие частоты, а также более высокие моды обладают более сложной пространственной структурой и требуют передачи энергии в более локализованные деформации системы.

Таким образом, наблюдаемый спектр интерпретируется как набор возбужденных собственных мод линейки.

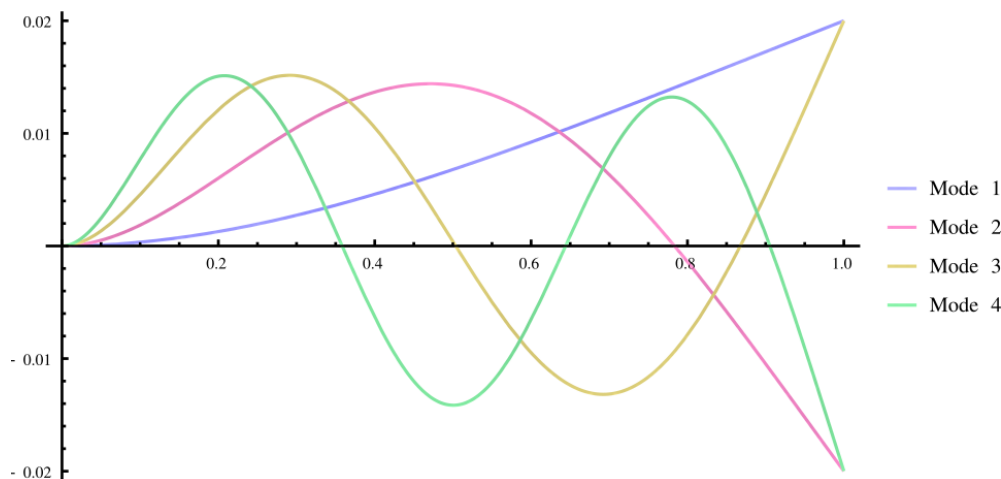


Рис. 1. Формы собственных мод консольной балки

Теория собственных колебаний консольной балки

Для теоретического описания частотного спектра звука колеблющейся линейки была использована классическая теория изгибных колебаний тонких балок Эйлера-Бернулли. Основным уравнением, описывающим малые поперечные изгибные колебания балки, является основное волновое уравнение теории балок Эйлера-Бернулли [3]:

$$EI \cdot \frac{\partial^4 \omega(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \cdot \frac{\partial^2 \omega(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (\text{Уравнение 2})$$

где E — модуль Юнга материала балки, I — момент инерции поперечного сечения балки, ρ — плотность материала балки, A — площадь поперечного сечения балки, $\omega(x, t)$ — поперечное смещение точки балки.

Физический смысл данного уравнения интерпретируем далее по частям. Первое слагаемое, содержащее четвертую производную по координате, характеризует упругий отклик балки на изгиб и определяет ее сопротивление деформации: с увеличением произведения модуля Юнга и момента инерции, называемого изгибной жесткостью балки, сопротивление системы изгибу будет также увеличиваться. Второе слагаемое отвечает за инерционные свойства системы и описывает сопротивление массы балки ускоренному движению.

Для нахождения собственных частот консольной балки рассматривается задача о ее свободных колебаниях при заданных граничных условиях фиксации: на закрепленном конце линейки отсутствуют как смещение, так и поворот, тогда как на свободном конце отсутствуют изгибающий момент и поперечная сила. Данные граничные условия определяют допустимые формы колебаний системы.

Решение основного волнового уравнения в вышеописанных граничных условиях сводится к задаче с дискретными значениями, соответствующим собственным модам колебаний консольной балки.

В процессе решения данного уравнения возникает безразмерный коэффициент β_n (где n — натуральный номер моды), значения которого определяются из характеристического уравнения, получаемого после подстановки граничных условий. Каждому значению данного коэффициента соответствуют собственная мода колебаний балки со уникальной пространственной формой.

Таким образом, формула собственных частот колебаний консольной балки выглядит следующим образом [1]:

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}, \quad (\text{Уравнение 3})$$

где L — длина свободного края линейки.

На основе данной формулы далее в работе закономерно будут рассмотрены и экспериментально проверены следующие основные зависимости: частоты определенного порядкового номера от длины свободного края линейки, частоты от ее порядкового номера, а также параметрически, для разных материалов линейки, частоты определенного порядкового номера от длины свободного края линейки при разных толщинах системы.

Исследование зависимости частоты определенного порядкового номера от длины свободного края

Одним из ключевых параметров, влияющих на собственные частоты колебаний консольной балки, является длина ее свободного края. Для экспериментальной проверки теоретической зависимости проводилась серия измерений, в которой длина свободного конца линейки последовательно изменялась от 2 до 20 см с шагом 2 см. Для каждого промежуточного значения длины записывался спектр излученного из-за колебаний линейки звука, после чего определялись количественные значения первых четырех наблюдаемых мод. Снимать значения более высоких частот было нецелесообразным, так как из-за описанных во введении причин погрешности определения мод давали существенное различие между измеренными и действительными данными.

Значения каждой моды при разных длинах свободного края соединялись кривыми на общем графике частоты определенного порядкового номера от длины свободного края. Эксперимент показал, что все исследуемые моды демонстрируют одинаковую качественную тенденцию: при увеличении длины свободного края частоты монотонно уменьшаются. Это полностью соответствует теоретическим предсказаниям согласно модели консольной балки.

Качественно данная зависимость объясняется изменением эффективной жесткости системы: при уменьшении длины балки возрастает ее изгибное сопротивление относительно характерного масштаба деформации,

вследствие чего система становится динамически более жесткой, а ее собственные частоты увеличиваются (см. рис. 2).

Для проверки закона обратной квадратичной зависимости экспериментальные данные были линеаризованы. На большей части диапазона длины зависимость хорошо описывалась законом:

$f \propto L^{-2}$, (Уравнение 4)

Однако при малых длинах свободного края наблюдались заметные отклонения от теоретических соображений. На линеаризованном графике точки, соответствующие малым длинам, систематически выпадали из линейного тренда (см. рис. 3).

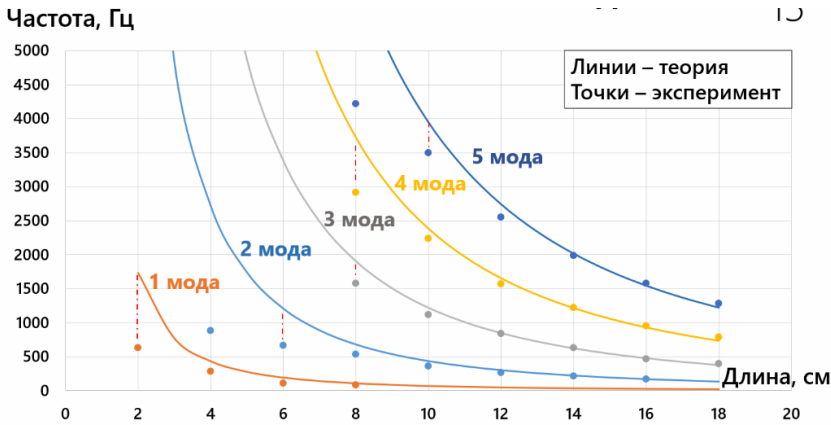


Рис. 2. График зависимости частоты от длины свободного края линейки для первых пяти мод

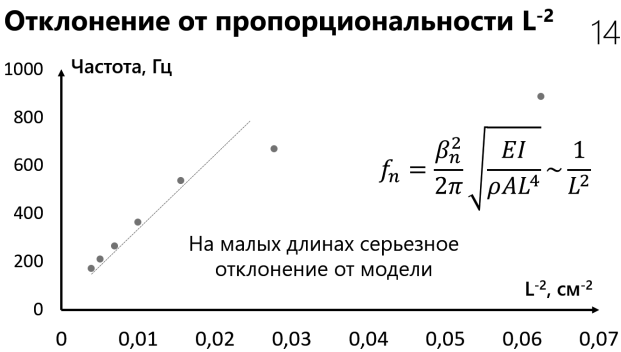


Рис. 3. Линеаризованный график зависимости частоты от длины свободного края линейки

На данный момент данное расхождение объясняется экспериментальным фактом. Вероятной причиной наблюдаемого отклонения является неполная применимость теории Эйлера-Бернулли при малых длинах балки, так как отношение изгиба к длине перестает быть несущественным.

Исследование зависимости частоты от ее порядкового номера

Далее проводилось сравнение экспериментально измеренных значений частот с теоретическими данными для нескольких начальных мод. Для первых частот наблюдалась высокая точность соответствия теоретических и экспериментальных значений, что подтверждает корректность интерпретации наблюдаемых пиков в спектре звука как собственных мод консольной балки, однако с увеличением номера моды начинают проявляться систематическое завышение теоретических точек (см. рис. 4).

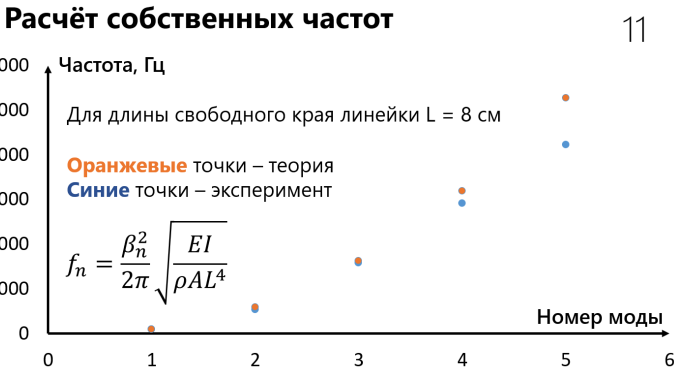


Рис. 4. График зависимости частоты от ее порядкового номера для фиксированной длины свободного края линейки

Данный эффект на текущем этапе рассматривается как экспериментальный факт, возможным объяснением которого является нарушение границ применимости модели Эйлера-Бернулли для высокочастотных мод. Более точное описание модели может потребовать учет дополнительных эффектов, таких как, например, поперечный сдвиг или вращательная инерция.

Исследование влияния материала и толщины

Следующим этапом работы стало исследование влияния толщины линейки на значение первой частоты при фиксированной длине свободного края у разных материалов линейки. Распишем момент инерции прямоугольного сечения I [2] и его поперечную площадь A через ширину балки b и толщину h соответственно и подставим обе переменные в формулу собственных частот консольной балки (см. формула 3) для определения корреляции между собственной модой и толщиной балки:

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (\text{Уравнение 5})$$

$$A = bh, \quad (\text{Уравнение 6})$$

Тогда будут верными следующие корреляции:

$$\frac{I}{A} \propto h^2, \quad (\text{Уравнение 7})$$

$$f \propto h, \quad (\text{Уравнение 8})$$

В работе сравнивались теоретические и экспериментальные значения первой частоты двух толщин линеек, единичной и двух вместе скрепленных, у двух материалов: пластика и дерева. Ниже приведена таблица 1 физических характеристик линеек обоих материалов.

Таблица 1. Физические характеристики пластиковой и деревянной линеек

	Пластиковая	Деревянная
b , м	$4.00 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-2}$
h , м	$3.30 \cdot 10^{-3}$	$2.20 \cdot 10^{-3}$
E , ГПа	1.73	4.77
ρ , кг/м ³	1200	560

Теоретические и экспериментальные значения частоты от длины свободного края линейки для единичной и удвоенной толщин линеек обоих материалов соотносятся с достаточно хорошей точностью, однако наблюдаются незначительные, но стабильные занижения экспериментальных значений частот линеек обоих материалов. Данный факт может быть связан с неоднородностью скрепленных линеек из-за наличия зазора между ними или проскальзывания. У линейки двойной толщины, вероятно, наблюдалось бы более высокая точность схождения теоретических и экспериментальных данных. Удовлетворительное соответствие полученных и ожидаемых данных означает возможность приближения реальной модели к расчетной с учетом поправок ввиду неоднородности действительной системы.

Исследование относительных амплитуд спектральных компонент

После анализа частотной характеристики звука была поставлена задача исследовать его амплитудную компоненту. Предсказать абсолютную громкость отдельной частоты не представлялось возможным в рамках нашего эксперимента, так как в отличие от частоты, амплитуда мод колебаний зависит от многих внешних факторов, например, от чувствительности микрофона, особенностей распространения звука в помещении или эффективности преобразования механических колебаний в акустические. По этой причине в работе был проведен анализ не абсолютного значения громкости, а разницы громкостей отдельных мод.

Звуковое давление пропорционально амплитуде, и нами было предположено, что степень пропорциональности величин α равна 1. На основе данной гипотезы была проведена следующая часть работы.

Громкость n -ной частоты λ_n выражается следующим образом через нормальное давление p_n и давление n -ной моды p_n [4]:

$$\lambda_n = 20 \log_{10} \left(\frac{p_n}{p_n} \right), \quad (\text{Уравнение 9})$$

Таким образом, искомая разность громкостей n -ной и m -ной частот выражается аналогичным образом через звуковое давление n -ной и m -ной частот и через коэффициенты разложения q_n и q_m , отвечающие за вклад своей моды в суммарное движение, n -ной и m -ной частот соответственно:

$$\begin{aligned} \lambda_n - \lambda_m &= 20 \log_{10} \left(\frac{p_n}{p_n} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{p_m}{p_n} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_n}{p_m} \right) = \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{q_n}{q_m} \right), \end{aligned} \quad (\text{Уравнение 10})$$

Таким образом, для исследования амплитуды спектральных компонент необходимо определить коэффициенты разложения q этих частот. Для начала рассмотрим пространственную форму n -ной моды $\varphi_n(x)$, качественно характеризующую способ деформации балки, которой система способна поддерживать без внешнего воздействия [4]:

$$\varphi_n(x) = \cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \sigma_n [\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x)], \quad (\text{Уравнение 11})$$

где

$$\sigma_n = \frac{\cosh(\beta_n L) + \cos(\beta_n L)}{\sinh(\beta_n L) + \sin(\beta_n L)}, \quad (\text{Уравнение 12})$$

и пространственную форму линейки $y(x, t)$ [8]:

$$y(x) = \sum_n q_n \varphi_n(x), \quad (\text{Уравнение 13})$$

Выразим коэффициент разложения n -ной моды q_n через обе пространственные формы n -ной моды $\varphi_n(x)$ и линейки $y(x, t)$:

$$q_n = \int_0^L y(x) \varphi_n(x) dx, \quad (\text{Уравнение 14})$$

Для одновременного выполнения теоретической и экспериментальной составляющих исследования амплитуды собственных частот консольной балки был проведен следующий эксперимент: в статичном положении отгиба были сняты фотографии профиля линейки для дальнейшей аппроксимации ее формы по количеству точек, достаточному для достижения высокой точности приближения к реальной форме, для выполнения теоретической компоненты задачи, а при отпу-

скании линейки был снят звук последующих колебаний линейки для выполнения экспериментальной компоненты задачи.

При сравнении расчетного и экспериментального спектров было установлено, что при $\alpha = 1$ модель с хорошей точностью воспроизводит положения спектральных пиков и качественное соотношение их амплитуд, однако количественно замечено серьезное занижение теоретических пиков. При подстановке же $\alpha = 0.5$ наблюдалось почти полное количественное сходжение с экспериментом (см. рис. 5)

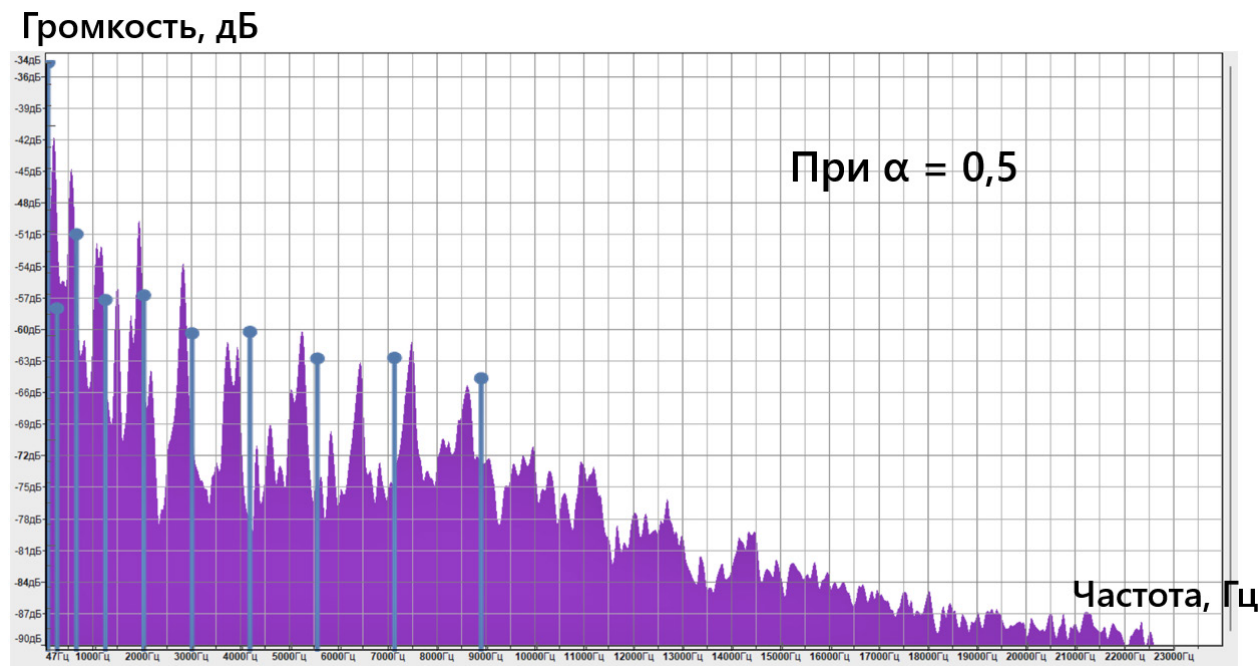


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика звука

На данный момент факт пропорциональности давления корню амплитуды рассматривается как экспериментальный, и его возможное объяснение может быть связано с нелинейностью механико-акустического преобразования и особенностями пространственного излучения мод.

Исследование затухания частот и его коэффициента

Заключительным этапом работы стал анализ затухания мод и его количественное описание коэффициентом затухания. Наличие затухания проявляется в частотной области через конечную действительную ширину спектраль-

ных пиков. В идеальной незатухающей системе каждая мода соответствовала бы бесконечно узкому спектральному пику, в то время как в реальной системе каждый пик имеет конечную измеряемую ширину [9].

Для количественного анализа коэффициент затухания традиционно принимался за ширину пика на его полувысоте [9]. При подстановке коэффициентов разложения мод в формулу громкостей (см. формула 14), было получено, что полувысота пиков составляет 6 дБ — именно на данном значении относительно верхнего конца пиков и определялись их ширины.

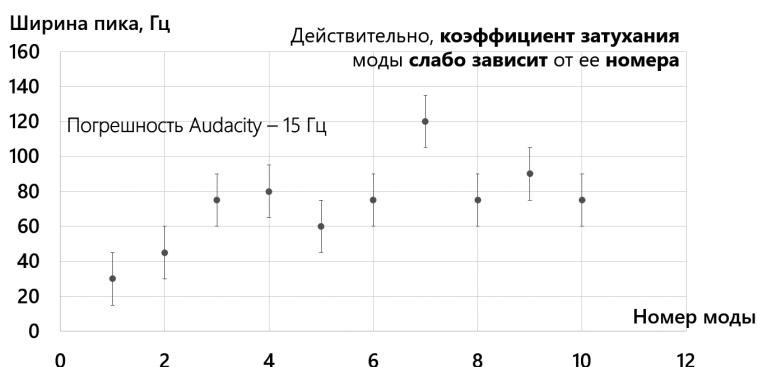


Рис. 6. График зависимости ширины спектральных пиков от порядкового номера его моды

Экспериментально было выявлено, что коэффициент затухания изменяется с номером моды сравнительно слабо (см. рис. 6). В пределах точности измерений выраженной зависимости коэффициента затухания от номера моды обнаружено не было. Это может свидетельствовать о том, что основные механизмы диссипации энергии в рассматриваемом диапазоне частот воздействуют на все наблюдаемые моды примерно одинаковым образом.

Заключение

Таким образом, в работе была построена согласованная механико-акустическая модель звукообразования колеблющейся линейки, закрепленной консольно-балочным способом. Было установлено, что частотный спектр излучаемого звука определяется набором возбужденных собственных мод консольной балки и с хорошей точностью описывается теорией Эйлера — Бернулли в ее границах применимости.

Экспериментально подтверждены зависимости частоты от ее порядкового номера и частоты определенного по-

рядкового номера от длины свободного края линейки и ее толщины для пластиковой и деревянной линеек: частота пропорциональна ее порядковому номеру, частота определенного порядкового номера обратно пропорциональна длине свободного края линейки, частота пропорциональна толщине линейки.

Были исследованы относительные амплитуды спектральных компонент через модовое разложение и затухание мод колебаний, описанное количественно через коэффициент затухания.

Экспериментально показано, что в пределах точности измерения зависимости между коэффициентом затухания моды и ее порядковым номером выявлено не было.

Полученные расхождения между теоретическими и экспериментальными данными для высоких мод и модели громкости, в частности степенной связи звукового давления и амплитуды, представляют интерес для дальнейшего исследования и могут быть связаны с эффектами, выходящими за рамки классической модели тонкой балки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. — 4-е изд. — М.: «Машиностроение», 1984. — 470 с. — Текст: непосредственный.
2. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. — 1976. — 672 с. — Текст: непосредственный.
3. Mauro, Caresta Vibrations of a Free-Free Beam / Caresta Mauro. — 6 с. — Текст: непосредственный.
4. Алешкевич, В. А. Курс общей физики. Механика / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. — М.: Физматлит, 2011. — 472 с. — Текст: непосредственный.
5. Ronald, N. B. The Fourier Transform and its Applications / N. B. Ronald. —, 1986. — Текст: непосредственный.
6. Fundamentals of Acoustics / L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, J. Sanders. — 4-е изд. — Текст: непосредственный.
7. Goldstein, H. Classical Mechanics / H. Goldstein, C. Poole, J. Safko. — 3-е изд. — Addison Wesley, 2001. — 638 с. — Текст: непосредственный.
8. Rao, S. S. Mechanical Vibrations / S. S. Rao. — 4-е изд. — Pearson, 2017. — 1084 с. — Текст: непосредственный.
9. Inman, D. J. Engineering Vibration / D. J. Inman. — 5-е изд. —: Pearson, 2014. — 55 с. — Текст: непосредственный.

Сравнительный анализ полимерных матриц для получения люминесцентных композитных плёнок на основе перовскитных наночастиц

Ломакина Мария Петровна, учащаяся 10-го класса

Научный руководитель: Котин Павел Александрович, заведующий лабораторией

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

Усовершенствована методика получения люминесцентных композитных плёнок на основе перовскитных наночастиц CsPbBr₃ с проведением сравнительного анализа эффективности полимерных матриц из полиэфирсульфона (ПЭС), полиметилметакрилата (ПММА) и полифениленоксида (ПФО). Проект решает проблему низкой химической и термической стабильности квантовых точек при воздействии факторов внешней среды, предлагая технологию их инкапсуляции в оптимально подобранную гидрофобную полимерную матрицу ПММА для сохранения оптических свойств в твердой фазе.

Ключевые слова: квантовые точки, CsPbBr₃, полимерные матрицы, композитные люминесцентные пленки, стабилизация наночастиц, оптоэлектроника, полимер.

Введение

Квантовые точки перовскита (КТП) привлекают значительный интерес в последние несколько лет благодаря своим уникальным оптическим свойствам [1–3] (Рис. 1). Как полностью неорганические, так и органические-неорганические квантовые точки перовскита показали большой потенциал в оптоэлектронных устройствах, таких как светодиоды (LED) для освещения и дисплейных технологий. Однако этим коммерческим применениям серьезно препятствует их нестабильность по отношению к температуре, кислороду и влаге [2–4]. В последнее время было разработано множество стратегий, направленных на повышение стабильности КТП [3–6].

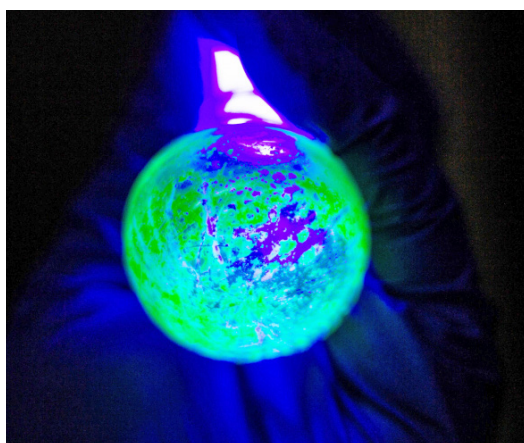


Рис. 1. ITMO News, Фото недели: перовскитные неорганические квантовые точки [16]

Несмотря на значительные достижения, достигнутые за последние несколько лет, они по-прежнему сталкиваются с проблемой низкой стабильности по отношению к воздуху, высоким температурам, свету или полярным растворителям [11]. В основном, нестабильность объясняется низкой энергией образования и присущей галогенидным перовскитам с ионной природой [12]. При воздействии полярных растворителей или воды квантовые точки обычно теряют оптические свойства и даже структурную целостность. Все эти нестабильности неизбежно усложнили синтез, хранение и изготовление устройств на основе полностью неорганических квантовых точек (НПКТ) [3–5]. Поэтому огромные усилия были направлены на повышение стабильности НПКТ [3–5].

Одним из способов решения данной проблемы является введение НПКТ в матрицу полимера, с целью улучшения механической и химической устойчивости [3–6]. В данном случае становится важным выбор полимера, так как он должен обладать пленкообразующими способностями, совместимостью с растворителями, низкой полярностью, гидрофобностью и прозрачностью [5–6].

