

ISSN 1816-9775 (Print)  
ISSN 2541-8971 (Online)

# ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия: Химия. Биология. Экология

2026

Том 26

Выпуск 1



IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY  
CHEMISTRY. BIOLOGY. ECOLOGY



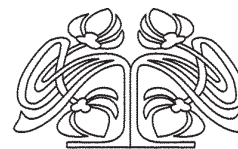
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

# ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия Химия. Биология. Экология, выпуск 1

Продолжение «Известий Императорского Николаевского Университета» 1910–1918, «Ученых записок СГУ» 1923–1962,  
«Известий Саратовского университета. Новая серия» 2001–2004



Научный журнал  
2026 Том 26

ISSN 1816-9775 (Print)

ISSN 2541-8971 (Online)

Издается с 2005 года

## СОДЕРЖАНИЕ

### Научный отдел

#### Химия

**Кубашева Р. Н., Ержанова Н. С., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х.**

Жидкие продукты термообработки органико-минерального осадка: химическая характеристика и топливные свойства

4

**Ержанова Н. С., Кубашева Р. Н., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х.**

Термическая трансформация бурового шлама: структурные и поверхностные изменения

13

**Устинова М. Н., Золотухина К. А., Короленко М. В.**

Фотодеградация ксенобиотиков и их смесей

21

**Данилина В. В., Зубарев К. Е., Хлопцев Н. О., Черкасов Д. Г.**

Влияние карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин

34

**Шабловский Я. О.** Термодинамическое моделирование

неравновесных процессов в биохимических системах

47

#### Биология

**Карпулянская А. В., Петерсон А. М.** Влияние условий

произрастания на микробиоту растений баклажана (*Solanum melongena* L., 1753) в Саратовской области

54

**Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Ефимова Е. С., Грицай У. О., Шарабарина Т. В., Тучин В. В., Тучина Е. С.** Фотодинамическое

воздействие с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения для лечения моделированных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных

63

**Садыгова М. К., Конысбаева Ж. А.-А., Шакенова Г. М., Каневский М. В., Гринёв В. С., Сибикеев С. Н., Андреева Л. В., Фитилева З. Е., Широков А