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу полимерных матриц (ПЭС, ПММА, ПФО) для получения люминесцентных композитных плёнок на основе наночастиц CsPbBr₃. В работе ставится цель оценить влияние типа полимера на морфологию, оптические свойства и стабильность композитов.

Гипотеза исследования: свойства полимерной матрицы существенно влияют на стабильность наночастиц

CsPbBr₃ в твердой фазе и на сохранение их люминесцентных характеристик.

Актуальность

Исследование композитных люминесцентных пленок на основе наночастиц CsPbBr₃ является актуальным, поскольку квантовые точки на основе НПКТ рассматриваются как перспективные оптоэлектронные материалы для солнечных элементов [6], лазеров [7], светодиодов (LED) [8], фотодетекторов [9] и биовизуализации [10] благодаря уникальным характеристикам, включая высокий квантовый выход фотолюминесценции (PL), точную регулируемую ширину запрещенной зоны, узкую длину волны излучения и большой коэффициент поглощения [1–3] (Рис. 2).

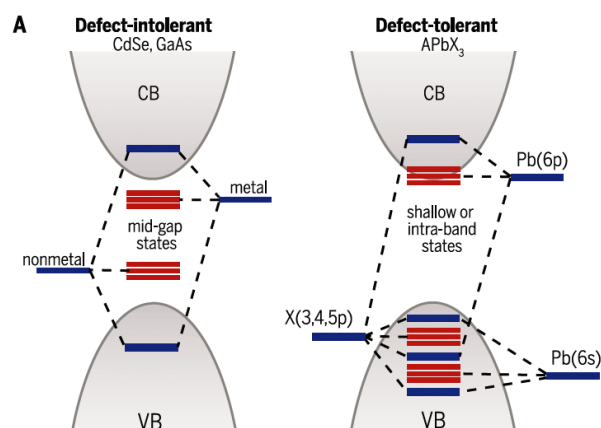


Рис. 2. Наглядная схема ширины запрещенной зоны (Band Gap) и электронных переходов в перовскитных нанокристаллах (автор — M. V. Kovalenko и др.) [1].

Схема иллюстрирует механизм поглощения энергии и фотолюминесценции, объясняющий высокую квантовую эффективность и регулируемую эмиссию перовскитных квантовых точек.

Также интерес нашего исследования определяется тем, что в настоящее время большую роль уделяют функциональным композитам, способным совмещать уникальные оптические свойства НПКТ и эксплуатационные характеристики полимера, которые могли бы использоваться для создания гибких оптоэлектронных устройств нового поколения, вертикально-излучающих лазеров с поверхностным излучением (ВИЛ), люминесцентных солнечных концентраторов, фотодетекторов [6].

Методы исследования

Методы исследования включают анализ источников литературы, приготовление растворов полимеров и пленок, визуальную оценку под УФ-излучением, а также сравнительный анализ однородности, люминесценции и устойчивости образцов [12–15].

Экспериментальная часть

В ходе исследования были последовательно реализованы несколько этапов, направленных на синтез наночастиц CsPbBr₃, подбор полимерной матрицы и получение люминесцентных пленок. На первом этапе была оптимизирована методика получения коллоидного раствора наночастиц CsPbBr₃ [1, 6] с использованием классического подхода LARP (ligand-assisted reprecipitation) [1, 6]. В ка-

честве исходных реагентов для получения квантовых точек состава CsPbBr_3 использовали CsBr (52 мг) и PbBr_2 (90 мг) [6]. Соли растворяли в 6 мл диметилформамида (ДМФА) в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ), таких как 0,6 мл олеиновой кислоты (ОЛА) и 0,3 мл олеиламина (ОЛАМ) [6, 11]; в качестве антирастворителя применяли толуол, обеспечивающий быстрое образование наночастиц. В дальнейшем в этот раствор делился на несколько других, в которые вводилось различное количество полимера. Особое внимание уделялось выбору соотношения прекурсоров, концентрации и времени перемешивания, поскольку эти параметры определяют размер, однородность и фотолюминесцентные свойства частиц.

На втором этапе проводился поиск подходящей полимерной матрицы. В качестве первой матрицы был рассмотрен полимер ПЭС (см. рис. 3), что позволило выявить ряд деталей: при попытке формирования пленок обнаруживались неоднородность покрытия, локальная агрегация частиц и недостаточное содержание связующего, которое не обеспечивало механически устойчивую непрерывную пленку [4, 11]. Эти наблюдения показали, что ПЭС в выбранных условиях не может выступать в роли пленкообразующей матрицы для CsPbBr_3 -компози́тов.

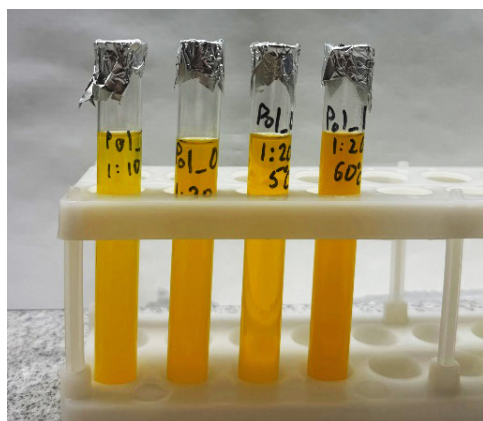


Рис. 3. Растворы наночастиц CsPbBr_3 в различных условиях: без полимера, с ПЭС 1%

При добавлении ПЭС наблюдается более высокая стабилизация наночастиц в растворе, что проявляется в меньшей агрегации.

Сравнение проводили на трех образцах: без полимера, с ПЭС 1% и 5%. После центрифугирования раствора с полимером осадок подвергался растворению в смеси хлороформа и толуола в различном соотношении 1:1, 2:1, 1:0 соответственно. Наибольшую эффективность показал растворитель с соотношением хлороформа к толуолу 2:1. Выбор смеси растворителей обусловлен тем, что толуол способствует диспергированию наночастиц, а хлороформ — растворению полимера. Пленки получали методом spin-coating с варьированием скорости вращения.

Дальнейшие эксперименты были направлены на изучение двух других полимеров — полиметилметакрилата (ПММА) и полифениленоксида (ПФО). Были приготовлены серии растворов с варьированием концентрации полимера, растворы с ПФО были менее прозрачными по сравнению с растворами с ПММА [4]. Поэтому растворы подвергали центрифугированию на небольших оборотах

(5000 об/мин) в течение 5 минут, что позволило отделить крупные агломераты частиц и избыток полимера. Массы осадков фиксировали; она была пропорциональна количеству полимера.

Результаты и обсуждение

На этапе приготовления перовскитных частиц методику усовершенствовали, добавив этап ультразвуковой обработки в течение часа, что улучшило растворимость твердых бромидов в ДМФА, соотношение толуола к раствору бромидов увеличили с 10:1 до 20:1, это способствовало более эффективному формированию перовскитных наночастиц. При изучении влияния полимера ПЭС на свойства перовскитных частиц было выявлено, что наличие полимера способствовало стабилизации наночастиц в растворе. При сравнении с раствором наночастиц без полимера было установлено, что в присутствии полимера наночастицы сохраняют большую устойчивость [4], что проявляется в более высокой интенсивности их ультрафиолетового свечения. Дальнейшие соотношения с ПЭС не проводились из-за маленькой максимальной возможной концентрации полимера — 5%. Получение неоднородных пленок методом spin-coating показало, что для данной системы этот способ нанесения оказался недостаточно эффективным. Порядок получения последующих пленок был изменен на испарение растворителя из раствора в течение суток при комнатной температуре.

Сравнительный анализ показал, что использование ПММА и ПФО в качестве полимерных матриц принципиально по-разному влияет на морфологию и стабильность композитных пленок [15]. Пленки на основе ПММА в целом демонстрировали хорошую прозрачность и однородность, сохранили яркую зеленую люминесценцию наночастиц CsPbBr_3 [12–14] (рис. 4). При введении ПММА раствор наночастиц сохранял хорошую растворимость в отличие от ПФО [2]. Пленки на основе ПММА характеризовались лучшей устойчивостью к воздействию внешней среды, что проявлялось в меньшем снижении фотолюминесценции и более высокой механической прочности композитов [2]. Таким образом, полученные результаты в целом подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что свойства полимерной матрицы существенно влияют на стабильность наночастиц CsPbBr_3 в твердой фазе и на сохранение их люминесцентных характеристик.



Рис. 4. Люминесценция композитной плёнки CsPbBr_3 /ПММА под воздействием УФ-излучения ($\lambda \approx 365$ нм)

Однородное зелёное свечение демонстрирует равномерное распределение наночастиц в полимерной матрице. Слева — направо содержание полимера уменьшается.

Заключение

Цель исследования, заключающаяся в выборе полимерной матрицы, обеспечивающей получение технологичных и устойчивых люминесцентных пленок, была достигнута. Показано, что не все полимеры позволяют получить

светящиеся и устойчивые пленки, однако ПММА обеспечивает стабильные и воспроизводимые пленки, тогда как ПФО в выбранных условиях не показал достаточной технологичности и не позволил сформировать однородное покрытие.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kovalenko, M. V. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals / M. V. Kovalenko, L. Protesescu, M. I. Bodnarchuk. — Текст: электронный // *Perovskite Quantum Dot — an overview*. — 2023. — URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/perovskite-quantum-dot> (дата обращения: 02.06.2026).
2. Tough, stable and self-healing luminescent perovskite-polymer matrix applicable to all harsh aquatic environments / Q. Liu, J. Chen, Y. Wang [et al.]. — Текст: электронный // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — Art. no. 1342. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-29084-z> (дата обращения: 02.06.2026).
3. In Situ Formation of Luminescent Perovskite Quantum Dot/Polymer Composites: Scalable Synthesis, Continuous Processing and Functional Applications / W. Fan, S. Wang, Z. Yang [et al.]. — Текст: электронный // *Advanced Materials*. — 2025. — Vol. 37, iss. 42. — Art. no. 2505600. — URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202505600> (дата обращения: 02.06.2026).
4. Encapsulation of Perovskite Nanocrystals into Macroscale Polymer Matrices: Enhanced Stability and Polarization / S. N. Raja, Y. Bekenstein, M. A. Koc [et al.]. — Текст: электронный // *ACS Applied Materials & Interfaces*. — 2016. — Vol. 8, iss. 51. — P. 35523–35533. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.6b09443> (дата обращения: 02.06.2026).
5. CsPbBr₃ Nanocrystals-Based Polymer Nanocomposite Films: Effect of Polymer on Spectroscopic Properties and Moisture Tolerance / E. Fanizza, R. Schingo, A. Panniello [et al.]. — Текст: электронный // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, iss. 24. — Art. no. 6730. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/CsPbBr3-Nanocrystals-Based-Polymer-Nanocomposite-of-Fanizza-Schingo> (дата обращения: 02.06.2026).
6. *Perovskite Quantum Dots: Synthesis, Properties and Applications: [monograph]* / ed. by Y. Zhou, Y. Wang. — Текст: электронный. — Cham: Springer, 2023. — 356 p. — (Springer Series in Materials Science). — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-xxxxxx-x> (дата обращения: 03.06.2026).
7. Microsecond-sustained lasing from colloidal quantum dot solids / M. M. Adachi, F. Fan, D. P. Sellan [et al.]. — Текст: электронный // *Nature Communications*. — 2015. — Vol. 6, iss. 1. — Art. no. 8694. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms9694> (дата обращения: 03.06.2026).
8. Overcoming the electroluminescence efficiency limitations of perovskite light-emitting diodes / H. Cho, S.-H. Jeong, M.-H. Park [et al.]. — Текст: электронный // *Science*. — 2015. — Vol. 350, iss. 6265. — P. 1222–1225. — URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad2114> (дата обращения: 03.06.2026). — DOI: 10.1126/science.aad2114
9. Wang, H. Perovskite-based photodetectors: materials and devices / H. Wang, D. H. Kim. — Текст: электронный // *Chemical Society Reviews*. — 2017. — Vol. 46, iss. 17. — P. 5204–5236. — URL: <https://doi.org/10.1039/C6CS00896H> (дата обращения: 03.06.2026). — DOI: 10.1039/C6CS00896H.
10. Embedding perovskite nanocrystals into a polymer matrix for tunable luminescence probes in cell imaging / H. Zhang, X. Wang, Q. Liao [et al.]. — Текст: электронный // *Advanced Functional Materials*. — 2017. — Vol. 27, iss. 7. — Art. no. 1604382. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201604382> (дата обращения: 03.06.2026). — DOI: 10.1002/adfm.201604382.
11. Improving the stability of metal halide perovskite materials and light-emitting diodes / H. Cho, Y.-H. Kim, C. Wolf [et al.]. — Текст: электронный // *Advanced Materials*. — 2018. — Vol. 30, iss. 42. — Art. no. 1704587. — URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201704587> (дата обращения: 03.06.2026). — DOI: 10.1002/adma.201704587.
12. Aqueous, Non-Polymer-Based Perovskite Quantum Dots for Bioimaging: Conserving Fluorescence and Long-Term Stability via Simple and Robust Synthesis / S. C. G. Sanjayan, J. M. Shivanna, J. D. Schiffman [et al.]. — Текст: электронный // *ACS Applied Materials & Interfaces*. — 2022. — Vol. 14, iss. 34. — P. 38471–38482. — URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c08087> (дата обращения: 03.06.2026). — DOI: 10.1021/acsami.2c08087.
13. Encapsulation-Enabled Perovskite — PMMA Films Combining a Micro-Structured Substrate and Polymer Matrix for High-Speed White-Light Communication / R. Liu, Z. Yan, T. Lu [et al.]. — Текст: электронный // *ACS Applied Materials & Interfaces*. — 2021. — Vol. 13, iss. 45. — P. 54143–54152. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c15873> (дата обращения: 02.06.2026). — DOI: 10.1021/acsami.1c15873.
14. Highly luminescent CsPbX₃/PMMA (X=Br, I) composites with improved stability for full-color Micro-LED displays / X. Zhang, Y. Wang, L. Zhang [et al.]. — Текст: электронный // *Journal of Luminescence*. — 2024. — Vol. 268. — Art. no. 120412. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022231324000723> (дата обращения: 02.06.2026). — DOI: 10.1016/j.jlumin.2024.120412.
15. Highly stable CsPbBr₃/PMA perovskite nanocrystals for improved optical performance / P. R. Bommireddy, J. B. B. S. Sunku [et al.]. — Текст: электронный // *Nanomaterials*. — 2024. — Vol. 14, iss. 2. — Art. no. 211. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10828704/> (дата обращения: 02.06.2026). — DOI: 10.3390/nano14020211.

16. Фото недели: перовскитные неорганические квантовые точки [Электронный ресурс] // ITMO. NEWS. — 27.08.2020. — URL: <https://news.itmo.ru/ru/news/9688/> (дата обращения: 17.06.2026).

Синтез и исследование частиц оксида кремния

Некрасов Алексей Евгеньевич, учащийся 10-го класса

Научный руководитель: Котин Павел Александрович, заведующий лабораторией

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В статье представлены результаты исследования и анализа существующих методик синтеза частиц оксида кремния (SiO_2) с последующим улучшением текущих методик. В ходе работы были изучены основы синтеза частиц SiO_2 , апробированы и проанализированы альтернативные методики синтеза, получены СЭМ-изображения результатов различных синтезов, построены графики зависимости размеров частиц от времени синтеза. В ходе проекта были решены проблемы автоматизации синтеза, обработки и систематизации данных.

Полученный продукт представляет собой модернизированную методику синтеза частиц SiO_2 с подробным описанием основных действий, путями оптимизации синтеза и описанием теоретического процесса синтеза. Результаты проекта могут быть использованы для дальнейшего производства и исследования частиц оксида кремния (SiO_2), а также развития и оптимизации методики.

Введение

В настоящее время исследование фотонных кристаллов стало активно развиваться в физике и материаловедении [1]. Этот материал представляет собой пространственно-периодические диэлектрические структуры, у которых коэффициент преломления изменяется с периодом, сравнимым с длиной волны света [1]. Благодаря наличию фотонных запрещённых зон — диапазонов длин волн (см. рис. 1), которые не могут распространяться в кристалле, ФК (далее фотонные кристаллы) открывают уникальные возможности для управления волнами света [2].

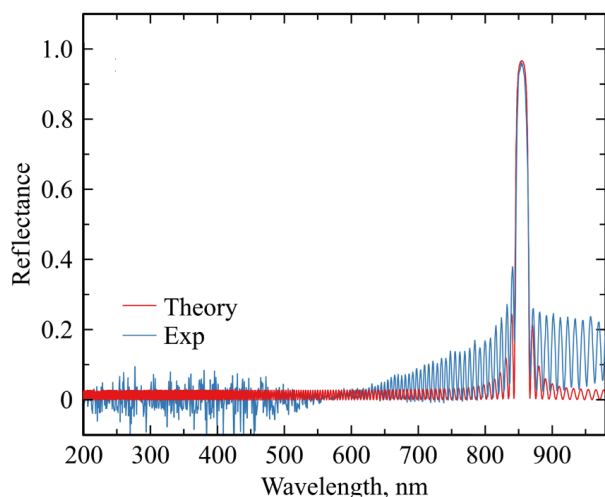


Рис. 1. График зависимости отражающей способности структуры от длины волны (нм) света [3] Запрещенная зона продемонстрирована на длине волн 840–870 нм

Актуальность темы обусловлена большим практическим потенциалом фотонных кристаллов. Они используются в создании высокоэффективных светодиодов, лазеров, оптических переключателей, фильтров и волноводов нового поколения [1]. Из широкого спектра областей при-

менения следует значительный рост рынка фотонных кристаллов в периоде с 2022 по 2024 год [4]. Прогнозируемый объем рынка к 2033 году оценивается в 119 миллиардов долларов, что делает фотонные кристаллы одним из самых быстрорастущих и перспективных направлений науки. Однако широкое практическое применение ФК наталкивается на серьёзное ограничение — отсутствие универсальных, доступных и хорошо контролируемых методов синтеза их основы — частиц оксида кремния (SiO_2) [1]. Существующие подходы, часто требуют сложного оборудования, длительных процессов и не всегда позволяют получать структуры с заданными и воспроизводимыми параметрами [1]. Поэтому разработка новых или совершенствование существующих методик синтеза частиц (SiO_2) и ФК является крайне востребованной научно-технической задачей [1].

Цель и гипотеза

Таким образом, объектом исследования являются частицы оксида кремния (SiO_2). Итоговой целью проекта является исследование влияния времени синтеза на размер и полидисперсность частиц SiO_2 и разработка универсальной, воспроизводимой методики их получения в условиях школьной лаборатории. Контроль итоговых параметров частиц осуществляется посредством варьирования времени синтеза. Гипотеза исследования заключается в том, что при увеличении времени синтеза, являющегося одним из ключевых параметров в других исследованиях [4] размер частиц будет увеличиваться в связи с увеличением количества слоев силикатных фрагментов [5]. Также будут увеличиваться абсолютное и относительное стандартные отклонения размеров в связи с неравномерным распределением ростового вещества, а также синтезом новых ядер. [6]

Продукт

Итоговым продуктом проекта стала инструкция, описывающая метод синтеза частиц SiO_2 заданного размера. Основной целью продукта являлось создание простой,

воспроизводимой и автоматизированной методики, которая может быть задействована в условиях школьной лаборатории.

Практическая значимость продукта заключается в возможности синтеза и исследования частиц SiO_2 в условиях ограниченности ресурсов. Новизна методики заключается в упрощении отдельных этапов синтеза и исключении влияния человеческого фактора посредством автоматизации подачи реагентов.

Теоретическая часть

Анализ альтернативных методик синтеза частиц SiO_2

Анализ альтернативных методик синтеза частиц SiO_2 [2] показывает, что многие из существующих протоколов, несмотря на научную ценность, обладают рядом ограничений, затрудняющих их широкое внедрение и масштабирование. Основные проблемы заключаются в задействовании дорогих и редких реагентов, необходимости применения сложного оборудования, а также в отсутствии потенциала для автоматизации, что критически важно для воспроизводимости. Ниже приведен краткий анализ двух характерных подходов.

Работа «Monodisperse SiO_2 Microspheres with Large Specific Surface Area: Preparation and Particle Size Control» [7] демонстрирует высокоэффективную методику синтеза. Однако в ней используются такие специфические реагенты, как цетилтриметиламмония бромид (СТАВ) и диэтаноламин (DEA). Высокая стоимость СТАВ и его потенциальная токсичность повышают себестоимость и усложняют процесс.

В рамках Национальной Технологической Олимпиады [8] был предложен более доступный вариант синтеза, основанный на распространенных веществах. Ключевым недостатком данной методики является ее ориентация на манипуляции с малыми объемами. Такой подход не только требует постоянного внимания исследователя, но и физически не позволяет внедрить автоматизированные системы дозирования.

Теоретическая часть синтеза частиц SiO_2

Первым этапом исследования стала апробация уже существующих методик синтеза частиц SiO_2 [7–8]. Основной целью данного этапа стал подбор параметров синтеза для получения частиц с оптимальными значениями размеров и их отклонений.

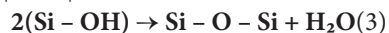
Теоретический процесс синтеза частиц SiO_2 [8]

На первом этапе синтеза происходит формирование первичных наночастиц — ядер. Важным является образование большого количества ядер за короткий промежуток времени с целью получения монодисперсных частиц, ввиду чего синтез был разделен на формирование ядер и доращивание до частиц.

Первой стадией формирования ядер является гидролиз ТЭОС



В результате образуется кремниевая кислота $\text{Si}(\text{OH})_4$. Она является неустойчивой, в связи с чем вступает в реакцию конденсации:



Образованная трехмерная сетка Si-O-Si составляет основу частиц оксида кремния. При достижении концентрации продукта критического значения в растворе формируются первые зародыши частиц. Появление частиц сопровождается опалесценцией (помутнением раствора).

После формирования ядер начинается контролируемый рост частиц, посредством добавления новых порций аммиака и ТЭОС. На этом этапе продолжают реакции гидролиза и конденсации, но образующиеся кремний-содержащие соединения преимущественно осаждаются на поверхности сформированных ядер. Это сокращает формирование новых частиц, а также стимулирует рост уже существующих частиц. Важным аспектом является плавное добавление ТЭОС для поддержания концентрации ниже критического значения с целью минимизации формирования новых частиц.

Практическая часть синтеза ядер SiO_2

В конической колбе (250 мл) помещается магнитный перемешивающий элемент (важно, чтобы он покрывал почти всю поверхность колбы), вносится 100 мл iPr-OH и 5 мл водного аммиака концентрацией 25%. Налаживается интенсивное перемешивание (300 об/мин). В сосуд устанавливается термopара, парафиллом изолируется выход из колбы для предотвращения испарения содержимого. Смесь нагревается до 50 °C и после остановки изменения температуры каплями добавляется 500 мкл ТЭОС. Смесь оставляется при непрерывном перемешивании при температуре 50 °C на 240 минут. После окончания синтеза смесь остужается до комнатной температуры, колба герметично закрывается. Результаты синтеза методикой [8] представлены на СЭМ-изображениях (см. рисунки 2–5)

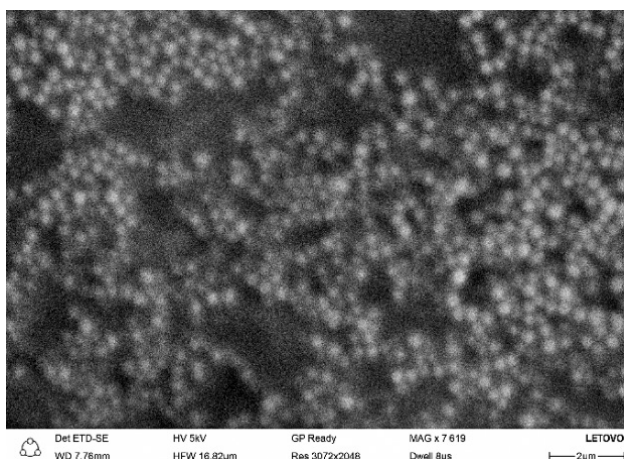
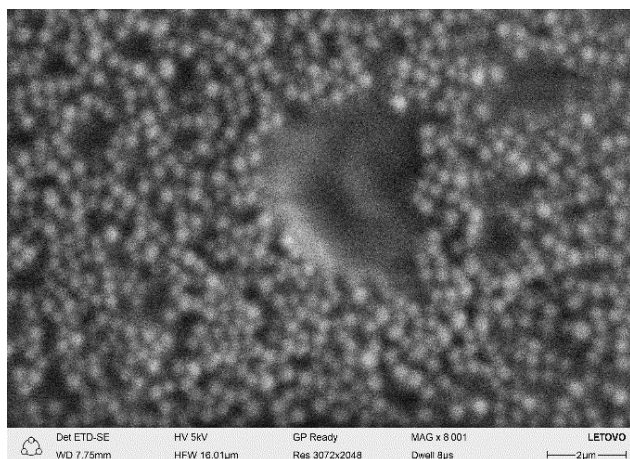
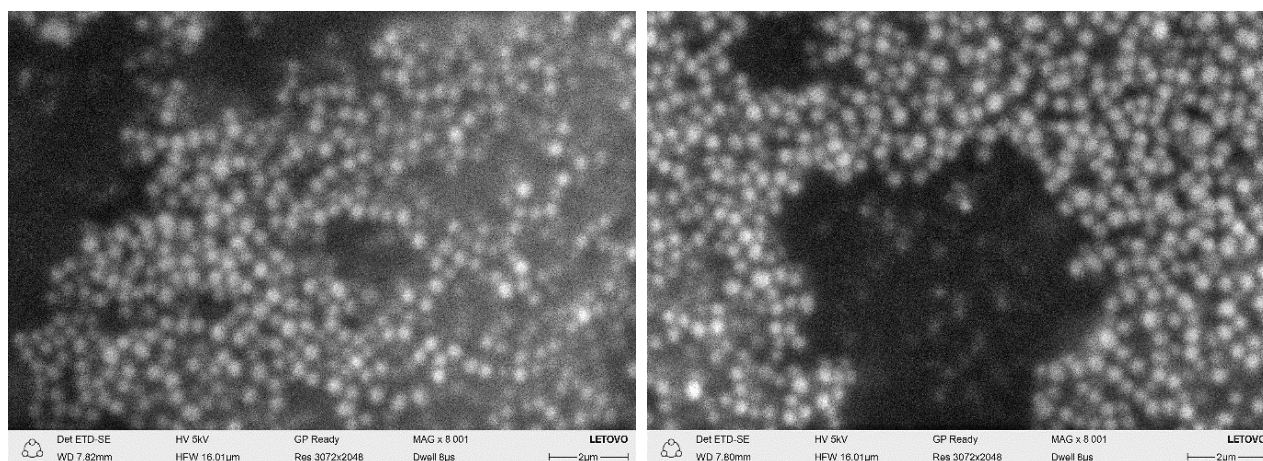
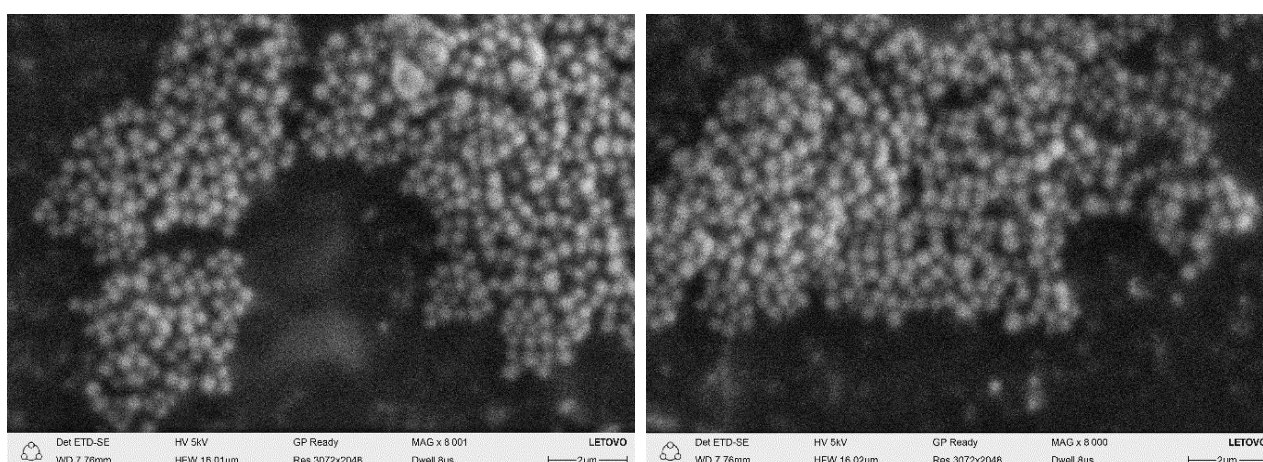
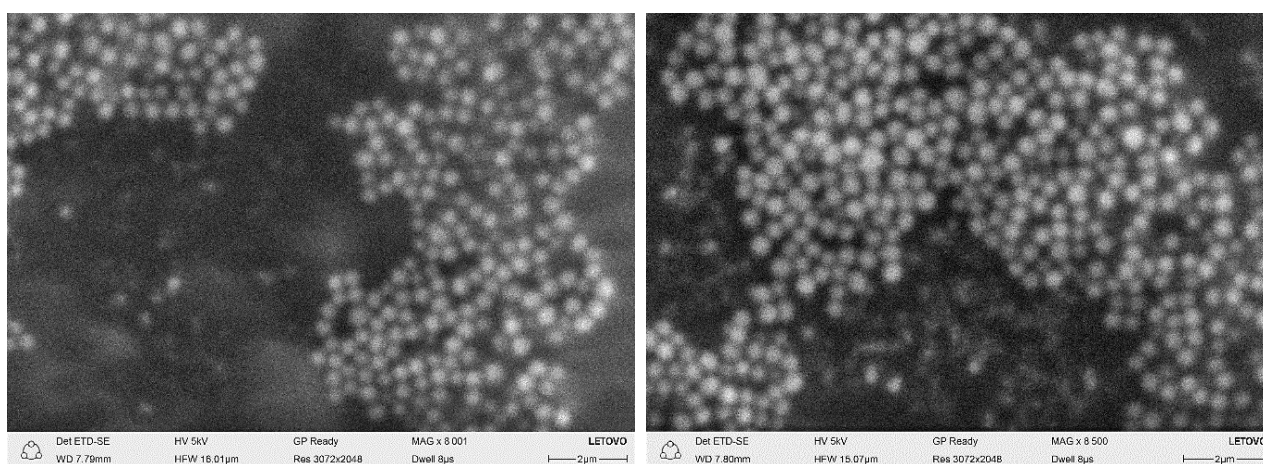


Рис. 2. СЭМ-изображения ядер частиц SiO_2 30-минутный синтез

Рис. 3. СЭМ-изображения ядер частиц SiO_2 45-минутный синтезРис. 4. СЭМ-изображения ядер частиц SiO_2 60-минутный синтезРис. 5. СЭМ-изображения ядер частиц SiO_2 120-минутный синтез

Для формирования объективной оценки зависимости размеров от времени синтеза, был проведен ряд синтезов ядер частиц SiO_2 продолжительностью до 4 часов. Полученные изображения были исследованы при помощи программы ImageJ, по каждой исследуемой группе были представлены следующие данные:

- Средний размер частиц (нм)
- Стандартное отклонение размера частиц (нм)
- Относительное отклонение размера частиц (%)

Анализ результатов показал, что при увеличении времени синтеза увеличиваются и все исследуемые параметры — средний размер частиц (нм), стандартное отклонение размера частиц (нм), относительное отклонение размера частиц (%). Увеличение разброса размеров частиц связано с тем, что при длительном времени роста повышается вероятность неравномерного дорастивания отдельных частиц (см. рис. 6).

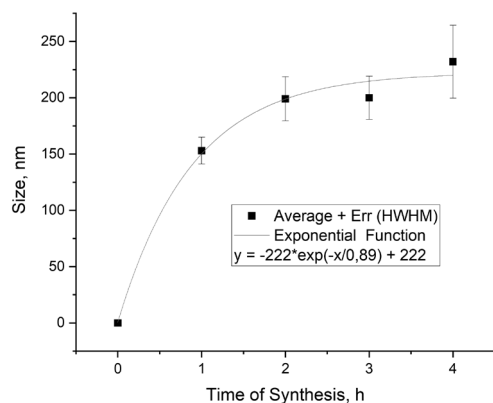


Рис. 6. График зависимости размера частиц от времени синтеза

Оптимальным выбором ядер для следующего этапа (в соответствии с рисунком 6) стали образцы с временем синтеза 45 минут. Данная группа образцов соответствует основным требованиям для дальнейшего наращивания ядер [1]. При относительно крупном размере (более 100 нм) они сохраняют малое стандартное отклонение в размерах (менее 10 нм), чем обеспечивают высокую однородность образцов

Вторым этапом синтеза стало доразращивание сформированных изначально частиц SiO_2 . Основным требованием данного этапа является получение наночастиц в широком спектре размеров (от 100 до 1000 нм) при сохранении минимального разброса размеров. Следуя методике [8] был проведен синтез частиц с промежуточными отборами и последующим сканированием на СЭМ.

Практическая часть доразрачивания ядер до частиц SiO_2

20 мл полученного ранее раствора переносятся в колбу, добавляется 80 мл изопропанола (iPr-OH). Аналогично первому этапу налаживается перемешивание (300 об/мин), устанавливается температура 50°C и герметизируется выход из колбы. После установления температуры добавляется аммиак и ТЭОС каплями соответственно методике [8]

Для автоматизации процесса и минимизации ошибок во второй части синтеза была разработана и описана система для автоматической подачи реагентов (см. рис. 7). Подача реагентов (ТЭОС и аммиак) осуществлялась через насосы с заданными промежутками времени

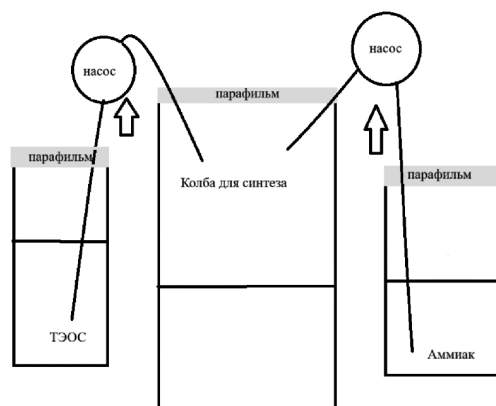


Рис. 7. Установка для автоматизации подачи реагентов

Результаты применения автоматизированной установки приведены ниже на рисунке 8.

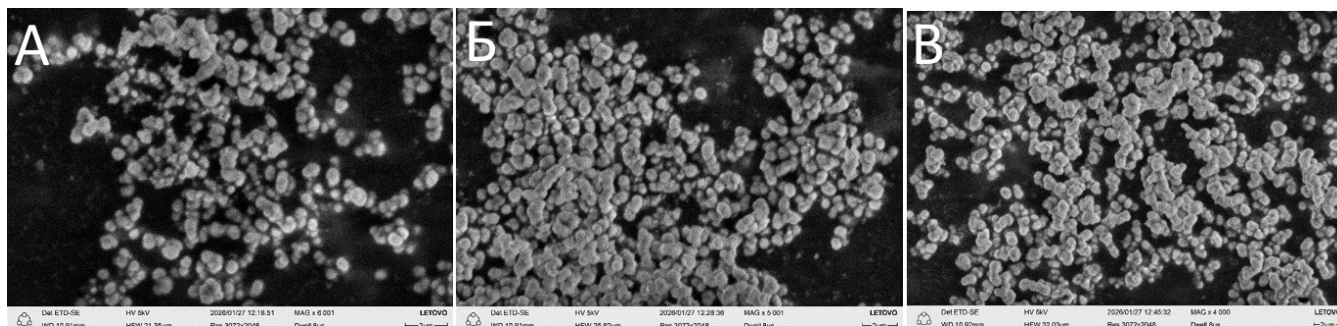


Рис. 8. СЭМ-изображения частиц SiO_2 : (А) 3-часовой, (Б) 4-часовой и (В) 5-часовой синтез на основе ядер SiO_2 с временем синтеза 45 минут

Аналогично первой, была апробирована вторая методика [7], ее результаты не удовлетворили потребностей исследования. Методика продемонстрировала меньшую пригодность к автоматизации. Ее недостатком выступает большое количество промежуточных операций, требующих вмешательства человека. Более того, методика не подразумевала промежуточных отборов образцов, ввиду чего была собрана и отснята лишь одна исследуемая группа.

Частицы получились отличными от прогнозируемых — они получились значительно больше (2500 нм вместо 500 нм), а причины формирования кубических структур требуют дополнительных исследований по причине того, что ожидаемой формой выступали сферы (см. рис. 9).

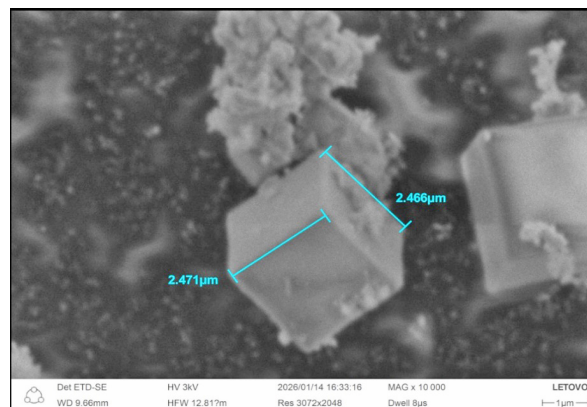


Рис. 9. СЭМ-изображения частиц SiO_2 , синтезированных методикой

Анализ и интерпретация полученных результатов.

После проведения ряда синтезов появилась потребность в систематизации полученных данных. Для повышения качества приведенной статистики появилась потребность в анализе сотен частиц для каждой исследуемой группы, реализовать который в рамках программы ImageJ было затруднительно. Для ускорения обработки изображений была использована программа Altami Studio. На СЭМ-изображение применялась группа следующих фильтров:

- Адаптивный порог
- Замыкание
- Размыкание

Данные фильтры помогали получить контрастное изображение, сохраняя отделенность большего количества частиц. В результате получался черно-белый скан частиц, размеры которых можно было рассчитать автоматически (см. рис. 10). Возникла проблема слипания близких друг к другу частиц, которые образуют объекты неправильной формы, а в следствии, выбросы данных.

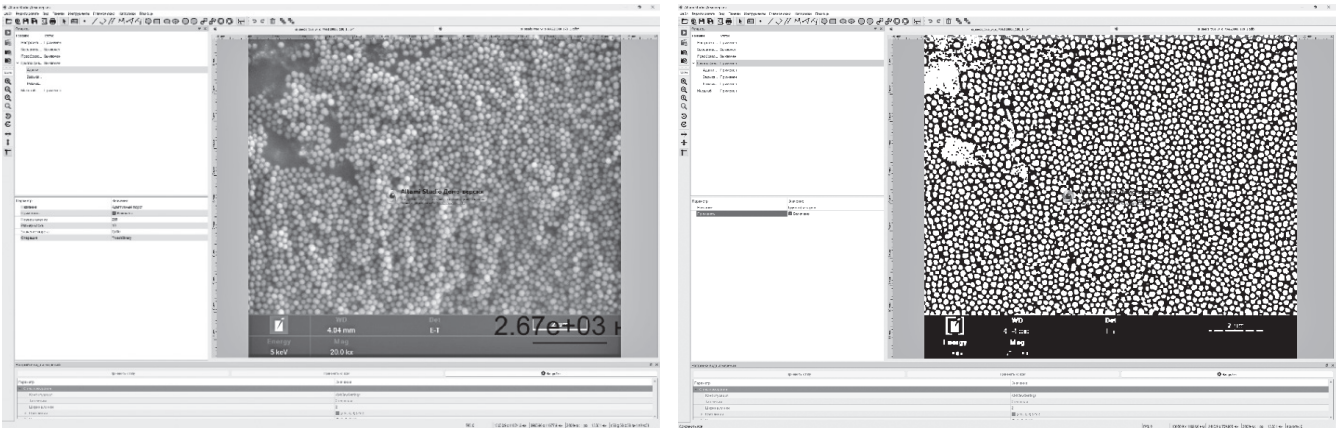


Рис. 10. Программа Altami Studio, снимок до (слева) и после (справа) преобразований

Программа предоставляет данные в таблице следующего формата:

Таблица 1

Объект	Площадь, нм²	Периметр, нм	Диаметр Фере максимальный	Диаметр Фере минимальный

При «слипании» двух частиц они образуют форму эллипса, в связи с чем площадь, посчитанная автоматически и площадь, выраженная через среднее значений максимального и минимального диаметра могут значительно отличаться. Опираясь на это, мы можем отбраковывать неправильные значения.

Важно, что отбраковка ряда частиц не влияет на качество конечной выборки эффект «слипания» зависит не от основного исследуемого параметра — размера частиц, а от расстояния между ними. Для исключения неправильно распознанных частиц был написан скрипт на Python (см. рис. 11).

Было использовано два основных критерия отбора частиц. Разница между площадью, рассчитанной программой Altami Studio (см. рис. 10)), и площадью, выраженной через среднее максимального и минимального диаметров Фере не должна превышать 30% (формулы 1–3). Разница между максимальным и минимальным диаметром Фере должна быть не более 30% (Формула 4). При несоответствии хотя бы одному критерию значение исключалось из выборки.

- D_{max} — Диаметр Фере максимальный
- D_{min} — Диаметр Фере минимальный
- D_{med} — Среднее максимального и минимального диаметров Фере,
- S_{as} — Площадь, посчитанная через Altami Studio

S_D — Площадь, выраженная через формулу окружности

$D_{med} = (D_{max} + D_{min}) / 2$ (Формула 1)

$S_D = (\pi * (D_{med})^2) / 4$ (Формула 2)

$S_{as} > 0,77 S_D$ и $S_{as} < 1,3 S_D$ (Формула 3)

$D_{max} < 1,3 D_{min}$ (Формула 4)

Использование алгоритма позволило сократить количества выбросов, при сохранении до 80% объектов от изначальной выборки. В результате проведенного анализа были построены графики зависимости размера ядер частиц и самих частиц от времени синтеза. Зависимости, подтвержденные для ядер частиц SiO₂ оказались справедливыми и для самих частиц:

- С увеличением времени синтеза, все 3 параметра росли.
- Средний размер частиц (нм)
- Стандартное отклонение размера частиц (нм)
- Относительное отклонение размера частиц (%)

Для более подробного анализа частиц возникла необходимость введения большего количества отбора образцов, а также увеличение количества реактивов, с целью минимализации значений отклонения в подаче реактива насосом. Таким образом, методика была адаптирована под потребности исследования (см. Таблицу 2).

```
56         df = process_file(full_path)
57         df["source"] = file
58         all_data.append(df)
59
60     output_base = os.path.join(path, "combined")
61     else:
62         raise ValueError("Указанный путь не является файлом или папкой")
63     # === Объединение ===
64     combined = pd.concat(all_data, ignore_index=True)
65     print(f"Всего частиц после фильтрации: {len(combined)}")
66     # === Статистика ===
67     mean_d = combined["d_avg"].mean()
68     std_d = combined["d_avg"].std()
69     print(f"Средний диаметр: {mean_d:.2f} нм")
70     print(f"Стандартное отклонение: {std_d:.2f} нм")
71     # === Сохранение ===
72     output_csv = output_base + "_filtered.csv"
73     combined.to_csv(output_csv, sep=';', index=False)
74
75     print(f"Файл сохранён: {output_csv}")
76
77     # === Гистограмма ===
78     plt.figure()
79
80     data = combined["d_avg"]
81
82     # обычная гистограмма (количество)
83     counts, bins, _ = plt.hist(data, bins=20)
84
85     # === KDE ===
86     from scipy.stats import gaussian_kde
87
88     kde = gaussian_kde(data)
89
90     x_vals = np.linspace(data.min(), data.max(), num=500)
91     y_vals = kde(x_vals)
92
93     # масштабируем KDE под гистограмму
94     bin_width = bins[1] - bins[0]
95     y_vals_scaled = y_vals * len(data) * bin_width
96
97     plt.plot(x_vals, y_vals_scaled)
98
99     # среднее
100    plt.axvline(mean_d)
101
102    plt.xlabel("Средний диаметр (нм)")
103    plt.ylabel("Количество частиц")
104    plt.title("Распределение частиц по размеру")
105
106    plt.grid()
107
108    plt.show()
109
110    except Exception as e:
111        print("Ошибка:")
112        print(e)
```

```
1  import os
2  import pandas as pd
3  import numpy as np
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  from scipy.stats import gaussian_kde
6
7  # === Функция обработки одного файла ===
8  def process_file(file_path):
9      df = pd.read_csv(file_path, sep=';', quotechar='"')
10
11      # очистка колонок
12      df.columns = (
13          df.columns
14          .str.replace('\xa0', ' ', regex=False)
15          .str.strip()
16      )
17      # переименование
18      df = df.rename(columns={
19          "Площадь, мм²": "area",
20          "Периметр, мм": "perimeter",
21          "Диаметр Фере максимальный, мм": "d_max",
22          "Диаметр Фере минимальный, мм": "d_min"
23      })
24      # расчёты
25      df["d_avg"] = (df["d_max"] + df["d_min"]) / 2
26      df["Q"] = df["area"] / (np.pi * (df["d_avg"] ** 2) / 4)
27      df["ratio"] = df["d_min"] / df["d_max"]
28      df["spread"] = (df["d_max"] - df["d_min"]) / df["d_avg"]
29
30      # фильтр
31      df = df[
32          (df["ratio"] > 0.77) &
33          (df["Q"] > 0.77) &
34          (df["Q"] < 1.3) &
35          (df["spread"] < 0.4)
36      ]
37      return df
38
39  # === Ввод пути ===
40  path = input("Введи путь к CSV файлу ИЛИ папке: ").strip().strip('"')
41  all_data = []
42  try:
43      # === Если это файл ===
44      if os.path.isfile(path):
45          df = process_file(path)
46          df["source"] = os.path.basename(path)
47          all_data.append(df)
48
49          output_base = os.path.splitext(path)[0]
50
51      # === Если это папка ===
52      elif os.path.isdir(path):
53          for file in os.listdir(path):
54              if file.endswith(".csv"):
55                  full_path = os.path.join(path, file)
56
57                  df = process_file(full_path)
58                  df["source"] = file
59                  all_data.append(df)
```

Рис. 11. Программа на Python для распознавания частиц

Таблица 2. Схема добавления реагентов и отбора проб в синтезе частиц SiO₂

Час	Минута	ТЭОС, мкл	Аммиак, мл	Час	Минута	ТЭОС, мкл	Аммиак, мл
0	0	50	1	Отбор 20мл, +10 мл i-PrОН			
0	15	50	1	4	45	900	2
0	30	75	1	5	0	1000	5
0	45	75	1	Отбор 20мл, +20 мл i-PrОН			
1	0	100	1	5	15	1000	5
Отбор 1мл, +1 мл i-PrОН				5	30	1500	5
1	15	125	1	Отбор 20мл			
1	30	150	1	5	45	1500	5
1	45	175	1	6	0	2000	5
2	0	200	1	Отбор 20мл, +10 мл i-PrОН			
Отбор 2мл, +2 мл i-PrОН				6	15	2000	5
2	6	30	3000	6	30	3000	5
2	30	300	1	Отбор 20мл, +10 мл i-PrОН			
2	45	350	1	6	45	3000	5
3	0	400	1	7	0	4000	10
Отбор 5мл, +5 мл i-PrОН				Отбор 20мл			
3	15	500	1	7	15	4000	10

Час	Минута	ТЭОС, мкл	Аммиак, мл	Час	Минута	ТЭОС, мкл	Аммиак, мл
3	30	500	1	7	30	6000	10
Отбор 20мл, +10 мл i-PrOH				Отбор 50мл, +40 мл i-PrOH			
3	45	500	2	7	45	6000	10
4	0	600	2	8	0	Остановка синтеза	
Отбор 20мл, +20 мл i-PrOH							
4	15	700	2				
4	30	800	2				

Результаты и обсуждение

Были получены графики зависимости размеров ядер и частиц оксида кремния SiO₂ (нм) от времени синте-

за (часы) (рисунок 12). Также представлены графики абсолютного и относительного стандартных отклонений для каждой из исследуемых групп (рис. 13 и 14)

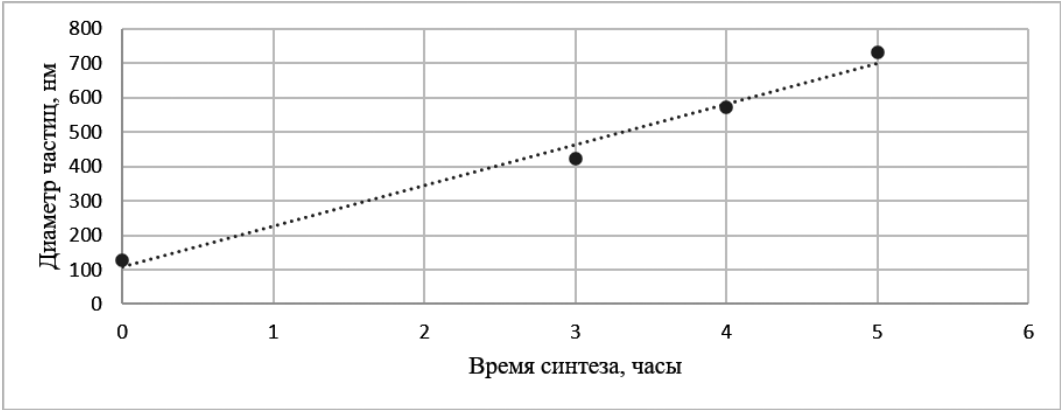


Рис. 12. График зависимости размера частиц SiO₂ от времени синтеза

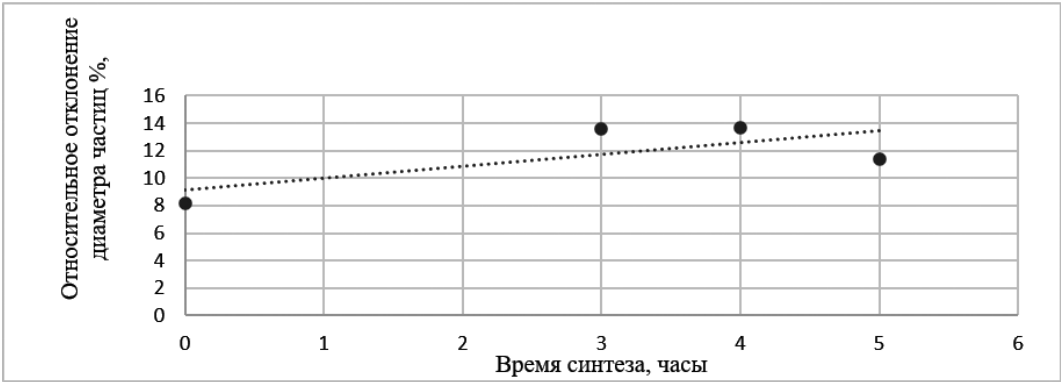


Рис. 13. График зависимости относительного отклонения размера частиц SiO₂ от времени синтеза

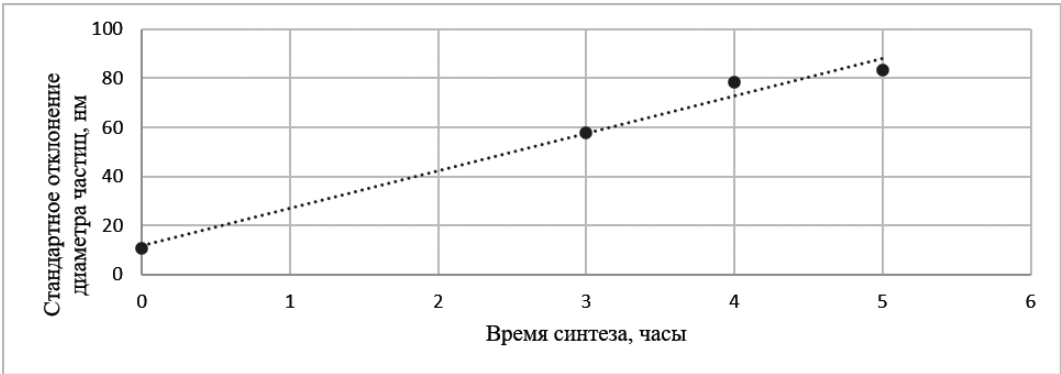


Рис. 14. График зависимости стандартного отклонения размера частиц SiO₂ от времени синтеза

Практическая значимость продукта заключается в возможности синтеза и исследования частиц SiO₂ в услови-

ях ограниченности ресурсов. Было предпринято упрощение отдельных этапов синтеза и исключение влияния

человеческого фактора посредством автоматизации подачи реагентов.

Для достижения желаемой цели — успешного продукта были выполнены его изначальные критерии успеха, а в ходе работы продукт постоянно дорабатывался — были добавлены СЭМ-изображения частиц, расширена выборка отбора образцов и оптимизирована обработка данных.

Интерпретация и объяснение полученных результатов

В ходе исследования было установлено, что с увеличением времени синтеза средний размер частиц оксида кремния (SiO_2) увеличивается. Кроме того, наблюдается увеличение разброса размеров частиц, это свидетельствует о росте полидисперсности образцов, что подтверждает выдвинутую гипотезу.

Полученные результаты согласуются с литературными данными по методу Штобера. В обзоре методов регулирования размеров частиц оксида кремния отмечается, что продолжительность синтеза является одним из ключевых параметров, влияющих на размер образующихся частиц [6]. Полученные в работе результаты подтверждают закономерность.

Увеличение разброса размеров частиц объясняется неравномерностью роста. После образования ядер часть частиц получает больше силикатных фрагментов и начинает расти быстрее остальных. В результате различия между размерами отдельных частиц постепенно увеличиваются. Подобный механизм был описан в работах Букари, Лонг

и Харрис, где с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния было показано, что в ходе синтеза частиц SiO_2 происходит непрерывное зародышеобразование и последующий рост частиц, что влияет на распределение размеров и его изменение во времени [6].

Дополнительным объяснением наблюдаемого увеличения размеров частиц является продолжающийся процесс конденсации кремниевых соединений на поверхности уже существующих частиц. Согласно исследованиям, по мере протекания реакции частицы продолжают уплотняться и увеличиваться в размерах [9].

Заключение

Результаты проведённого исследования согласуются с данными других авторов и подтверждают, что увеличение времени синтеза приводит не только к росту среднего размера частиц SiO_2 , но и к увеличению их полидисперсности. Это необходимо учитывать при получении материалов с заданными характеристиками.

Практическая значимость работы заключается в создании методики с возможностью управления размерами частиц путём изменения времени синтеза. Для получения более мелких и однородных частиц рекомендуется сокращать продолжительность реакции. Если требуется получить более крупные частицы, время синтеза может быть увеличено, однако это сопровождается ростом разброса размеров и снижением однородности материала. Полученные результаты могут быть использованы при производстве частиц SiO_2 для последующего применения в композитах и производстве фотонных кристаллов

ЛИТЕРАТУРА:

1. Akhmadeev, A. A. Investigations of properties of opal-like photonic crystals using combined methods / A. A. Akhmadeev, M. K. Salakhov. — Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — № 714. URL: https://www.researchgate.net/publication/303503881_Investigations_of_properties_of_opal-like_photonic_crystals_using_combined_methods
2. Синицкий, А. С. Синтез и оптические свойства фотонных кристаллов на основе диоксида кремния / А. С. Синицкий. — Текст: электронный // chem.msu.ru: [сайт]. — URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/events/mendel-xiv/objects/sinickii.pdf> (дата обращения: 24.06.2026)
3. Свяховский, С. Е. Фотонные кристаллы с произвольным числом фотонных запрещённых зон на основе пористого оксида кремния с плавным изменением показателя преломления / С. Е. Свяховский, Н. И. Пышков. — Текст: электронный // Оптика и спектроскопия. — 2023. — № 8 (Том 131). — С. 1128–1132. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/56306>
4. Photonic Crystals Market Size, Share, Trends, Dynamics, Forecast & Growth Analysis. — Текст: электронный // IMARC Group: [сайт]. — URL: <https://www.imarcgroup.com/photonic-crystals-market> (дата обращения: 24.06.2026).
5. Analysis of methods of regulation of silicon dioxide particles size obtained by the Stober method / Anastasiia Kharchenko, Myronyuk Oleksiy, Melnyk Liubov, Sivolapov Pavlo. — Текст: электронный // Chemical Engineering. — 2018. — № 3 (40). — С. 9–16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analysis-of-methods-of-regulation-of-silicon-dioxide-particles-size-obtained-by-the-stober-method>
6. Polydispersity during the Formation and Growth of the Stöber Silica Particles from Small-Angle X-Ray Scattering Measurements / Boukari, H., G. L. Gabrielle, M T Harris and. — Текст: электронный // Journal of Colloid and Interface Science. — 2000. — № 229 (1). — С. 129–139. URL: <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7007>
7. Monodisperse SiO_2 Microspheres with Large Specific Surface Area: Preparation and Particle Size Control / LI Shengkai, XU Xianjin, LI Wei [и др.]. — Текст: электронный // Research and Application of Materials Science. — 2021. — № 1. — С. 17–23. URL: https://www.researchgate.net/publication/380627003_Monodisperse_SiO2_Microspheres_with_Large_Specific_Surface_Area_Preparation_and_Particle_Size_Control
8. Синтез золя наноразмерных сфер оксида кремния и формирование фотонной структуры. — Текст: электронный // Сборник задач Олимпиады НТИ — 2017 по профилю: «Современные структуры и материалы». — Олимпиада НТИ, 2017. — С. 63–65. <https://ntcontest.ru/docs/books2017/Нанотехнологии.pdf>

9. Small-Angle X-Ray Scattering Study of the Formation of Colloidal Silica Particles from Alkoxides: Primary Particles or Not? / Boukari, H., J. S. Lin, M T Harris and. — Текст: электронный // Journal of Colloid and Interface Science. — 1997. — № 194 (2). — С. 311–318. URL: <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5112>

Создание автоматизированного гроубокса на основе гидропонного метода выращивания растений

Переверзева Алёна Михайловна, учащаяся 9-го класса

Научный руководитель: Котин Павел Александрович, заведующий лабораторией

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В работе представлены результаты разработки и экспериментальной апробации автоматизированного гроубокса замкнутого типа для гидропонного культивирования растений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания доступных и воспроизводимых систем городского фермерства, способных поддерживать стабильные параметры питательной среды без постоянного вмешательства оператора. На основе анализа существующих аналогов сформулированы критерии оптимальности проектируемой установки.

*Разработана принципиальная электрическая и гидравлическая схема установки с использованием микроконтроллера Arduino, набора датчиков (уровня раствора, температуры, влажности) и исполнительных устройств (погружной насос, аэратор, низкогопрофильный кулер, увлажнитель воздуха, LED-освещение). Предложен алгоритм автоматического регулирования уровня питательного раствора, фотопериода и климатических условий на основе обратной связи с гистерезисом. Особенностью системы является гибридная схема обслуживания: автоматический долив дистиллята при снижении уровня и ручная замена концентрированного раствора по сигналу датчиков. Экспериментальная часть включала культивирование томатов сорта «Монеточка» (*Solanum lycopersicum*) в течение полного вегетационного цикла (от посадки семян 15 сентября до сбора урожая 8 декабря). Проведён непрерывный мониторинг параметров питательной среды и микроклимата. Оценка эффективности выполнена по двум направлениям: биометрические показатели растений (равномерность роста, сроки плодоношения, качество плодов) и органолептическая оценка урожая целевой аудиторией (анкетирование дегустаторов). Установлено, что разработанная система обеспечивает стабильный рост растений без критических сбоев на протяжении всего цикла, а полученный урожай признан пригодным для употребления в пищу. Подтверждена способность системы автоматически поддерживать заданные параметры без постоянного вмешательства пользователя после этапа настройки.*

По итогам работы сформулированы практические рекомендации по доработке конструкции (замена датчика уровня, оптимизация кода управления) и масштабированию системы. Предложенное техническое решение может быть использовано в малообъёмном растениеводстве, образовательных целях и частных хозяйствах, а также рассматривается автором как основа для дальнейшего вывода продукта на рынок.

Ключевые слова: *автоматизированный гроубокс, гидропоника, Arduino, управление питательным раствором, томаты, сорт «Монеточка», городское фермерство, автоматизация микроклимата.*

Введение
Обеспечение населения свежей, экологически чистой растительной продукцией является одной из важнейших социальных и продовольственных задач России. Значительная часть территории нашей страны относится к зонам рискованного земледелия, а многие регионы зависят от поставок сельскохозяйственной продукции из других субъектов Российской Федерации.

Одним из перспективных решений данной проблемы является гидропоника — метод выращивания растений без почвы на искусственных питательных средах. Гидропоника позволяет значительно экономить водные ресурсы. В отличие от традиционного почвенного выращивания, водопотребление в гидропонных системах может сокращаться на 70–90%. Кроме того, гидропонные системы исключают использование пестицидов и дают возможность получать урожай круглый год независимо от внеш-

них климатических условий. Всё это делает гидроponику одним из ключевых направлений будущего сельского хозяйства, поскольку она решает проблему нехватки ресурсов, урбанизации и необходимости круглогодичного производства свежих продуктов.

Однако эффективность гидропонного выращивания напрямую зависит от возможности контролировать параметры среды: освещённость, температуру, влажность и состав питательного раствора. Для решения этой задачи в домашних условиях возможно создание компактных автоматизированных гроубоксов — закрытых систем с контролируемым микроклиматом.

Цель работы — разработать и экспериментально верифицировать прототип автоматизированного гидропонного гроубокса, обеспечивающего стабильные параметры среды для полного вегетационного цикла томатов в домашних условиях.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих гидропонных и автоматизированных систем, выявить их ограничения и определить критерии проектирования доступной установки.

2. Разработать конструкцию гроубокса, включая корпус, гидравлический контур, осветительную и вентиляционную системы, и обосновать выбор элементной базы.

3. Спроектировать алгоритм управления на базе микроконтроллера Arduino для автоматической поддержки уровня питательного раствора, фотопериода, температуры и влажности.

4. Провести экспериментальное культивирование томатов от посева до сбора урожая в разработанном гроубоксе, зафиксировав динамику роста и качественные характеристики плодов.

5. Оценить эффективность разработанной системы по совокупности критериев: стабильность автоматики, биологическая успешность и потребительские свойства урожая.

Научная новизна работы определяется тем, что впервые проведена экспериментальная апробация бюджетной модели автоматизированного гроубокса, сконструированного из доступных материалов и адаптированного для применения в условиях школы. В отличие от существующих коммерческих аналогов, ориентированных на премиальный сегмент, предложенная конструкция объединяет автоматическое управление уровнем раствора, фотопериодом и микроклиматом в единой доступной системе. Впервые для установки данного типа проведена комплексная оценка эффективности, включающая инженерную стабильность, биометрические показатели растений и органолептические свойства полученного урожая.

Разработанный гроубокс может быть использован как платформа для учебных проектов по биологии, экологии, биотехнологии и автоматизации, а также для организации внеурочной деятельности школьников, направленной на формирование межпредметных инженерных и исследовательских компетенций. Доступность и воспроизводимость конструкции позволяют тиражировать установку в других образовательных учреждениях и применять её в качестве базы для дальнейших исследовательских работ в области городского фермерства и управляемого растениеводства.

Обзор литературы

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к гидропонным технологиям как к перспективному направлению современной агропромышленности [1]. Гидропоника — метод выращивания растений без использования почвы, с применением минерально-питательных растворов на водной основе — предлагает ряд преимуществ: экономия воды, повышение урожайности, возможность выращивания в городских условиях и сокращение трудозатрат [2, 3].

Наиболее доступным и распространённым материалом для изготовления корпуса гроубокса является ЛДСП (ламинированная древесно-стружечная плита). Данный материал может использоваться как новый, так и быв-

ший в употреблении — при условии выполнения распила для придания нужных размеров [4]. После определения габаритов заказывается распил листов, после чего конструкция собирается с помощью крепёжных элементов [4]. В качестве альтернативы также используется старая мебель — шкафы, тумбы или шифоньеры, если их размеры подходят для выращивания растений [5]. Внутренние стенки гроубокса должны быть покрыты светоотражающим материалом для равномерного распределения света по всему объёму.

Также существуют специализированные гроутенты — палатки на каркасе из металлических трубок с чехлом из плотной ткани, внутри покрытой светоотражающим материалом Mylar [6]. В качестве материала каркаса часто используется металлическая труба 16 мм, а внешний слой выполняется из ткани Oxford 600D [6].

Габариты гроубокса определяются количеством растений и их видовыми особенностями. Высота конструкции ограничивает вертикальное пространство для роста культур: для высокорослых растений (томаты, огурцы) требуется высота 1,5–2 метра, тогда как для низкорослых культур (зелень, редис, лук) достаточно 0,8–1 метра [7]. При этом необходимо учитывать, что источник освещения занимает около 30 см вертикального пространства, а при использовании подвесных креплений — до 40–50 см [8]. Наиболее распространённые типоразмеры включают компактный формат 40×40×160 см для микрозелени и трав, средний формат 60×60 или 80×80 см для нескольких растений перца и салатов, а также полноразмерные конструкции 100×100×200 см для культивирования высокорослых культур [7]. В верхней части корпуса рекомендуется предусмотреть технический отсек высотой 10–20 см для размещения электрических компонентов [9].

Качество освещения является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность фотосинтеза [10]. В компактных домашних конструкциях рекомендуется использовать светодиодные (LED) или неоновые лампы, которые характеризуются низким тепловыделением и относительно низким энергопотреблением [10]. Вентиляция обеспечивается вытяжным вентилятором и вентиляционными отверстиями для поступления кислорода; также могут применяться угольные фильтры для устранения запахов [11]. Система автоматизации включает реле времени, датчики температуры и влажности, а при необходимости — обогреватели и увлажнители воздуха [12].

Ключевым элементом автоматизации гидропонных систем стали микроконтроллеры, в первую очередь платформа Arduino. Это связано с её доступностью, простотой программирования и широкими возможностями для интеграции с датчиками и исполнительными устройствами [13]. Обзор литературы показывает, что устройства на базе Arduino и ESP8266 являются наиболее распространёнными для построения систем мониторинга и управления в гидропонике.

Примером комплексного подхода является разработка «GrowSphere» — интеллектуальной гидропонной системы, где архитектура включает микроконтроллер Arduino с датчиками pH, электропроводности и уровня воды, автоматически регулирующий подачу питатель-

ных веществ, воды и спектр LED-освещения. Система также поддерживает удалённый мониторинг и прогнозирование роста. Экспериментальные результаты показали, что растения в такой системе достигают наибольшей сырой массы ($11,0 \pm 1,5$ г) по сравнению с глубоководной гидропоникой ($1,2 \pm 0,3$ г) и почвенным выращиванием ($0,9 \pm 0,4$ г), что подтверждает эффективность автоматизации. [14] Другое исследование предлагает компактную домашнюю гидропонную систему, интегрирующую аппаратное и программное обеспечение в традиционную гидропонику, что позволяет использовать её в условиях ограниченного городского пространства. [15] В работе Канцеляристов А. В. рассматривается построение полностью автоматизированной гидропонной фермы — гроубокса, изолированного от внешней среды, с удалённым управлением по локальной сети. Управление такой фермой происходит с сервера по заранее запланированному сценарию. [6]

В России также ведутся активные разработки в этой области. Например, команда Северо-Кавказского федерального университета создала прототип гроубокса с системой автоконтроля, использующий контроллер собственной разработки. Система оснащена датчиками температуры, влажности воздуха и освещённости, насосом, вентилятором и расходомером, а управление микроклиматом осуществляется через специальное веб-приложение. [16]

Материалы и методы

Для проведения эксперимента была разработана и собрана автоматизированная гидропонная установка замкнутого типа (гроубокс). Корпус гроубокса выполнен из алюминиевого Х-образного профиля сечением 20 мм, соединённого крепёжными уголками с помощью болтов и гаек М4×10. Стенки изготовлены из листов ПВХ, оклеенных отражающим слоем фольги, для обеспечения равномерного распределения света. Для наблюдения за растениями в передней части корпуса установлены листы оргстекла, внутренняя поверхность оклеена зеркальной солнцезащитной пленкой (30% и 15%). Внутренние размеры рабочей камеры составили 1250 × 750 × 450 мм

Гидропонная система реализована по принципу глубоководного культивирования (Deep Water Culture, DWC): корни растений постоянно погружены в питательный раствор, находящийся в пластиковом контейнере объёмом 30 л, установленном в нижней части гроубокса. Для насыщения раствора кислородом использовались аквариумные аэраторы, обеспечивающие непрерывную подачу воздуха. Растения помещались в пластиковые посадочные стаканчики, заполненные минеральной ватой, и закреплялись в отверстиях лотков, расположенных над поверхностью раствора, так что корневая система находилась в постоянном контакте с жидкостью. Поддержание уровня раствора осуществлялось автоматически: при снижении объёма жидкости ниже заданного порога (вследствие транспирации и испарения) срабатывал датчик уровня, инициируя подачу дистиллированной воды насосом долива до восстановления исходного уровня. Подача раствора к растениям осуществлялась погружным насосом через ПВХ-шланги. Полная замена питательного раствора проводилась вручную один раз в месяц.



Рис. 1. Собранный гидропонный гроубокс

Управление установкой реализовано на базе микроконтроллера Arduino (ATmega328, тактовая частота 16 МГц, 14 цифровых и 6 аналоговых входов/выходов). Для мониторинга параметров среды использовались следующие датчики:

- датчик уровня воды — для контроля объёма питательного раствора в резервуаре;
- датчик температуры и влажности DHT22 (диапазон измерения температуры: — 40...+80 °С, точность $\pm 0,5$ °С; влажности: 0–100%, точность ± 2 –5%) — для контроля микроклимата внутри камеры.

Исполнительные устройства включали:

- погружной насос для подачи питательного раствора;
- насос долива дистиллированной воды;
- низкопрофильный кулер для вентиляции;
- увлажнитель воздуха;
- LED-светильник полного спектра для обеспечения фотопериода.

Все исполнительные устройства подключались через релейные модули, управляемые цифровыми выходами микроконтроллера. Программный код разработан в среде Arduino IDE на языке C++. Отладка системы проводилась поэтапно: последовательно тестировались каждый контур управления (освещение, вентиляция, полив) и логика взаимодействия между ними.

В качестве тестовой культуры использовались томаты сорта «Монеточка» (*Solanum lycopersicum*) — ультраскороспелый детерминантный сорт.

Семена высажены 15 сентября в минеральную вату для проращивания. На этапе проращивания минеральная вата насыщалась питательным раствором с ЕС = 1,5–1,8 мСм и pH = 5,0–5,3. После появления всходов саженцы пересажены в гидропонную систему 5 ноября.

Питательный раствор готовился на основе дистиллированной воды с добавлением комплексного минерального удобрения. В период вегетации поддержива-

лись следующие параметры: ЕС раствора — 2,0–2,8 мСм, рН — 5,5–6,5. Температура в рабочей камере поддержи-

валась в диапазоне 18–25 °С, относительная влажность воздуха — 60–80%.



Рис. 2. Семена томатов

Органолептическая оценка: проведено анкетирование дегустаторов для оценки вкусовых качеств полученного урожая. Респондентам предлагалось оценить внешний вид, аромат, вкус и общее впечатление от плодов по пяти-балльной шкале. В опросе приняли участие 35 респондентов, представляющих целевую аудиторию потенциальных пользователей домашних гроубоксов: учащиеся и сотрудники ОАНО «Школа «Лето́во» в возрасте от 14 до 55 лет.

Результаты

В ходе выполнения работы был успешно собран и запущен прототип автоматизированного гидропонного гроубокса. Все конструктивные элементы были смонтированы в соответствии с разработанным эскизом: алюминиевый каркас, стенки из ПВХ и оргстекла, отражающее покрытие, гидравлический контур и система автоматизации на базе Arduino. Подключение и настройка всех исполнительных устройств — насоса, аэратора, вентилятора, увлажнителя и освещения — выполнены через релейные модули, управляемые микроконтроллером.

В процессе отладки возникали технические сложности, связанные с нестабильной работой датчика уровня, что потребовало дополнительной настройки порогов срабатывания и переделки узла крепления датчика. После устранения выявленных неполадок система продемонстрировала стабильную работу: автоматическое доливание раствора происходило при каждом снижении уровня ниже установленного порога, фотопериод (16 часов света / 8 часов темноты) соблюдался без сбоев, вентиляция и увлажнение активировались при достижении заданных порогов температуры и влажности.

На протяжении всего эксперимента не было зафиксировано критических сбоев, которые могли бы привести к гибели растений или потере урожая. Семена томатов сорта «Монеточка» были высажены 15 сентября в минеральную вату для проращивания. Всходы появились на 5–7-й день. 5 ноября саженцы пересажены в гидропонную си-

стему. Адаптация растений к новым условиям прошла успешно: признаки стресса (увядание, пожелтение листьев) не наблюдались. В период вегетации растения демонстрировали равномерный рост без видимых признаков дефицита питательных веществ или заболеваний.

В соответствии с сортовыми характеристиками, томаты «Монеточка» являются ультраскороспелым детерминантным сортом. В условиях разработанного гроубокса цветение началось через 3 недели после пересадки, завязывание плодов — через 5 недель. Сбор урожая произведён 8 декабря, что составило примерно 84 дня от посева семян. Полученные плоды имели характерную для сорта округлую форму, массу 15–30 г и насыщенную золотисто-оранжевую окраску.

Таблица 1. Результаты органолептической оценки плодов (n = 35)

Оцениваемый параметр	Средняя оценка, баллов
Внешний вид	4,7
Аромат	4,5
Вкус	4,8
Общее впечатление	4,6

Обсуждение результатов

В ходе выполнения работы был успешно разработан, собран и экспериментально апробирован прототип автоматизированного гидропонного гроубокса. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность создания доступной и воспроизводимой установки для круглогодичного выращивания овощных культур в домашних условиях на базе общедоступных компонентов и открытой платформы Arduino.

Разработанная система автоматизации продемонстрировала стабильную работу на протяжении всего вегетационного цикла (84 дня). Автоматическое поддержание

уровня питательного раствора, фотопериода и микроклимата позволило свести к минимуму необходимость вмешательства пользователя, что подтверждает достижение одной из ключевых целей проекта — создание системы, функционирующей в автономном режиме. Однако в процессе отладки были выявлены технические ограничения используемого датчика уровня: его нестабильная работа на начальных этапах потребовала дополнительной настройки порогов срабатывания и переделки узла крепления. Это указывает на необходимость использования более надёжных датчиков (например, поплавковых или ультразвуковых) в будущих версиях установки. Тем не менее, после устранения неполадок система работала без критических сбоев, что подтверждает принципиальную пригодность выбранной элементной базы для решения поставленных задач.

Выращивание томатов сорта «Монеточка» в разработанном гроубоксе подтвердило эффективность гидропонного метода для получения полноценного урожая в контролируемых условиях. Сроки вегетации соответствуют паспортным данным сорта, что свидетельствует о корректности поддерживаемых параметров среды. Отсутствие признаков дефицита питательных элементов, болезней и вредителей подтверждает преимущества гидропонного выращивания в замкнутом пространстве по сравнению с традиционным почвенным методом, где подобные риски значительно выше. Равномерный рост растений на протяжении всего эксперимента указывает на стабильность питательного раствора и эффективность системы аэрации корней.

Высокие оценки, полученные в ходе дегустации (средний балл 4,6 из 5), свидетельствуют о том, что выращенные в гидропонной системе плоды не уступают по вкусовым качествам выращенным традиционным способом. Это важный результат, поскольку одним из распространённых стереотипов является мнение о «водянистом» или пресном вкусе гидропонных овощей. Полученные данные опровергают этот стереотип, подтверждая, что при корректном подборе питательного раствора и соблюдении режимов выращивания гидропонные томаты обладают насыщенным вкусом и ароматом, характерным для сорта.

Выводы

В ходе выполнения работы были решены все поставленные задачи, что позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Существующие коммерческие системы ориентированы на премиальный сегмент и недоступны для широкого пользователя, а любительские разработки не проходят экспериментальной проверки, что подтверждает актуальность создания доступной и воспроизводимой установки.
2. Спроектирована и собрана работоспособная конструкция гроубокса из доступных материалов (алюминиевый профиль, листы ПВХ, светоотражающая плёнка), пригодная для использования в домашних условиях. Все необходимые элементы установлены и функционируют.
3. Реализованный алгоритм управления обеспечил стабильную работу всех систем автоматизации (поддержание уровня раствора, фотопериода, температуры и влажности) без критических сбоев на протяжении всего вегетационного цикла.

4. Экспериментальное культивирование томатов сорта «Монеточка» показало, что разработанная установка обеспечивает полноценное прохождение растениями всех фаз развития: вегетационный цикл составил 84 дня и соответствовал сортовым характеристикам.

5. Эффективность системы подтверждена отсутствием критических сбоев автоматики, получением съедобного урожая и высокими органолептическими оценками плодов (средняя оценка 4,7 из 5, $n=35$), что свидетельствует о практической пригодности установки для домашнего выращивания томатов.

Несмотря на успешные результаты, исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации данных и планировании дальнейших работ.

Во-первых, эксперимент проводился с одной тестовой культурой (томаты сорта «Монеточка») в единственном экземпляре установки, что не позволяет сделать статистически обоснованные выводы о воспроизводимости результатов. Для получения более надёжных данных необходимо проведение серии параллельных экспериментов с повторениями.

Во-вторых, в работе не проводился количественный анализ продуктивности (масса урожая, количество плодов на растение, содержание сухих веществ, витаминов и т. п.), что ограничивает возможность объективного сравнения с другими методами выращивания. Органолептическая оценка, хотя и даёт ценную информацию о потребительских свойствах, является субъективной и не заменяет инструментального анализа качества продукции.

В-третьих, система автоматизации не включала контроль pH и EC питательного раствора в реальном времени, что является важным параметром для гидропонного выращивания. В данной работе поддерживались заданные диапазоны pH и EC, но контроль осуществлялся периодически с использованием портативных измерителей, а не непрерывно через систему автоматизации. Это ограничение связано с доступной элементной базой и является направлением для дальнейшего совершенствования установки.

В-четвёртых, в работе отсутствовала контрольная группа растений, выращенных в идентичных условиях, но без автоматизации или в почве, что затрудняет количественную оценку вклада автоматизации в конечный результат. Однако, как отмечалось, цель работы не заключалась в сравнении урожайности, а в демонстрации принципиальной возможности создания стабильно работающей автоматизированной системы.

На основе полученных результатов и выявленных ограничений могут быть определены следующие направления для дальнейшего развития проекта:

- Совершенствование системы мониторинга: интеграция датчиков pH и EC для непрерывного контроля и автоматической корректировки состава питательного раствора, что позволит исключить ручной этап замены раствора и повысить точность поддержания параметров.
- Повышение надёжности: замена датчика уровня на более точный и надёжный (ультразвуковой или поплавковый), внедрение системы резервирования для критических узлов (насос, аэратор).

— Сбор количественных данных: проведение эксперимента с фиксацией массы урожая, количества плодов, содержания сухих веществ, витаминов и нитратов для объективной оценки качества продукции.

— Сравнительные исследования: проведение параллельных экспериментов с выращиванием одной культуры в гидропонной системе и в почве для количественной оценки преимуществ гидропоники в условиях контролируемого микроклимата.

— Расширение спектра культур: тестирование установки на других овощных и зеленных культурах (салат, базилик, перец, огурцы) для оценки универсальности предложенной конструкции.

— Масштабирование и коммерциализация: доработка дизайна с целью снижения себестоимости и улучшения эргономики, разработка пошаговой инструкции и открытого доступа к программному коду для тиражирования системы.

Несмотря на указанные ограничения, полученные результаты имеют как практическое, так и образовательное значение. Во-первых, подтверждена возможность получения полноценного урожая томатов в автоматизированной гидропонной системе, собранной из доступных материалов, что делает такую установку перспективной для домашнего использования и городского фермерства. Во-вторых, проект представляет интерес для образовательных учреждений как пример интеграции естественно-научных и инженерных дисциплин в рамках проектной деятельности, способствуя формированию у школьников исследовательских и инженерных компетенций. В-третьих, разработанный гроубокс может служить основой для дальнейших научных исследований в области оптимизации режимов выращивания различных культур в контролируемых условиях, что подтверждается интересом экспертов и планами автора по развитию проекта.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hydroponics: A review of sustainability and productivity [Электронный ресурс] // AIP Publishing. — 2025. — URL: <https://pubs.aip.org>, свободный (дата обращения: 16.06.2026).
2. Вертикальные фермы: экономия воды до 95% [Электронный ресурс] // РУДН. — URL: <https://www.rudn.ru/media/news/nauka/agronomiarus-kak-student-rudn-sozdaet-agroteh-budushchee-s-mnogoetajnymi-fermami>, свободный (дата обращения: 16.06.2026).
3. Рассоха Д.С., Кандрашкина Е.А. Гроубокс как элемент автоматизации сельского хозяйства // Материалы Международной научно-практической конференции «Инженерные решения в агропромышленном комплексе». — Белгород: Белгородский ГАУ, 2024. — С. 145–149.
4. Бураков Д. А. Разработка и исследование автоматизированной гидропонной установки для домашнего использования // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета. — 2025. — № 2 (58). — С. 67–72.
1. Технические характеристики гроутентов // ГОСТ Р 59600–2021 «Установки для выращивания растений в защищённом грунте. Общие технические условия». — М.: Стандартинформ, 2021. — Разд. 5 «Материалы и конструкции».
2. Канцеляристов А.В. Разработка автоматизированной гидропонной фермы с удалённым управлением по локальной сети // Научный альманах. — 2025. — № 4. — С. 56–62.
3. Мини-гроубоксы: обзор типоразмеров // Журнал «Цветоводство». — 2024. — № 6. — С. 28–31.
4. Проектирование гроубокса: эргономические требования // Сборник научных трудов Института агроинженерии. — СПб: СПбГАУ, 2024. — Вып. 12. — С. 88–92.
5. Кузнецов Е. А., Калабкин А. А., Ивлиев С. Н. и др. Разработка и исследование светодиодного фитооблучателя // Справочник. Инженерный журнал. — 2024. — № 3. — С. 46–52. — DOI: 10.14489/hb.2024.03.pp.046–052
6. Система интеллектуального управления технологическими процессами воздухообеспечения [Электронный ресурс] // Вестник ГСТОУ. — URL: <https://gstou.ru>, свободный (дата обращения: 16.06.2026).
7. Kumara V., Naik A., Tahsir F. et al. IoT-enabled smart hydroponic system using nutrient film technique for precision agriculture // International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT). — 2026. — Vol. 15, No. 2. — P. 900–908. — DOI: 10.11591/ijict.v15i2.pp900–908.
8. Automated hydroponic system for precision agriculture: a review // Journal of Agricultural Engineering. — 2025. — Vol. 56, No. 4. — P. 215–228.
9. Arduino-based automation in hydroponics: a review // Journal of Agricultural Engineering. — 2025. — Vol. 56, No. 2. — P. 112–119.
10. Obeysekara V., Perera T.A., De Silva L.N. C., Sandaruwan K.D. GrowSphere: Intelligent Hydroponic System for Effortless Cultivation of Leafy Vegetables // IEEE Access. — 2026. — Vol. 14. — P. 2320–2334. — URL: <https://doaj.org/article/a9f77da49df645f09a7477739ab0b40a>, свободный (дата обращения: 17.06.2026).
11. Urban small-scale hydroponics: A compact, smart home-based hydroponics system [Электронный ресурс] // PubMed Central (PMC). — 2024. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov>, свободный (дата обращения: 17.06.2026).
12. Для интерьера и научных наблюдений: прототип гроубокса с системой автоконтроля за растениями создали в СКФУ [Электронный ресурс] // Poisknews.ru. — 2024. — 10 августа. — Режим доступа: <https://poisknews.ru/tehnologii/dlya-interera-i-nauchnyh-nablyudenij-prototip-grouboksa-s-sistemoj-avtokontrolya-za-rasteniyami-sozdali-v-skfu/>, свободный (дата обращения: 17.06.2026).

Коэффициент пропускания излучения в зависимости от угла падения света на интерференционный фильтр

Петросян Ника Александровна, учащаяся 10-го класса

Научный руководитель: Синицын Евгений Александрович, учитель физики

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В работе исследуется влияние угла падения света на интенсивность излучения, проходящего через интерференционный фильтр. Наблюдаемый эффект сначала выявлен при сравнении астрофотографий Млечного Пути с фильтром и без него, а затем проверен в лабораторном опыте с лазером длиной волны 663 нм. После корректировки выравнивания установки максимум интенсивности оказался близок к нулевому углу. При выбранном критерии не менее 50% от максимальной интенсивности рабочий диапазон углов составил приблизительно от -8° до $+4^\circ$.

1 Введение

Астрономия и физика — науки, в которых постоянно необходимо наблюдать, а такие доступные устройства как телефоны и камеры не всегда способны запечатлеть детали, необходимые для точного исследова-

ния. Именно поэтому астрономы часто стремятся улучшить экспериментальное оборудование при изучении звездного неба, в частности, интерференционный фильтр, использованный в данной работе, является тому примером. [3, 4]

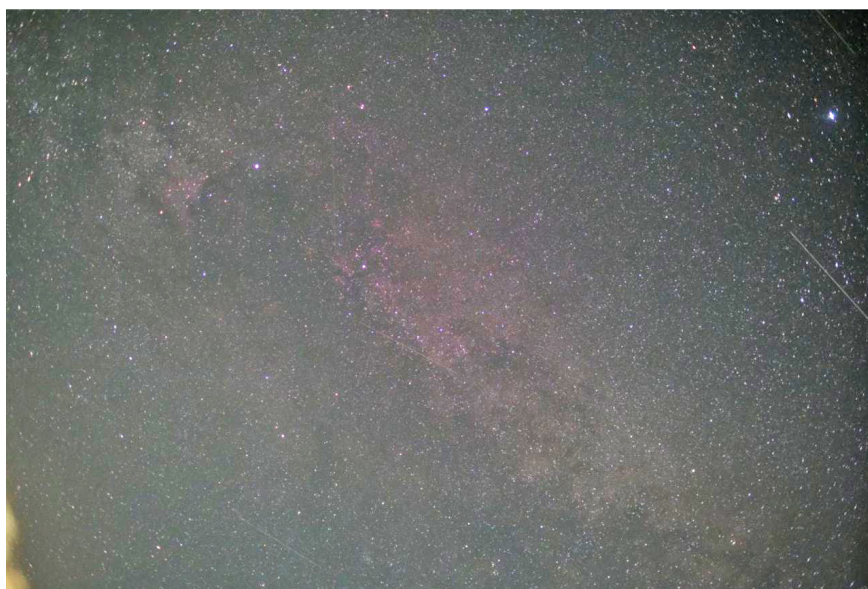


Рис. 1. Фотография Млечного Пути от 12.06.2024 без фильтра

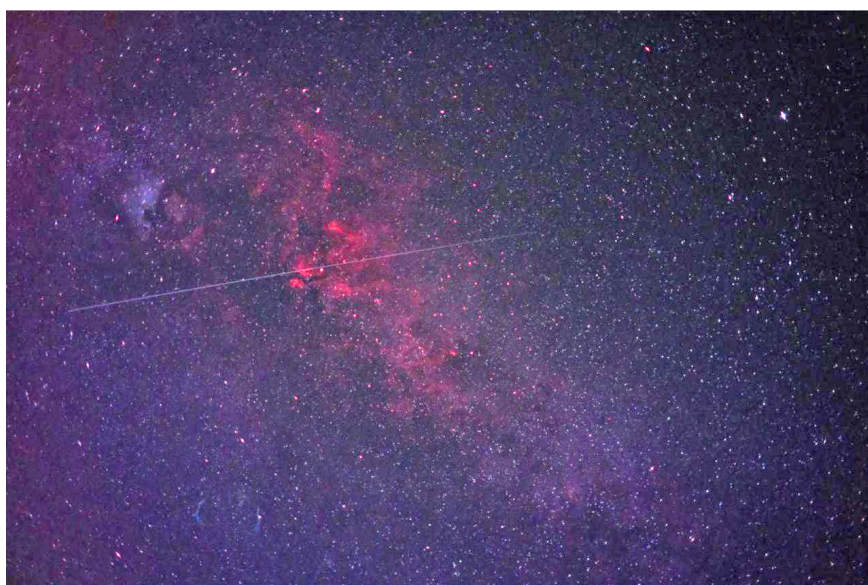


Рис. 2. Фотография Млечного Пути от 12.06.2024 с интерференционным фильтром

Фотография на рис. 1 была сделана на камеру (объектив fuji^{on} 35 f 1.4) без интерференционного фильтра 12 июня 2024 г. На фото зафиксирован Млечный Путь, его видно по главной диагонали фотографии слева направо. Как можно заметить, яркость звезд сохраняется примерно одинаковой по всей области Млечного Пути.

На рис. 2 изображен снимок с того же самого ракурса, но уже с интерференционным фильтром. Можно заметить, что одна часть галактики имеет свечение значительно ярче, чем другая, причем высшую яркость имеют звезды, на которую направлена камера под прямым углом.

Объяснением замеченного эффекта может быть гипотеза о том, что с увеличением угла падения на плоскость интерференционного фильтра коэффициент пропускания на длине волны $H\alpha$ (длин волн из второго абзаца) снижается. Это будет проверено двумя методами. [3, 4]

Методы исследования

Применяя цифровой метод, удалось проверить, какую яркость имеет каждая точка на выделенном участке снимка (см. рис. 3). График зависимости яркости (относительные единицы) от координат ниже показывает, что амплитуда яркости составляет всего 5 относительных единиц. [5]

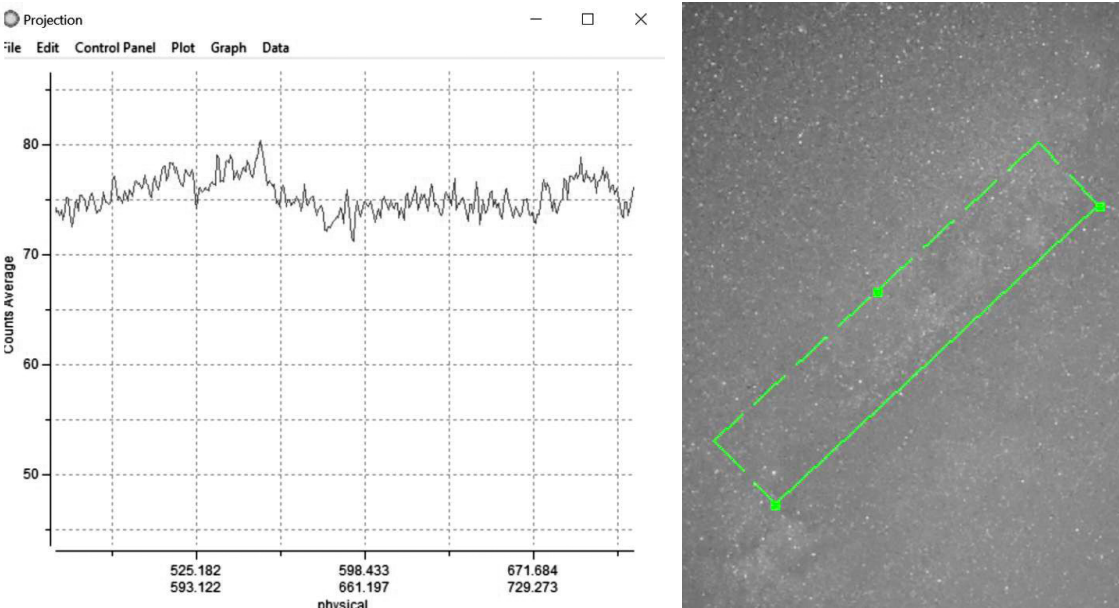


Рис. 3. График зависимости интенсивности от координаты на выделенном фрагменте снимка без интерференционного фильтра

Следующий снимок (рис. 4) отражает исследуемую часть снимка, снятого с интерференционным фильтром.

На этом графике уже видно, что интенсивность посередине значительно возрастает [5, 7]

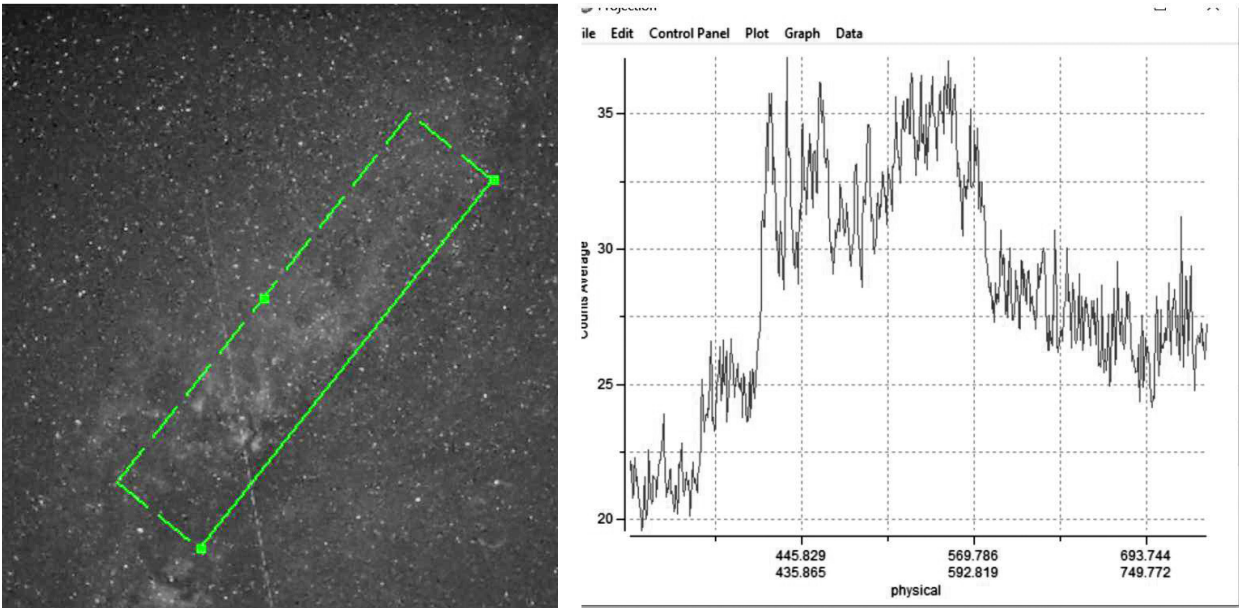
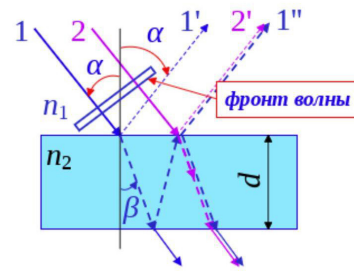


Рис. 4. График зависимости интенсивности от координаты на выделенном фрагменте снимка с интерференционным фильтром

Теоретическая основа исследования

На поверхности интерференционного фильтра имеется многослойное покрытие, чаще всего способом напыления. Каждый такой слой представляет из себя тонкую плоскопараллельную пластинку. Геометрия оптических лучей представлена на рис. 5. При падении на пленку часть света отражается от верхней границы, а часть, после преломления от нижней, в итоге получается две когерентных волны, которые, накладываясь друг на друга, интерферируют. Это явление часто наблюдается в жизни, например, на очках есть тонкий напыления, который легко обнаружить при изменении цвета лампочки. Или оксидные пленки на поверхности металлов. Так же и в нашем эксперименте при повороте фильтра можно наблюдать окрашивание источника света. [2, 4]

Условия усиления или ослабления волн определяются формулами на рис. 5. Видно, что разность хода зависит от толщины пластинки, угла падения или преломления, коэф. преломления и длины волны. В нашем эксперименте все параметры являются константами кроме угла падения



$$\Delta_{12} = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda_0}{2}$$

Рис. 5. Формула разности хода лучей при интерференции в тонких пленках

О том, какая часть света преломляется, а какая отражается говорят формулы Френеля (рис. 6). [1, 2] Согласно им, интенсивность света зависит от угла падения:

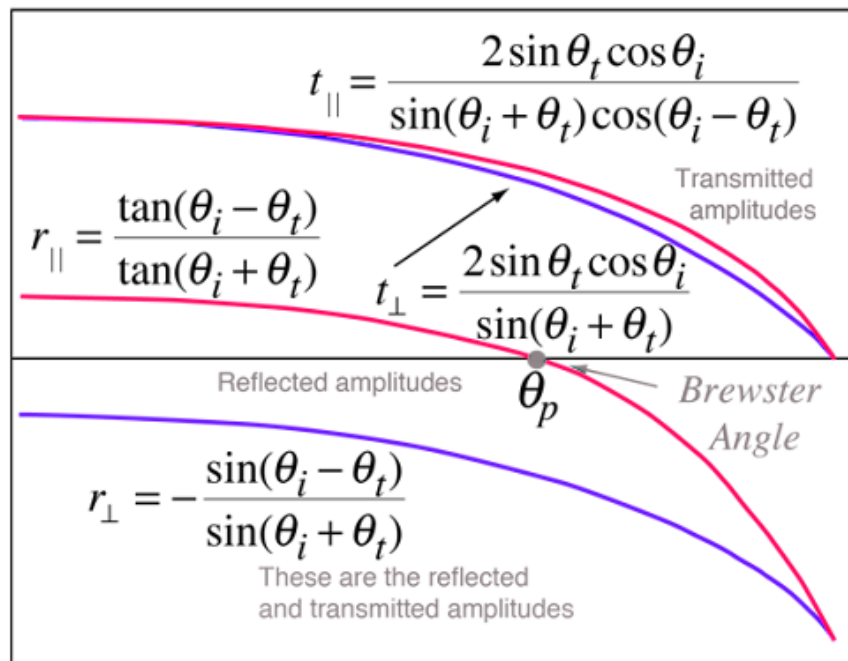


Рис. 6. Зависимость амплитудных коэффициентов отражения и прохождения света от угла падения согласно формулам Френеля

В плоскопараллельной пластине есть две границы раздела сред, поэтому еще одним важным фактором является толщина между ними, то есть толщина пластины.

Экспериментальная часть

Оборудование: интерференционный фильтр, штатив, лапки x2, лазерная указка (663 нм), камера (объектив Fujinon 35 f 1.4), лист бумаги A4. Контролируемыми оставались освещение, температура в комнате, выдержка камеры, положение лазера (перпендикулярно фильтру при наклоне 0 градусов)

В ходе эксперимента лазер статично установлен над фильтром вертикально, а положение фильтра меняется так, чтобы изменять угол падения. Изображения на листе фиксировались на камеру, параметры которой были

контролируемыми. На лапках, на которых был фильтр, был установлен телефон, который измерял угол падения, с помощью приложения rhyrhox. [6] Выдержка на камере была понижена, чтобы изображение было яркой точкой на черном фоне и был виден контраст.

Результаты и обсуждение

Было собрано два набора данных. В первом случае график оказался симметричным относительно высшей точки, что подтверждает теорию: чем больше угол падения, тем меньше лучей проходит, однако, вершина оказалась смещенной относительно нуля (см. рис. 7).

В рамках второго эксперимента вершина оказалась намного ближе к нулю, что говорит о более точной юстировке, при этом график все еще симметричен (см. рис. 8).

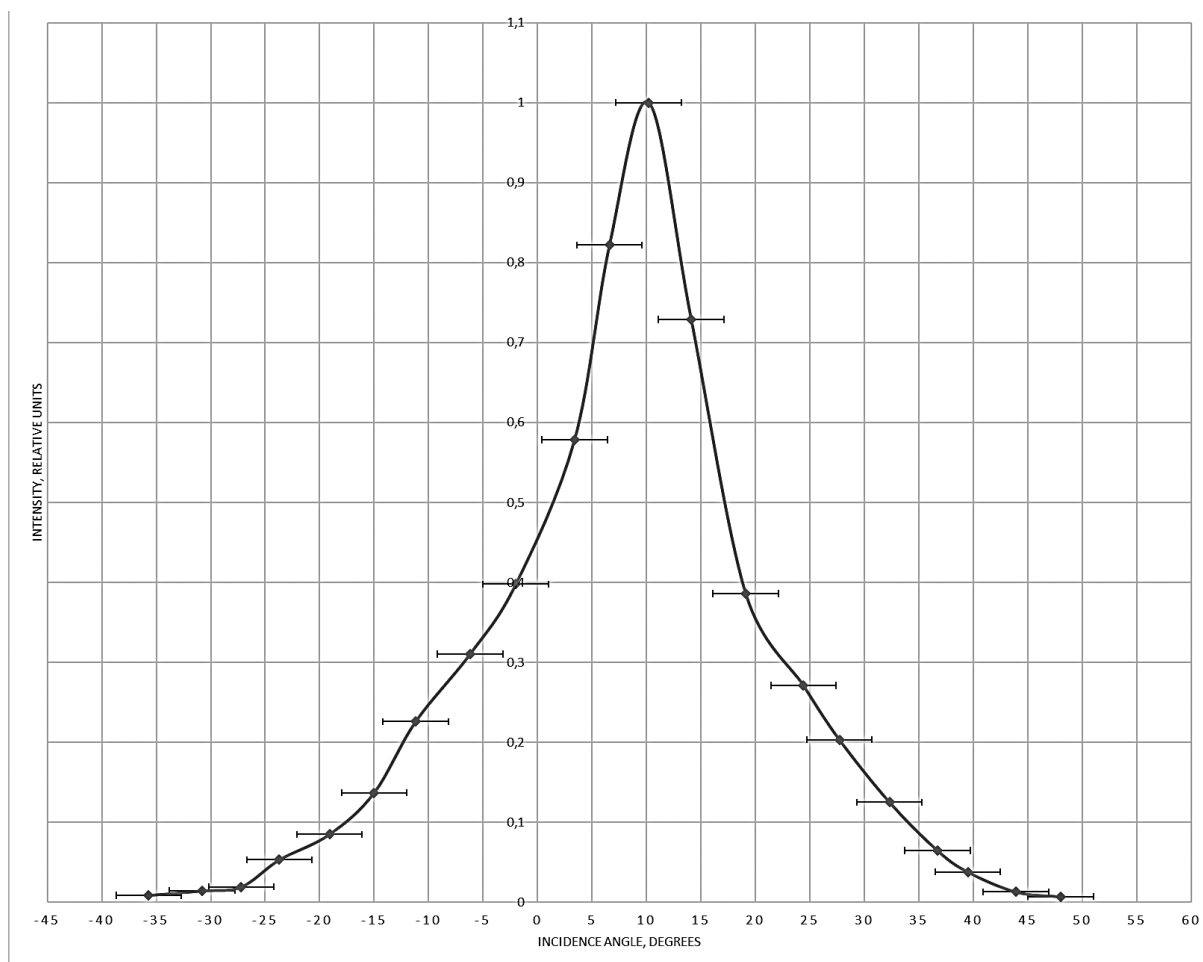


Рис. 7. График зависимости коэффициента пропускания излучения через интерференционный фильтр от угла падения света

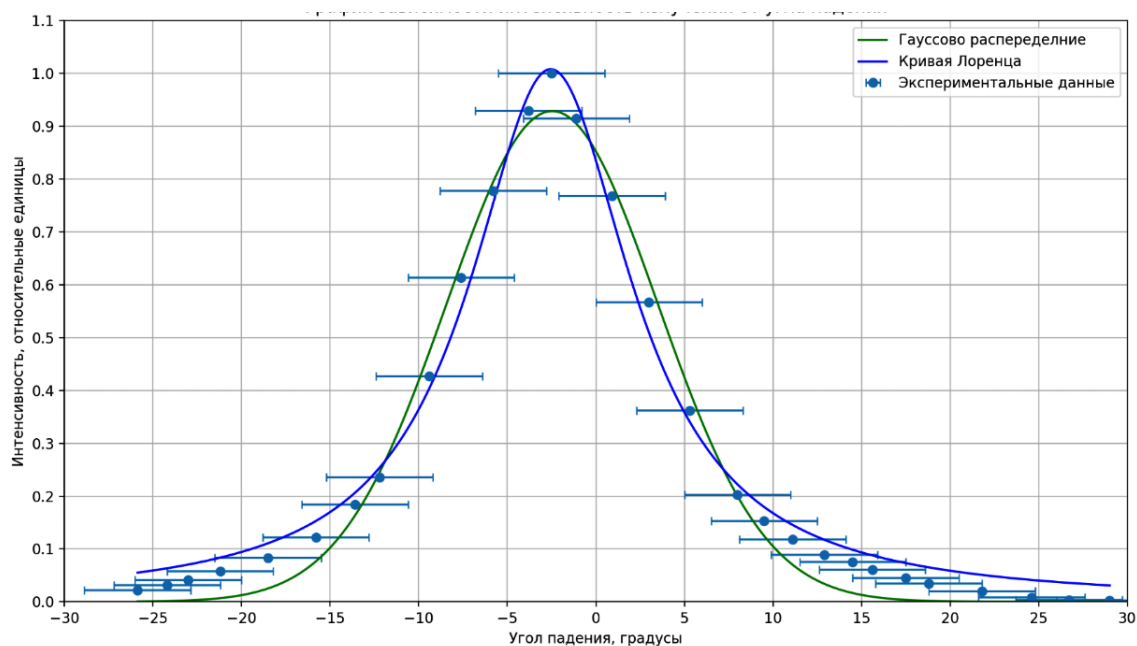


Рис. 8. График зависимости интенсивности излучения от угла падения

Выводы

Из полученных данных были определены пределы углов, при которых интерференционный фильтр может применяться. Если считать углы, соответствующие про-

хождению как минимум 50% интенсивности, за пороговые, получим, что в этот диапазон попадает 12 градусов: от -8 до +4. [3, 4]

ЛИТЕРАТУРА:

1. Eugene, Hecht Optics Global Edition / Hecht Eugene. — 5 ed. — Adelphi University: Pearson, 2017. — 123 с. — Текст: непосредственный. URL: http://lib.ysu.am/open_books/413824.pdf
2. Pedrotti, F.L. Introduction to Optics / F.L. Pedrotti, L.M. Pedrotti, L.S. Pedrotti. — 3 ed. —: Cambridge University Press. — 175 с. — Текст: непосредственный. URL: <https://faculty.kashanu.ac.ir/file/download/page/66e88eb59454c-pedrotti-introduction-to-optics-3rd.pdf> (дата обращения: 25.06.2026).
3. H, Angus Macleod Thin-Film Optical Filters / Angus Macleod H. — Fourth Edition. — Tucson, Arizona, USA: Thin Film Center Inc., 2010. — 6 с. — Текст: непосредственный. URL: [https://kashanu.ac.ir/Files/Content/%5BH__Angus_Macleod%5D_Thin-Film_Optical_Filters,_Four\(BookFi_org\).pdf](https://kashanu.ac.ir/Files/Content/%5BH__Angus_Macleod%5D_Thin-Film_Optical_Filters,_Four(BookFi_org).pdf) (дата обращения: 25.06.2026).
4. Daniel, Obeid The Importance of Optical Filter Orientation, Angle of Incidence, and Cone Half Angle / Obeid Daniel. — Текст: электронный // Edmund Optics: [сайт]. — URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/optical-filter-orientation/?srsltid=AfmBOopNjN7bB8-EypT4PO-YExu0UfMeuhDy-Z9ir5ZoeaaNQIJeNS9I#What-Direction-Should-My-Filter-Face> (дата обращения: 25.06.2026).
5. W, A Joye and E Mandel New Features of SAOImage DS9 / A Joye and E Mandel W. — Текст: непосредственный // Astronomical Data Analysis Software and Systems XII ASP, Conference Series, Vol. 295. — 2003. — С. 489–492. URL: <https://adsabs.harvard.edu/pdf/2003ASPC..295..489J>
6. Phyphox. — Текст: электронный // phyphox — Physical Phone Experiments: [сайт]. — URL: <https://phyphox.org> (дата обращения: 25.06.2026).
7. SAOImageDS9. — Текст: электронный — URL: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9> (дата обращения: 25.06.2026).

Зависимость максимального напряжения от скорости растяжения для хлопка, резины и нейлона

Петросян Ника Александровна, учащаяся 10-го класса

Научный руководитель: Кречетов Артем Павлович, учитель физики

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В данной работе экспериментально исследуется влияние скорости растяжения на предельное напряжение при растяжении трех распространенных материалов: хлопчатобумажной нити, нейлоновой нити и резины. Образцы растягивались в заданных условиях нагружения с использованием системы шкива, приводимого в движение электродвигателем. Значение предельного напряжения в момент разрыва фиксировалось при шести различных скоростях растяжения.

Результаты показали, что предельное напряжение возрастает с увеличением скорости растяжения для всех исследованных материалов, однако степень зависимости зависит от вязкоупругих свойств материала.

1.1. Актуальность исследования

Напряжение при растяжении, определяемое как сила, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения образца, используется для характеристики механической прочности материалов [1, 2]. Для идеальных упругих тел предельное напряжение при растяжении перед разрывом часто рассматривается как постоянная характеристика материала [1]. Во многих базовых экспериментах предполагается квазистатическое нагружение, а влияние скорости деформации не учитывается [4]. Однако для полимеров и других вязкоупругих материалов механическая прочность зависит от скорости деформации [3, 5].

Вязкоупругие материалы сочетают в себе упругое, то есть мгновенное, и вязкое, то есть зависящее от времени, деформирование [3]. При более высоких скоростях деформации у полимерных цепей меньше времени для выпрямления или скольжения относительно друг друга. Таким образом, механизмы рассеяния энергии становятся

менее выраженными, а кажущаяся жесткость и прочность материала возрастают [3, 6].

1.2. Исследовательский вопрос

Как зависит предельное напряжение при растяжении нити от скорости ее растяжения?

1.3. Гипотеза

Предполагается, что предельное напряжение при растяжении зависит от скорости растяжения нелинейно из-за вязкоупругих свойств материала. При более высоких скоростях деформации нить может демонстрировать большую кажущуюся прочность, поскольку молекулярные перестройки не успевают полностью произойти до момента разрыва

3. Экспериментальная установка

Нить фиксировалась горизонтально с помощью G-образной струбины. Один конец нити оставался неподвижным, а другой был соединен с системой шкива, приводимого в движение электродвигателем.

При изменении напряжения, подаваемого от источника питания, изменялась угловая скорость вращения двигателя. Это, в свою очередь, позволяло регулировать скорость растяжения нити. Скорость растяжения определялась по измеренному удлинению нити и времени растяжения.

Образец растягивался до разрыва. После этого предельное напряжение при растяжении рассчитывалось по максимальной приложенной силе и площади поперечного сечения образца.

4. Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты (см. рис. 1) показывают выраженную зависимость предельного напряжения при растяжении от скорости растяжения. Однако степень этой зависимости существенно различается для разных материалов. Это связано с особенностями их молекулярной структуры и вязкоупругих свойств, которые определяют характер деформации образцов [3, 5].

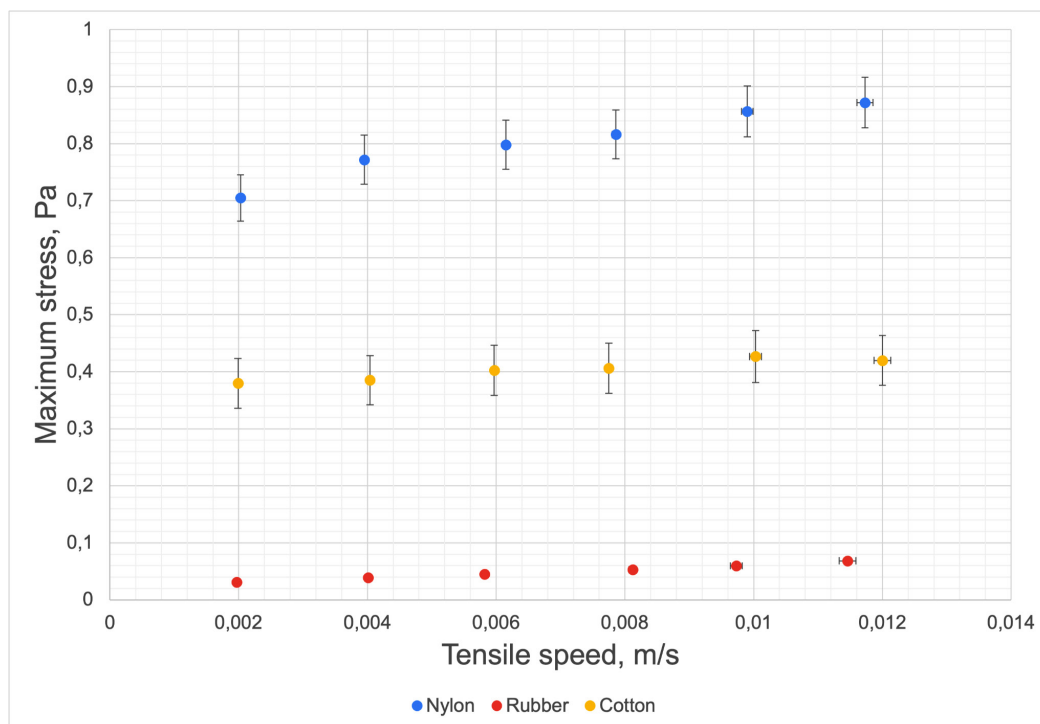


Рис. 1. График зависимости максимального напряжения от скорости растяжения для хлопка, резины и нейлона

Для хлопчатобумажной нити предельное напряжение при растяжении увеличилось лишь приблизительно с 0,38 МПа до 0,42 МПа во всем исследованном диапазоне скоростей. Это указывает на то, что данный материал демонстрирует слабую зависимость от скорости деформации. Такая минимальная скоростная зависимость согласуется с тем, что хлопок в основном состоит из кристаллической целлюлозы (см. рис. 2), механические свойства которой определяются водородными связями и упорядоченным расположением волокон.

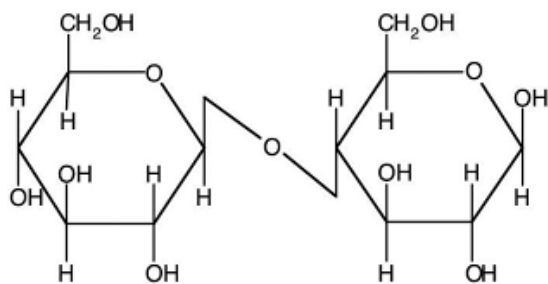


Рис. 2. Структура хлопка

В таких материалах молекулярная подвижность ограничена, поэтому нить не может существенно перераспре-

делять напряжение за счет скольжения молекулярных цепей даже при низких скоростях деформации. Следовательно, кажущаяся прочность хлопчатобумажной нити остается почти постоянной независимо от скорости растяжения [2].

В отличие от хлопчатобумажной нити, нейлон показал умеренное увеличение предельного напряжения при растяжении: примерно с 0,70 МПа при наименьшей скорости до 0,87 МПа при наибольшей скорости. Нейлон является полукристаллическим полимером (см. рис. 3): в его структуре присутствуют как кристаллические области, обеспечивающие упругую жесткость, так и аморфные области, допускающие подвижность молекулярных цепей [3, 5].

При низких скоростях растяжения аморфные области могут частично релаксировать, что позволяет молекулярным цепям переориентироваться и рассеивать энергию до момента разрыва [3]. При увеличении скорости растяжения времени для таких молекулярных перестроек становится недостаточно, поэтому большее число полимерных цепей одновременно воспринимает нагрузку. Это приводит к кажущемуся увеличению предельного напряжения и отражает вязкоупругий характер поведения нейлона [3, 5].

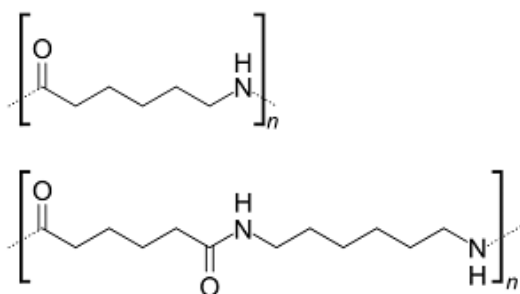


Рис. 3. Структура нейлона

Резина показала наиболее выраженную зависимость от скорости растяжения: предельное напряжение увеличилось с 0,031 МПа до 0,068 МПа, то есть более чем в два раза. Поведение резины связано с энтропийной природой ее упругости и выраженными вязкоупругими свойствами (см. рис. 4) [7]. При низких скоростях деформации полимерные цепи могут постепенно распрямляться и ориентироваться, рассеивая энергию. В результате напряжение в момент разрыва оказывается ниже.

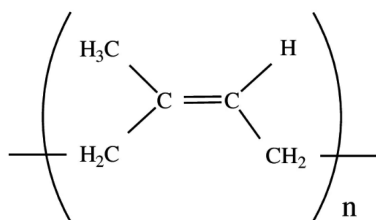


Рис. 4. Структура резины

При высоких скоростях деформации молекулярные цепи, напротив, фактически не успевают изменить свое положение: они не могут быстро ориентироваться или скользить относительно друг друга. Это приводит к большему сопротивлению деформации и заметному увеличению измеренного предельного напряжения [3, 7]. Такое поведение характерно для эластомеров, у кото-

рых упругий отклик сильно связан со скоростью деформации из-за зависящих от времени молекулярных движений [3, 7].

Наблюдаемый эффект можно объяснить сочетанием упругого и вязкого отклика, характерного для вязкоупругих материалов. Упругий отклик является практически мгновенным и обратимым, тогда как вязкий отклик зависит от времени и связан с рассеянием энергии. Поэтому напряжение в материале определяется не только величиной приложенной деформации, но и скоростью, с которой эта деформация происходит (см. рис. 5) [3]:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt},$$

Рис. 5. Модель Кельвина-Фойгта: E — модуль упругости; η — коэффициент вязкости; $d\varepsilon/dt$ — скорость деформации

Выводы

Полученные результаты подтверждают, что скорость растяжения существенно влияет на прочность вязкоупругих материалов.

Различия между материалами можно объяснить особенностями их молекулярной структуры и степенью молекулярной подвижности. В материалах с гибкими полимерными цепями, таких как резина, скорость деформации играет особенно важную роль. При медленном растяжении молекулярные цепи успевают частично перестраиваться, ориентироваться и рассеивать энергию. При быстром растяжении эти процессы не успевают происходить в полной мере, поэтому для разрушения материала требуется большее напряжение.

В целом результаты показывают, что даже материалы, механические свойства которых часто рассматриваются в квазистатических условиях, могут демонстрировать заметную зависимость от скорости нагружения [3, 5, 7].

ЛИТЕРАТУРА:

1. David, Roylance Introduction to elasticity / Roylance David. — Cambridge, MA 02139: Massachusetts Institute of Technology, January 21, 2000. — Текст: непосредственный. URL: <http://freeit.free.fr/Elasticity/David%20Roylance%20-%20Mechanics%20of%20Materials.pdf>
2. Callister Material Science and Engineering: An introduction / Callister, D. William, David G Rethwisch and. — 10th Edition. — John Wiley & sons. — Текст: непосредственный. URL: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwisch%20(z-lib.org).pdf)
3. John, D.F. VISCOELASTIC PROPERTIES OF POLYMERS / D.F. John. — 3rd edition. — John Wiley & sons, 1980. — Текст: непосредственный. URL: https://pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Ferry_John/Viscoelastic_Properties_of_Polymers_Ferry_3rd_Edn.pdf
4. Gere, James M., and Barry J. Goodno. Mechanics of Materials. 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2018. URL: <https://studylib.net/doc/25949353/goodno—b.j.-and-gere—j.m.—mechanics-of-materials-9th-...>
5. Robert, M.J. Mechanics of Composite Materials / M.J. Robert. — 2nd edition. — Blacksburg, Virginia: John Wiley & Sons, 1998. — Текст: непосредственный. URL: <https://soaneemrana.com/onewebmedia/Mechanics%20of%20Composite%20Materials%202nd%20Ed%201999%20BY%20%5BTaylor%20&%20Francis%5D.pdf>
6. William, Nash Strength of Materials / Nash William, D • Merle C Potter Ph, D. Ph. — 5th edition. — McGraw-Hill, 1980. — Текст: непосредственный. URL: [https://uotechnology.edu.iq/dep/bme/english/Pages/Lectures/resestance/Schaum_s%20Outline%20of%20Strength%20of%20Materials,%20Fifth%20Edition%20\(Schaum_s%20Outline%20Series\)%20\(William%20Nash,.pdf](https://uotechnology.edu.iq/dep/bme/english/Pages/Lectures/resestance/Schaum_s%20Outline%20of%20Strength%20of%20Materials,%20Fifth%20Edition%20(Schaum_s%20Outline%20Series)%20(William%20Nash,.pdf)

7. L, R G Treloar The Physics of Rubber Elasticity / R G Treloar L. — 3rd edition. —: Oxford Classic Texts, 20 October 1975. — Текст: непосредственный. URL: https://books.google.ru/books/about/The_Physics_of_Rubber_Elasticity.html?id=EfCZXXKQ50wC&redir_esc=y
8. Ward, I. M. Mechanical Properties of Solid Polymers / I. M. Ward, J. Sweeney. — 3rd edition. — Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013. — Текст: непосредственный. URL: <https://bronze.ir/wp-content/uploads/2023/09/Mechanical-Properties-of-Solid-Polymers-Ward.pdf>

Влияние противогололедных средств на экологическое сообщество городской среды

Сафронов Платон Андреевич, учащийся 9-го класса

Научный руководитель: Лазарева Евгения Михайловна, учитель биологии

ОАНО «Школа «Лето́во» (г. Москва)

В статье рассматривается влияние противогололедных материалов на компоненты городской экосистемы. Проведена оценка фитотоксичности различных противогололедных реагентов методом биотестирования с использованием кресс-салата. Установлено, что реагенты, содержащие хлориды, оказывают выраженное отрицательное воздействие на всхожесть семян и развитие растений.

Ключевые слова: противогололедные материалы, противогололедные реагенты, фитотоксичность, биотестирование, кресс-салат.

Введение

В зимний период противогололедные реагенты (ПГР) широко применяются для обеспечения безопасности дорожного движения и снижения травматизма населения. Однако их использование сопровождается поступлением химических веществ в почву и поверхностные воды, что оказывает негативное влияние на компоненты городской экосистемы [6]. Воздействие противогололедных материалов может приводить к ухудшению состояния растительности, изменению физико-химических свойств почвы и нарушению жизнедеятельности почвенных микроорганизмов [1].

Одним из основных антропогенных факторов, оказывающих отрицательное влияние на городскую среду, является накопление солей в почве. В результате длительного применения реагентов происходит изменение химического состава и структуры почв, что может приводить к угнетению роста и развития растений и, в отдельных случаях, к их гибели [11].

В настоящее время на рынке представлены многочисленные противогололедные материалы различного химического состава, широко применяемые на улицах крупных городов. В связи с этим оценка их экологической безопасности представляет собой важную природоохранную задачу. Результаты исследований показывают, что различные классы противогололедных реагентов обладают неодинаковой степенью токсичности, поэтому поиск наиболее экологически безопасных материалов является актуальным направлением исследований [5].

Цель исследования — смоделировать и оценить влияние трёх противогололедных материалов, используемых на территории г. Москвы, на фитотоксичность почвы методом биотестирования с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.).

Задачи исследования:

1. Отобрать три противогололедных материала, применяемых для борьбы с гололёдом, и определить их качественный состав.
2. Оценить всхожесть семян кресс-салата в почве, обработанной тремя видами противогололедных материалов, на 1-е и 3-и сутки эксперимента при концентрациях 3,75 г на 300 г почвы и 7,5 г на 300 г почвы.
3. Определить материал, обладающий наименьшей фитотоксичностью, и оценить возможность его применения на территории школы.

Гипотеза исследования: противогололедные реагенты оказывают негативное воздействие на экологические сообщества городской среды.

Материалы и методы исследования

Пробоотбор и характеристика объектов исследования
Для исследования были отобраны три противогололедных материала: реагент, применяемый на территории школы (бишофит), реагент, используемый вблизи детского сада, а также материал, отобранный на улицах центральной части г. Москвы. Исследуемые образцы различались по составу, который был определен с помощью качественного химического анализа (см. Таблица 1).

Таблица 1. Состав реагентов

Реагент	Состав
Гранитная крошка	Гранит
Реагент с улиц г. Москвы	NaCl, нерастворимые частицы
Бишофит	MgCl ² (90–96%) + NaCl

Методы исследования

В работе были использованы два метода исследования: качественный химический анализ и биотестиро-

вание с использованием кресс-салата в качестве тест-объекта.

Качественный химический анализ

На первом этапе был исследован цвет пламени, окрашиваемого исследуемым веществом. Наблюдалось желтое окрашивание пламени, что свидетельствует о присутствии ионов натрия. Далее был проведен анализ на катионы.

После добавления карбоната аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) образование осадка не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии в растворе ионов кальция, свинца и железа. После добавления гидроксида натрия осадок также не образовался, что указывает на отсутствие ионов магния, алюминия и ряда других металлов. Затем был проведен анализ на анионы.

После добавления нитрата бария видимых изменений не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии сульфат-, сульфит-, фосфат- и карбонат-ионов. После добавления нитрата серебра образовался белый творожистый осадок, что указывает на присутствие хлорид-ионов.

На основании результатов качественного химического анализа и литературных данных о составе наиболее распространенных противогололедных материалов можно предположить, что реагент, отобранный на улицах центральной части г. Москвы, представляет собой хлорид натрия с нерастворимыми минеральными включениями.

Биотестирование

Подготовка образцов

Для проведения эксперимента было подготовлено семь одинаковых контейнеров, в которые впоследствии был высажен кресс-салат (рис. 1). Один контейнер использовался в качестве контроля (без внесения реагентов), а для каждого исследуемого материала были подготовлены по два варианта опыта: с концентрацией 3,75 г реагента на 300 г почвы и 7,5 г реагента на 300 г почвы.



Рис. 1. Схема эксперимента с добавлением трёх противогололедных материалов в концентрации 3,75 г на 300 г почвы и контрольного варианта

После внесения реагентов каждый контейнер был полит одинаковым количеством воды. Затем образцы вы-

держивали в течение суток, чтобы компоненты противогололедных материалов могли раствориться и оказать воздействие на почву.

В каждую емкость было высажено по 50 семян кресс-салата. В дальнейшем оценивались всхожесть семян и характер развития проростков.

Проведение эксперимента

Все контейнеры находились в одинаковых условиях. В течение первых трех суток происходило прорастание семян. На протяжении последующих трех суток проводился ежедневный учет проростков с целью выявления зависимости всхожести растений от типа и концентрации противогололедного материала.

Обработка данных

После завершения эксперимента было подсчитано количество проросших семян и рассчитана их всхожесть. На основании полученных результатов в программе «Яндекс Таблицы» была составлена таблица зависимости всхожести семян от времени для трех исследуемых материалов при двух концентрациях, а также для контрольного варианта.

На основе полученных данных были построены графики зависимости всхожести семян от времени для каждой концентрации реагентов. Для наглядного сравнения были добавлены линии тренда, позволяющие оценить влияние различных противогололедных материалов на развитие растений.

Результаты и обсуждение

По результатам качественного химического анализа было установлено наличие хлорид-ионов в составе реагента, отобранного на улицах центральной части Москвы. На основании полученных данных и литературных сведений можно предположить, что основным компонентом данного реагента является хлорид натрия с нерастворимыми минеральными включениями.

Результаты биотестирования представлены в таблице 2 и на рисунках 2 и 3. Анализ полученных данных показал, что всхожесть семян кресс-салата существенно зависела от типа и концентрации противогололедного материала.

Таблица 2. Зависимость всхожести семян от времени

Всхожесть	день 1	день 2	день 3
Контроль	34	54	54
реагент с улиц центра Москвы, конц — 3,75г/300г	12	18	20
реагент «гранитная крошка», конц — 3,75г/300г	22	50	60
«бишофит», конц — 3,75г/300г	8	14	14
реагент с улиц центра Москвы, конц — 7,5г/300г	0	14	18
реагент «гранитная крошка», конц — 7,5г/300г	54	74	78
«бишофит», конц — 7,5г/300г	0	0	0

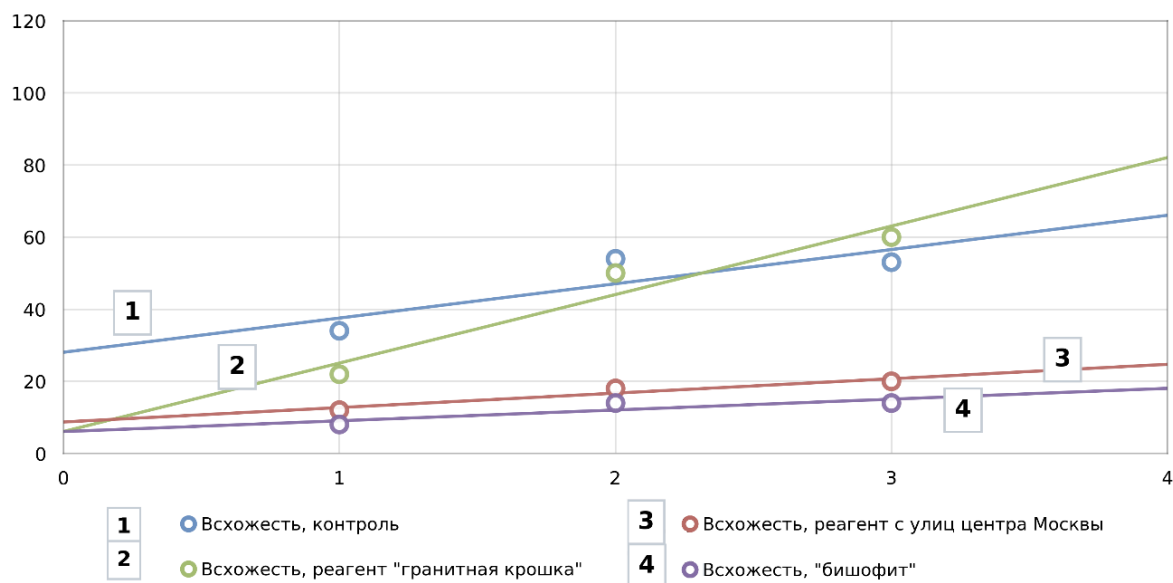


Рис. 2. Всхожесть семян в % при концентрации реагентов 1.25 г/100 г почвы

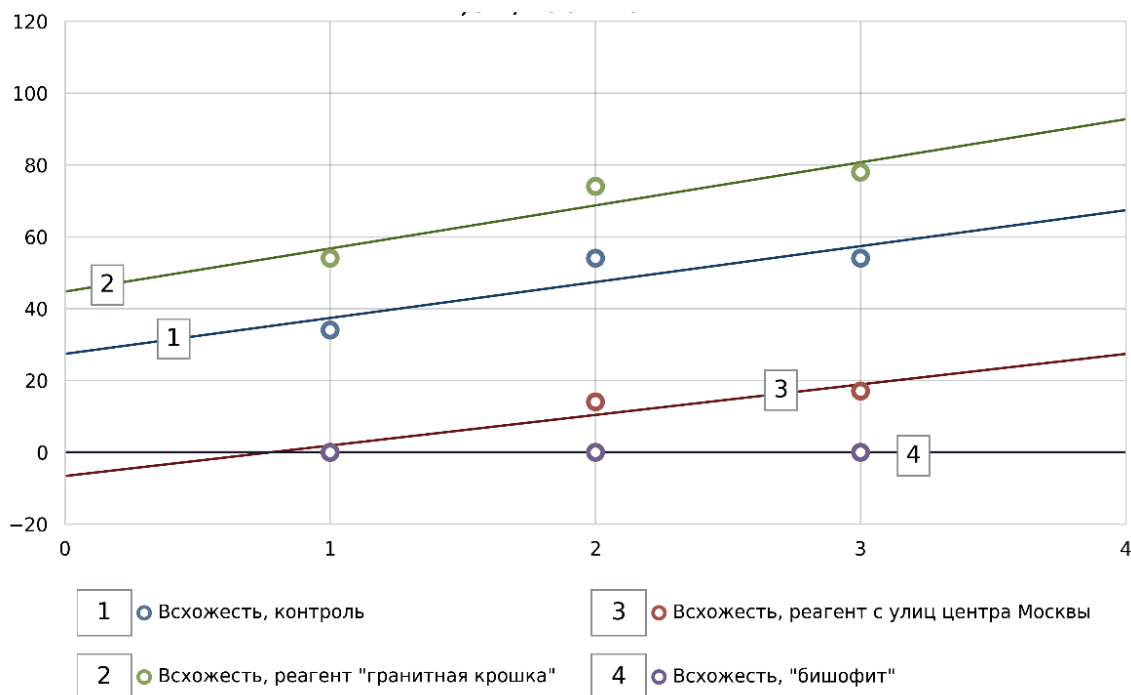


Рис. 3. Всхожесть семян в % при концентрации реагентов 2.5 г/100 г почвы

Наиболее высокой фитотоксичностью характеризовался бишофит. При концентрации 3,75 г на 300 г почвы всхожесть семян к третьим суткам составила 14%, а при концентрации 7,5 г на 300 г почвы прорастания семян не наблюдалось.

Реагент, отобранный на улицах центральной части Москвы, также оказывал выраженное ингибирующее действие на прорастание семян. При увеличении концентрации реагента наблюдалось снижение всхожести кресс-салата по сравнению с контрольным вариантом.

Наиболее благоприятные результаты были получены при использовании гранитной крошки. К третьим суткам всхожесть семян достигала 60% при концентрации 3,75 г на 300 г почвы и 78% при концентрации 7,5 г на 300 г поч-

вы, что превышало показатели контрольного варианта. Вероятно, это связано с улучшением физических свойств почвы и повышением ее аэрации.

Таким образом, результаты исследования показали, что солесодержащие противогололедные материалы обладают выраженным фитотоксическим действием, тогда как гранитная крошка не оказывает отрицательного влияния на развитие растений и может рассматриваться как более экологически безопасный материал.

Выводы

1. Проведенный качественный химический анализ и сведения о составе используемых материалов позволили охарактеризовать исследуемые противогололедные средства. Установлено, что реагент, отобранный на улицах

центральной части Москвы, содержит хлорид натрия и нерастворимые минеральные включения. Школьный реагент (бишофит) состоит преимущественно из хлорида магния (90–96%) с примесью хлорида натрия и других хлоридов. Гранитная крошка представляет собой минеральный материал природного происхождения.

2. Оценка всхожести кресс-салата показала, что противогололедные материалы, содержащие соли, обладают выраженной фитотоксичностью. Их применение может приводить к ухудшению состояния растительности

и нарушению функционирования компонентов городской экосистемы.

3. Наибольшая фитотоксичность была выявлена у бишофита. Реагент, отобранный на улицах центральной части Москвы, также оказывал отрицательное влияние на всхожесть семян. Наиболее высокие показатели всхожести были получены при использовании гранитной крошки, что позволяет рассматривать ее как наиболее экологически безопасный противогололедный материал среди исследованных образцов

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сатторов Ф.Қ. Ёғли, Эркабаев Ф.И. Негативные воздействия антиобледенителя на основе хлорида натрия на зелёные насаждения вдоль дорог // *Universum: технические науки*. 2025. № 2 (131). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/negativnye-vozdeystviya-antiobledenitelya-na-osnove-hlorida-natriya-na-zelyonye-nasazhdeniya-vdol-dorog> (дата обращения: 12.12.2025).
2. Николаева О. В., Полянцева А. С., Чистова О. А. Оценка чувствительности газонных трав к солевому загрязнению почвогрунтов г. Москвы методом лабораторного фитотестирования // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2025. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-chuvstvitelnosti-gazonnyh-trav-k-solevomu-zagryazneniyu-pochvogruntov-g-moskvy-metodom-laboratornogo-fitotestirovaniya> (дата обращения: 12.12.2025).
3. Ашихмина Т. Я. Зубкина Н. Б. Школьный экологический мониторинг: учебн. — методическое пособие / под ред. Т. Я. Ашихминой — М: Издательство «Арго», 2000—231 с.
4. ГОСТ 17.4.3.01–83 Почвы. Общие требования к отбору проб
5. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
6. Андреев Ю. М «Овощеводство: учебник для нач. проф. образования». — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 256 с.
7. Добровольский Г. В. Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы: функционально-экологический подход / Г. В. Добровольский, Е. Д. Никитин. — М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. — 185 с.
8. Заболотских В. В., Васильев А. В., Танких С. Н. Экспресс-диагностика токсичности почв, загрязненных нефтепродуктами // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т. 14, № 1 (3), 2012. — С. 734–738.
9. Зейферт Д. В. Использование кресс-салата как тест-объекта при оценке токсичности природных и сточных вод Стерлитамакского промузла // *Башкирский экологический вестник*, 2010. № 2, — с. 39–50.
10. Илюшкина Л. Н. Биологическая активность почв урболандшафтов г. Ростова-на-Дону и г. Азова: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Ростов-на-Дону: КМЦ «Копицентр», 2004. — 24 с.
11. Неверова О. А. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды: анализ. Обзор. Новосибирск: Изд-во: ПНТБ СО РАН, 2006. — 88 с.
12. Прикладная экобиотехнология: учебное пособие: в 2 т. / А. Е. Кузнецов — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 485 с.
13. Экологическое почвоведение: Лабораторные занятия для студентов-экологов (бакалавров): Метод. Указания. — Ярославль: Яросл. гос. ун-т, 2002. — 35 с.

Флуоресценция листьев крапивы двудомной как индикатор адаптации к условиям освещённости

Токарева Ия Никитична, учащаяся 9-го класса

Научный руководитель: Королёв Владимир Викторович, учитель химии

ОАНО «Школа «Лето́во» (г. Москва)

Листья крапивы двудомной (*Urtica dioica*) при освещении ультрафиолетом демонстрируют ярко-красную флуоресценцию, характер которой зависит от освещённости местообитания растения. Связь флуоресценции с пигментным составом экстракта растения анализировалась с помощью фотографии, спектрофотометрии и хроматографии. Также изучалась адаптация растения к изменениям освещённости в местах произрастания крапивы. Найдено, что различия во флуоресценции обусловлены регуляцией пигментного состава листа: растения на свету уменьшают содержание хлорофилла и вырабатывают больше УФ-экранирующих антоцианов, тогда как растения, находящиеся в тени, максимизируют улавливание света за счет большего количества хлорофилла и каротиноидов. Такая адаптивность оптимизирует фотосинтез в разных световых условиях.

Ключевые слова: *Urtica dioica*, флуоресценция хлорофилла, ультрафиолетовая защита, антоцианы, адаптация растений

Фотосинтез приводит в движение углеродный цикл на Земле, поддерживая баланс в атмосфере производством кислорода, необходимого для жизни. Он превращает солнечную энергию в органические вещества, питая почти все экосистемы. [1, 2, 3]

Фотосинтез в листьях происходит в пигментах — хлорофиллах и каротиноидах. Хлорофиллы вида **a** и **b** — это пигменты, поглощающие красный и синий участки спектра. Они запускают фотосинтез и являются антеннами для поглощения света. Их функционирование поддерживается каротиноидами. Растение адаптирует сочетания пигментов к спектру освещающего света. [4,5] Ультрафиолетовый свет поглощается и затем рассеивается хлорофиллом в красной зоне спектра (650–800 нм). [7] Хлорофилл **a**, хлорофилл **b** и шесть видов каротиноидов содержатся в специальных клетках хлоропластах.

Чтобы избежать фотохимических разрушений в листе, в нем синтезируются флавоноиды, поглощающие ультрафиолетовое излучение и активируются антиоксиданты уменьшающие риск повреждения УФ излучением ДНК и белков. Подстраивание концентрации пигментов и защитных метаболитов ограждает фотосинтез от разрушения интенсивным солнечным светом. [8, 9, 10]

Переходим к описываемому исследованию

В посёлке Нижний Архыз нами было замечено, что интенсивность флуоресценции листьев крапивы семейства *Urtica dioica* зависит от интенсивности освещения ультрафиолетовой частью спектра солнечного света. За красную флуоресценцию растений в ультрафиолетовой (УФ) области спектра отвечает хлорофилл, и его содержание в растениях может меняться в зависимости от условий фотосинтеза. Однако в растениях, произрастающих в освещённых местах, флуоресценция почти не наблюдается. У нас возникла гипотеза о том, что в верхней части листа присутствуют вещества, не дающие ультрафиолету проникнуть вглубь листа к хлорофиллу. Проверить это предположение, а также определить, какие именно вещества не пропускают ультрафиолет, стало целью нашего исследования. В процессе была поставлена ещё одна задача — выяснить, как крапива адаптируется к резким изменениям условий освещённости.

Для достижения этих целей выполнялись следующие задачи:

- 1) Изучить флуоресценцию хлорофилла листьев Крапивы двудомной (*Urtica dioica*), растущей в нижнем ярусе грабово-букового леса и сравнение с флуоресценцией хлорофилла листьев этого же вида, растущего на освещённой обочине проезжей части рядом с суходольным лугом.
- 2) Провести хроматографическое разделение пигментов листьев Крапивы двудомной (*Urtica dioica*) растущей в нижнем ярусе грабово-букового леса и на освещённой обочине проезжей части рядом с суходольным лугом.
- 3) Измерить оптическую плотность и флуоресценции пигментов, экстрагированных из листьев Крапивы двудомной (*Urtica dioica*), взятой из двух исследованных биотопов с помощью спектрофотометра. Изучить различие в показателях.
- 4) Поменять два изученных растения из разных биотопов местами и посмотреть на динамику изменения флуоресценции хлорофилла.
- 5) Определить среднюю освещённость мест роста крапив
- 6) Измерить параметры RGB (параметры цвета пикселей по показателям Red, Blue, Green) на фотографиях листьев из разных условий освещённости
- 7) Отделить флавоноиды и антоцианы от хлорофилла и получить их спектр

Методы и материалы

Экстракция хлорофилла

Для извлечения экстракта брались листья с 4–5 ярусов считая от верхушки. Листья из теневого биотопа собирались с крапивы из букового леса, листья из светлого биотопа с крапив растущих около кустов вдоль дороги. Для отбора полутеневых листьев измерялся показатель освещённости над растениями, он должен был быть равен 2–4 клух. Брались 5 листьев каждого типа, из каждого листа изготавливался фиксированный объём экстракта, далее исследовался его спектр поглощения.

Для анализа спектров поглощения (оптической плотности) хлорофилла и других пигментов, сначала изготов-

ливали экстракт из листьев крапивы. Навеску исследуемых листьев измельчали и перетирали, к ним добавляли фиксированное количество изопропилового спирта и смесь процеживалась. 10 миллилитров получившегося экстракта наливали в кварцевую кювету и проводили анализ на спектрофотометре Vernier Go direct spectrovis plus. У спектрофотометра есть разные режимы, в исследовании измерялась флуоресценция и поглощение (оптическая плотность). Чем выше была оптическая плотность, тем большее количество поглощающих пигментов в образце.

Определение антоцианов

Чтобы определить оптическую плотность антоцианов необходимо было сначала отделить их от хлорофилла таким образом: к 5 мл изопропилового экстракта хлорофилла добавляли 5 мл петролейного эфира, 2 мл чистого изопропанола и 0,5 мл дистиллированной воды. Смесь перемешивали и отстаивали до разделения на два слоя: петролейного эфира с хлорофиллом и водно-спиртовой смеси с антоцианами и другими полярными пигментами. После разделения исследовали спектр поглощения антоцианов спектрофотометрически.

Хроматография

Чтобы получить хроматограммы брались экстракты хлорофилла, их капали на фильтровальную бумагу, её помещали в мерный цилиндр на 100 мл с небольшим количеством уайт спирита на дне. Уайт спирт поднимался вверх по фильтровальной бумаге, осажая на ней пигменты из капли в порядке уменьшения их полярности. До того как уайт спирт поднялся до конца, бумажка доставалась и сушилась.

Анализ флуоресценции

Характер флуоресценции листьев крапивы определяли, освещая растения УФ-фонариком с длиной волны 365 нм (изготовитель Nichia). Для измерения освещённости использовался телефон с приложением PhyPhox.

Определение характера флуоресценции крапивы

Для определения цветовых параметров флуоресценции, нужные листья фотографировались при освещении УФ излучением в специальном защищенном от дневного света ящике. Фотографии обрабатывали в приложении Inkscare, которое показывало параметры RGB нужных областей. Далее «краснота» флуоресценции определялась по разности яркости канала красного и синего (R-B).

¹⁷ Контролировались спектр УФ облучения, его интенсивность, баланс белого фотокамеры.

Смена условий произрастания дикой крапивы

Чтобы поменять местами образцы крапивы из тенистого и из светового биотопа, два растения из разных условий освещённости выкапывались и менялись местами. Каждый вечер делались их фотографии под ультрафиолетом для фиксации изменений в их пигментном составе по флуоресценции.

Разделение биотопов

Для удобства интерпретации и точности результатов мы разделили биотопы на освещённые (нет видимых препятствий для прямых солнечных лучей), полутеневые и темные. Для надежной классификации мы измеряли освещённость биотопов в полдень.

Результаты

Листья крапивы двудомной демонстрируют различный характер флуоресценции в зависимости от биотопа их произрастания. Так, листья крапивы, растущие под прямым солнечным светом практически не светятся красным при освещении верхней плоскости листа. Нижняя часть листа при этом демонстрирует яркую флуоресценцию хлорофилла. Для листьев крапивы из теневых биотопов характерно яркое свечение обеих сторон листа.

1. Связь интенсивности флуоресценции с освещённостью окружающей среды

Измерения освещённости отражены в таблице 1.

Таблица 1. Соотнесение показателя красноты на фотографиях флуоресценции крапив из разных биотопов

Освещённость, klux	Показатель красноты R — B
50 klux (свет)	-10
2 klux (полутень)	-9.7
0,5 klux (тьма)	73

В листьях красным в ультрафиолете светится хлорофилл, соответственно, чем более красная флуоресценция, тем больше света принимается хлорофиллом в листе. Показатель R-B (показатель красного) значительно выше у листьев из теневых биотопов, чем из полутеневых и из светлых. Из этого следует, что ультрафиолет лучше попадает на хлорофилл в листьях из теневых биотопов.

2. Исследование пигментного состава экстрактов Оптическая плотность изопропилового экстракта

По итогам измерений было обнаружено различие в графиках оптической плотности экстрактов крапивы из тени, света и полутени:

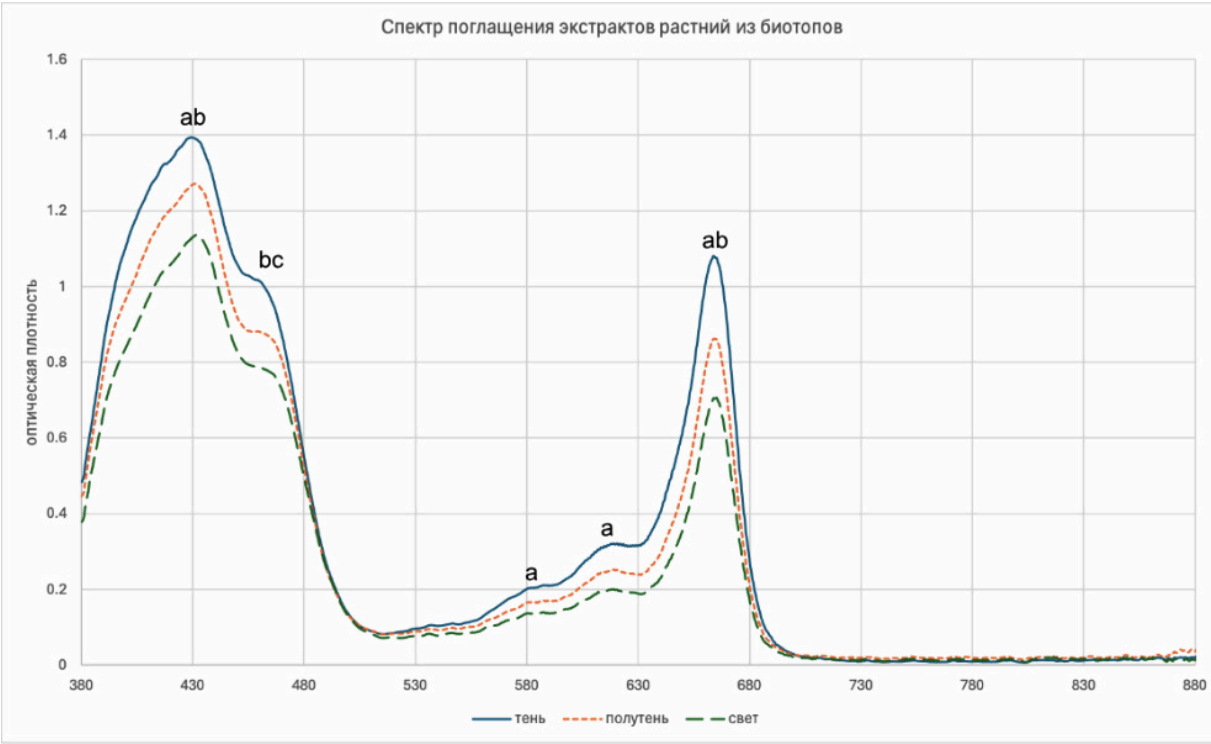


Рис. 1. График зависимости оптической плотности от длины волны

Для соотнесения пиков с пигментами, входящими в состав вытяжки мы воспользовались литературными данными. [11, 19]

Таблица 2. Таблица сравнения пиков поглощения различных пигментов

Пигмент	Полярность	Длина волны максимума поглощения, нм	Символ на графике	Ссылка
Хлорофилл а	Неполярный	430	a	Koli, Pooran, 2022
		580		
		619		
		660		
Хлорофилл б	Неполярный	455	b	Koli, Pooran, 2022
		646		
		598		
Каротиноиды	Неполярный	440–480	c	Peters, Reisha D., and Scott D. Noble., 2015
Флавоноиды	Полярный	290–320	d	Nunes, Alesandra R. et al., 2018
Антоцианы	Полярный	510–550, 240–260	e	Nunes, Alesandra R. et al., 2018

Таблица 3. Таблица значений пиков поглощения экстрактов листьев из разных условий освещённости

	Оптическая плотность на длине волны 430 нм	Оптическая плотность на длине волны 460 нм	Оптическая плотность на длине волны 620 нм	Оптическая плотность на длине волны 660 нм	A430/A460
Крапива из освещённого биотопа	1,155	0,798	0,196	0,735	1,45
Крапива из полутеневого биотопа	1,169	0,802	0,226	0,753	1,46
Крапива из теневого биотопа	1,199	0,856	0,226	0,820	1,4

Анализ спектров поглощения выявил количественные различия в пигментном составе экстрактов (см. график на рис. 1). У образцов крапивы из теневых биотопов оптическая плотность в диапазоне 620–680 нм (пики хлорофилла) оказалась выше. Согласно количественным данным (таблица 3), содержание хлорофилла в «теневых» ли-

стьях на 18% превышает таковое в листьях с освещенных участков. Это показывает, что увеличение концентрации пигмента в условиях недостатка света выступает одним из механизмов адаптации растения к условиям произрастания. [18]

Отношение оптической плотности экстрактов на длинах волн 430 и 460 нм характеризует количественную разницу между составами экстрактов. На длине волны 430 нм наблюдается пик хлорофилла типа **a**, а на длине волны 460 нм — пик хлорофилла типа **b**, кроме того в этом диапазоне наблюдается поглощение каротиноидов. Имеющиеся у нас данные не позволяют однозначно определить причину расхождения в составе экстрактов, однако следуя литературным данным [16] можно ожидать, что в экстракте крапивы, растущей в освещенных биотопах, будет боль-

шее количество каротиноидов, чем в теневых биотопах. При этом отношение A_{430}/A_{460} указывает на то, что веществ, поглощающих в области 460 нм для крапивы из теневых биотопов больше (таблица 3). Это может говорить о несколько большем количестве хлорофилла **b** в крапиве теневых биотопов.

Более надежные данные можно было бы получить деconvольцией спектров [15] с использованием эталонных спектров поглощения чистых хлорофиллов и каротиноидов, но их у нас не было.

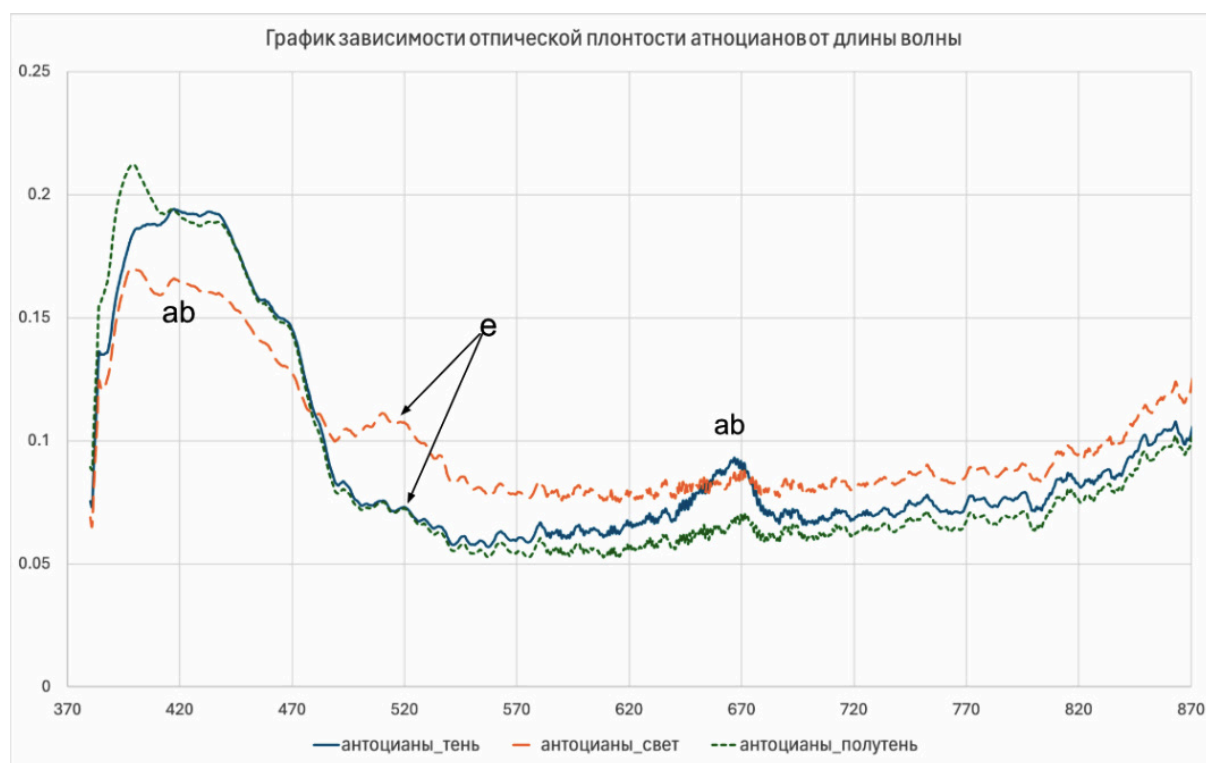


Рис. 2. График зависимости оптической плотности антоцианов от длины волны (различие показано стрелкой)

Анализировался водно-спиртовой раствор, содержащий полярные пигменты из листьев крапив. Для него был получен спектр поглощения. (график на рис. 2).

На этом спектре заметен выраженный пик около 520 нм у образца крапивы из освещённых биотопов. Этот пик обращает на себя внимание из-за того, что он значительно выше, чем у образцов из теневых условий. Поскольку объёмы всех исследуемых растворов были одинаковыми, более высокий пик означает большую концентрацию веществ, поглощающих свет на этой длине волны. Известно, что антоцианы имеют максимум поглощения как раз в области около 520 нм (таблица 2), поэтому наблюдаемое усиление пика, вероятно, связано с их повышенным содержанием. Полученные данные хорошо укладываются в роль антоцианов, которые выполняют фотопротекторную функцию, то есть частично поглощают избыточное

излучение и защищают ткани растения от повреждения светом и ультрафиолетом.¹⁴

Пиков, характерных для флавоноидов, на графике не наблюдается, что ожидаемо: они поглощают в более коротковолновой (ультрафиолетовой) области спектра (таблица 2) и потому не проявляются в данном диапазоне измерений.

Кроме того на графике (рис. 2) остается заметным пик от хлорофилла при 663 нм, что связано с неполным разделением пигментов при обработке петролейным эфиром. К сожалению, коротковолновая область (около 420 нм) плохо поддается интерпретации.

Также была проведена тонкослойная хроматография спиртовых экстрактов листьев из разных условий освещённости.

3. Пересадка крапивы



Рис. 3. Изменение флуоресценции растения пересаженного из света в тень

Таблица 4. Сравнение изменения параметров RGB на фотографиях крапив, пересаженных из света в тень

	R	B	R-B
День 1	89	136	-47
День 2	216	231	-15
День 4	252	176	76
День 5	226	205	87



Рис. 4. Изменение флуоресценции растения пересаженного из тени на свет

Таблица 5. Сравнение изменения параметров RGB на фотографиях крапив, пересаженных из тени на свет

	R	B	R-B
День 1	225	110	115
День 2	216	149	67
День 3	239	187	52
День 4	117	119	-2
День 5	57	104	-47

В течение четырёх дней после пересадки растения постепенно меняли характер флуоресценции. У пересаженных в тень растений увеличивается интенсивность красного свечения листьев (то есть флуоресценции хлорофилла) (таблица 4). Это может свидетельствовать об увеличении содержания хлорофилла в листьях, что позволяет растению эффективнее улавливать свет в условиях его недостатка.

У растений, пересаженных на солнце, наблюдается противоположная картина: интенсивность флуоресценции падает (таблица 5). Из этого можно предположить, что они адаптируются к избытку света, увеличивая содержание антоцианов и снижая содержание хлорофилла. Такие изменения направлены на защиту от избыточного ультрафиолетового излучения. Полученные результаты пока-

зывают, что концентрация пигментов не является жёстко фиксированной наследственной характеристикой, а может быстро изменяться, выступая в роли адаптационного механизма.

Выводы

По собранным данным можно сделать вывод, что крапива демонстрирует разную интенсивность флуоресценции в зависимости от освещённости места произрастания. Чем интенсивнее освещённость, тем слабее флуоресценция листьев и наоборот. Это связано с разным качественным и количественным пигментным составом листьев. Снижение интенсивности флуоресценции связано с пониженной концентрацией хлорофилла и повышенной концентрацией **антоцианов**, что подтверждается графиками оптической плотности.

Изменение концентрации пигментов является адаптационным механизмом, защищающим крапиву от интенсивного ультрафиолета в прямых солнечных лучах. Крапива довольно быстро реагирует на смену внешних условий.

Результаты наблюдения за пересаженными растениями крапивы показали, что они могут полностью поменять интенсивность флуоресценции за 4 дня благодаря адаптации к новым условиям.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Stirbet, A., Photosynthesis: basics, history and modelling, PMC, 2019.
2. Gondim, E., The Crucial Role of Photosynthesis in Sustaining Plant Life, Australian Herbal Insight, 2020.
3. Flügge, U. I., Recent advances in understanding photosynthesis, PMC, 2016.
4. Petibon, F. et al., Characterization of complex photosynthetic pigment derivatives, PMC, 2022.
5. Wiley Online Library, Internal and external factors affecting photosynthetic pigment contents.
6. Shoji, S., et al., Plant growth acceleration using a transparent Eu 3+, Scientific Reports, 2022, describing strong red luminescence in plants under UV irradiation due to chlorophyll fluorescence.
7. Shi, C. et al., How plants protect themselves from ultraviolet-B radiation, PMC, 2021.
8. Max Planck Institute, Sun protection for plants.
9. PMC, Ultraviolet Radiation From a Plant Perspective, 2020.
10. Wang, X., et al., Effect of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, photosynthetic performance, and flavonoid synthesis in corn, ScienceDirect, 2022.
11. Ashenafi, Eyosias L., Marianne C. Nyman, Jacob T. Shelley, and Neil S. Mattson. Spectral Properties and Stability of Selected Carotenoid and Chlorophyll Compounds in Different Solvent Systems. Food Chemistry Advances 2, 2023.
12. Koli, Pooran. Characterization, Stability, and Feasibility of Long-Term Use of Light-Absorbing Components of Aqueous Spinach Extract-Based Photogalvanic Electrolyte. Scientific Reports 12, no. 1, 2022.
13. Nunes, Alesandra R., Ícaro G. P. Vieira, Dinalva B. Queiroz, Antonio Linkoln Alves Borges Leal, Selene Maia Morais, Débora Feitosa Muniz, João Tavares Calixto-Junior, and Henrique Douglas Melo Coutinho. Use of Flavonoids and Cinnamates, the Main Photoprotectors with Natural Origin. Advances in Pharmacological Sciences 2018
14. Gould, Kevin S. Nature's Swiss Army Knife: The Diverse Protective Roles of Anthocyanins in Leaves. Journal of Biomedicine and Biotechnology 2004, no. 5 (December 1, 2004): 314–20. <https://doi.org/10.1155/s1110724304406147>.
15. Chazaux, Marie, Christo Schiphorst, Gioele Lazzari, and Stefano Caffarri. Precise Estimation of Chlorophyll A, B and Carotenoid Content by Deconvolution of the Absorption Spectrum and New Simultaneous Equations for Chl Determination. The Plant Journal, January 3, 2022. <https://doi.org/10.1111/tpj.15643>.
16. Маслова, Т. Г., Е. Ф. Марковская, and Н. Н. Слемнев. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор). Журнал общей биологии 81, no. 4 (2020): 297–310. <https://doi.org/10.31857/s0044459620040065>.
17. lco. global. Magnitude and Color, n. d. <https://lco.global/spacebook/distance/magnitude-and-color/>.
18. Ivanov, L. A., D. A. Ronzhina, P. K. Udina, N. V. Zolotareva, I. V. Ivanova, and L. A. Kalashnikova. Физиология растений. Т. 67, Номер 3, 2020. Sciencejournals.ru, 2020. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=fizrast&y=2020&v=67&n=3&a=FizRast2003011Ivanov#R5>
19. Peters, Reisha D., and Scott D. Noble. Spectrographic Measurement of Plant Pigments from 300 to 800nm. Remote Sensing of Environment 148 (May 25, 2014): 119–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.020>.
20. Dong, Wen, Xin Yang, Ning Zhang, Pei Chen, Jianghao Sun, James M. Harnly, and Mengliang Zhang. Study of UV-Vis Molar Absorptivity Variation and Quantitation of Anthocyanins Using Molar Relative Response Factor. Food Chemistry 444 (June 2024): 138653. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138653>.

Оценка эффективности самодельного фотобиореактора для культивирования микроводорослей рода *Micractinium*

Торбеева Кира Викторовна, учащаяся 9-го класса

Научный руководитель: Котин Павел Александрович, заведующий лабораторией

ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)

В настоящее время микроводоросли рассматриваются как перспективный объект экологической биотехнологии благодаря их способности быстро накапливать биомассу, поглощать углекислый газ и участвовать в очистке загрязненных вод. Для эффективного культивирования микроводорослей используются фотобиореакторы, позволяющие контролировать основные параметры среды. В данной работе проведена оценка эффективности само-

дельного фотобиореактора, разработанного из доступных материалов для использования в условиях школьной лаборатории.

Цель исследования заключалась в сравнительной оценке эффективности культивирования микроводорослей рода *Micractinium* в фотобиореакторе с активной аэрацией и перемешиванием и в пассивной контрольной системе. Для достижения поставленной цели была спроектирована и собрана лабораторная установка объемом 150 мл, проведена калибровка спектрофотометрического метода определения концентрации клеток и выполнен трехсуточный эксперимент по выращиванию культуры.

Результаты показали, что использование фотобиореактора обеспечивает более интенсивный рост микроводорослей по сравнению с контрольной емкостью. Максимальное значение оптической плотности в реакторе составило 52,5 условных единиц, тогда как в контроле — 42,71. Полученные данные подтверждают положительное влияние аэрации и перемешивания на продуктивность культуры.

Ключевые слова: микроводоросли, *Micractinium*, фотобиореактор, аэрация, культивирование, спектрофотометрия, экологическая биотехнология.

Введение

Одной из важнейших экологических проблем современности является ухудшение состояния водных экосистем вследствие антропогенного воздействия. Рост объемов сточных вод, загрязнение водоемов соединениями азота и фосфора, а также увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере требуют поиска новых экологически безопасных технологий, способных снизить нагрузку на окружающую среду.

Среди перспективных биологических объектов особое место занимают микроводоросли. Эти организмы являются одними из наиболее древних фотосинтезирующих форм жизни на Земле и играют ключевую роль в глобальных биогеохимических циклах [2, 3]. По оценкам исследователей, значительная часть кислорода атмосферы образуется именно благодаря деятельности микроводорослей и цианобактерий.

Помимо экологической роли, микроводоросли обладают высокой хозяйственной ценностью. Они используются для получения биотоплива, кормовых добавок, биологически активных веществ и пищевых компонентов. Кроме того, многие виды способны эффективно удалять из воды соединения азота, фосфора и тяжелые металлы, что делает их перспективными объектами для биологической очистки сточных вод [5].

Однако эффективность выращивания микроводорослей напрямую зависит от условий культивирования. В естественных водоемах рост клеток определяется освещенностью, температурой, содержанием углекислого газа и доступностью питательных веществ. В лабораторных и промышленных условиях для управления этими параметрами используются фотобиореакторы [4, 6].

Фотобиореактор представляет собой специальную установку, обеспечивающую контролируемые условия культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов. Благодаря системам освещения, аэрации и перемешивания такие установки позволяют значительно повысить продуктивность культуры по сравнению с обычными емкостями [4].

Несмотря на широкое применение фотобиореакторов в научных исследованиях и промышленности, большинство установок являются дорогостоящими и малодоступными для школьных лабораторий. Поэтому актуальной задачей является создание недорогих моделей фотобиореакторов из доступных материалов с последующей оценкой их эффективности.

Цель исследования — оценить эффективность самодельного фотобиореактора при культивировании микроводорослей рода *Micractinium* путем сравнения динамики роста культуры в активной и пассивной системах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. изучить литературные данные о биологии микроводорослей и принципах работы фотобиореакторов;
2. разработать и собрать лабораторную модель фотобиореактора; провести расчет стоимости установки;
3. выполнить калибровку спектрофотометрического метода оценки концентрации культуры;
4. провести сравнительный эксперимент по выращиванию микроводорослей;
5. определить эффективность фотобиореактора и выявить направления его дальнейшего совершенствования.

Научная новизна работы заключается в экспериментальной оценке эффективности самодельного фотобиореактора, созданного из доступных материалов для использования в условиях школьной лаборатории.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной установки для образовательных проектов в области экологии, биотехнологии и охраны окружающей среды.

Обзор литературы

Микроводоросли представляют собой группу преимущественно одноклеточных фотосинтезирующих организмов, обитающих в пресных и морских водоемах [2, 3]. Благодаря высокой скорости роста они способны быстро формировать значительные объемы биомассы и эффективно использовать солнечную энергию.

Род *Micractinium* относится к отряду зеленых водорослей *Chlorophyta* [2]. Представители данного рода широко распространены в пресноводных экосистемах и отличаются устойчивостью к изменениям условий среды.

Благодаря этим особенностям *Micractinium* часто используется в лабораторных исследованиях в качестве модельного объекта [2, 7].

Рост микроводорослей определяется комплексом факторов. Одним из наиболее важных является освещенность. Свет обеспечивает энергию для фотосинтеза, поэтому недостаток освещения приводит к замедлению роста клеток [2]. Однако чрезмерно интенсивное освещение также может оказывать негативное воздействие вследствие фотоповреждения фотосинтетического аппарата.

Вторым важным фактором является газообмен. В процессе фотосинтеза микроводоросли потребляют углекислый газ и выделяют кислород [2, 3]. При отсутствии перемешивания в культуре могут возникать локальные зоны с дефицитом углекислого газа и избытком кислорода, что снижает эффективность фотосинтеза.

Не менее важную роль играет перемешивание среды. Оно обеспечивает равномерное распределение света и питательных веществ по всему объему культуры, предотвращает оседание клеток и способствует эффективному газообмену [6, 7].

Для поддержания оптимальных условий культивирования используются фотобиореакторы различных конструкций [4]. В современной биотехнологии наиболее распространены трубчатые фотобиореакторы, плоскостельные системы и колонные реакторы. Однако для образовательных целей возможно создание упрощенных лабораторных моделей, сохраняющих основные функциональные элементы промышленных установок.

Исследования показывают, что наличие аэрации и перемешивания позволяет существенно повысить скорость роста микроводорослей и увеличить выход биомассы [4, 7]. Поэтому оценка эффективности даже простых фотобиореакторов представляет значительный практический интерес.

Материалы и методы

Для проведения исследования была разработана лабораторная модель фотобиореактора объемом 150 мл.

Основным материалом корпуса служило прозрачное оргстекло, обеспечивающее свободное прохождение света и возможность визуального наблюдения за состоянием культуры. В качестве источника перемешивания использовался маломощный аквариумный насос, соединенный с системой силиконовых трубок и аэрационным распылителем.

В качестве объекта исследования использовалась культура микроводорослей рода *Micractinium*. Начальная концентрация культуры во всех вариантах опыта была одинаковой и составляла 25% от исходной концентрации.

Экспериментальная установка включала:

- фотобиореактор с постоянной аэрацией;
- контрольную емкость аналогичного объема.

Обе системы находились при одинаковых условиях освещения и температуры.

Эксперимент проводился в течение трех суток при температуре 22–24 °С и непрерывном освещении.

Для количественной оценки роста культуры использовался метод спектрофотометрии, основанный на измерении оптической плотности среды. Предварительно была выполнена калибровка метода, позволившая установить зависимость между концентрацией клеток и величиной оптической плотности.

Общая стоимость создания фотобиореактора составила около 2950 рублей, что свидетельствует о доступности данной технологии для образовательных учреждений.

Результаты исследования

В ходе эксперимента ежедневно измерялась оптическая плотность среды.

Полученные данные представлены на рисунке 1.

Таблица 1. Сравнение значений оптической плотности при различных концентрациях микроводорослей

Концентрация микроводорослей в воде (г/л)	Значения оптической плотности
0,900	52,92
0,450	25,82
0,225	12,13

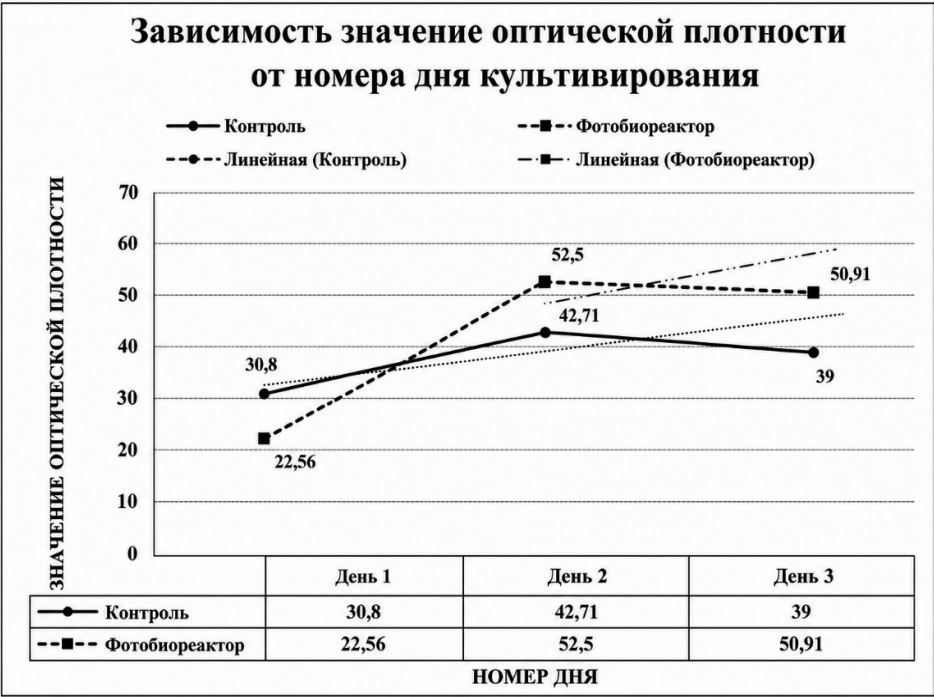


Рис. 1. Изменение численности популяции микроводорослей в зависимости от времени культивирования

Наиболее существенные различия между вариантами опыта были зафиксированы на вторые сутки культивирования. В этот период культура в фотобиореакторе достигла максимальной скорости роста и продемонстрировала более высокую плотность по сравнению с контролем.

Для количественной оценки эффективности был рассчитан относительный прирост показателей по сравнению с контрольной системой. На второй день культивирования значение оптической плотности в фотобиореакторе превышало контроль примерно на 23%, что свидетельствует о положительном влиянии аэрации и перемешивания.

На третьи сутки культура в фотобиореакторе сохранила высокие показатели роста, тогда как в контрольной системе наблюдалось снижение оптической плотности.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о более благоприятных условиях развития микроводорослей в активной системе культивирования.

Обсуждение результатов

Полученные данные подтверждают эффективность использования фотобиореактора для выращивания микроводорослей рода *Micractinium* и согласуются с результатами ранее опубликованных исследований [4, 7].

Основным фактором, обеспечившим повышение продуктивности культуры, вероятно, стало постоянное перемешивание среды. Благодаря циркуляции клеток каждая водоросль регулярно попадала в освещенные зоны реактора, что способствовало более эффективному фотосинтезу [4].

Дополнительным преимуществом являлась непрерывная аэрация. Поступление воздуха улучшало газообмен и препятствовало возникновению локальных зон с дефицитом углекислого газа [4, 6].

В контрольной системе отсутствие перемешивания привело к формированию неоднородной среды. Часть клеток постепенно оседала на дно емкости, что ограни-

чивало доступ к свету и снижало общую продуктивность культуры.

Несмотря на положительные результаты, эксперимент выявил ряд недостатков конструкции. Наблюдалось частичное оседание микроводорослей, что свидетельствует о недостаточной интенсивности перемешивания. Кроме того, использованная система освещения обеспечивала не полностью равномерное распределение света по объему реактора.

В дальнейшем представляется целесообразным модернизировать установку путем увеличения интенсивности циркуляции, применения кольцевой светодиодной подсветки и использования автоматического контроля параметров среды.

Выводы

Разработана и собрана работоспособная модель фотобиореактора из доступных материалов общей стоимостью около 3000 рублей.

Проведена калибровка спектрофотометрического метода определения концентрации микроводорослей.

Выполнен сравнительный эксперимент по культивированию культуры *Micractinium* в активной и пассивной системах.

Установлено, что применение аэрации и перемешивания способствует увеличению продуктивности культуры по сравнению с контрольной емкостью.

Максимальное преимущество фотобиореактора было зафиксировано на вторые сутки эксперимента и составило около 23% относительно контроля.

Подтверждена эффективность самодельного фотобиореактора как доступной лабораторной системы для выращивания микроводорослей.

Определены основные направления модернизации установки, связанные с совершенствованием перемешивания и освещения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / отв. ред. С. В. Бруевич. — Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1970. — 443. — URL: <http://heritage.jssc.ru/Catalog/ShowPub/19456> (дата обращения: 10.06.2026).
2. Никулин, А. Ю. Новые находки цианобактерий и водорослей для территории России и российского Дальнего Востока. Часть 2 / А. Ю. Никулин. — Текст: электронный // cyberleninka.ru: [сайт]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-nahodki-tsianobakteriy-i-vodorosley-dlya-territorii-rossii-i-rossiyskogo-dalnego-vostoka-chast-2> (дата обращения: 10.06.2026).
3. Романенко, В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. / В. И. Романенко. — Текст: электронный // ibiw.ru: [сайт]. — URL: <https://ibiw.ru/index.php?p=publ&id=328> (дата обращения: 10.06.2026).
4. Цоглин, Л. Н. Биотехнология микроводорослей / Л. Н. Цоглин. — Текст: электронный // cellreg.org: [сайт]. — URL: <https://cellreg.org/%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F-%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B9/> (дата обращения: 10.06.2026).
5. Дворецкий, Д. С. Основы биотехнологии микроводорослей. Учебное пособие для студентов очного и заочного отделений и магистрантов направлений 19.03.01, 19.04.01 «Биотехнология», 19.03.02, 19.04.02 «Продукты питания из растительного сырья» / Д. С. Дворецкий. — Текст: электронный // iprbookshop.ru: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/books/64149/details?url=%2Fbooks%2F64149%2Fdetails> (дата обращения: 10.06.2026).
6. Мельникова, В. А. Учебно-методическое пособие «Процессы и аппараты биотехнологии» / В. А. Мельникова. — Текст: электронный // klgtu.ru: [сайт]. — URL: https://klgtu.ru/vikon/sveden/files/aiz/UMP_Processy_i_apparaty_biotexnologii.pdf (дата обращения: 10.06.2026).
7. Горелова, О. А. Практикум по биотехнологии микроводорослей: учебное пособие / О. А. Горелова. — Текст: электронный // mdk-arbat.ru: [сайт]. — URL: <https://mdk-arbat.ru/book/6712214> (дата обращения: 10.06.2026).

Юный учёный

Международный научный журнал
№ 7.2 (103.2) / 2026

Ответственный за спецвыпуск Котин Павел Александрович,
заведующий лабораторией ОАНО «Школа «Летово» (г. Москва)
Выпускающий редактор Г. А. Письменная
Ответственные редакторы Е. И. Осянина, О. А. Шульга, З. А. Огурцова
Художник Е. А. Шишков
Подготовка оригинал-макета О. В. Майер

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.
При перепечатке ссылка на журнал обязательна.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал размещается и индексируется на портале eLIBRARY.RU, на момент выхода номера в свет журнал не входит в РИНЦ.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–61102 от 19 марта 2015 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый».

420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

Номер подписан в печать 18.07.2026. Дата выхода в свет: 21.07.2026.

Формат 60 × 90/8. Основной тираж номера: 500 экз., фактический тираж спецвыпуска: 20 экз. Цена свободная.

Почтовый адрес редакции: 420140, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Юлиуса Фучика, д. 94А, а/я 121

Фактический адрес редакции: 420029, Республика Татарстан, г. Казань,

ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

E-mail: info@moluch.ru; <https://moluch.ru/>

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», Республика Татарстан, г. Казань,

ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.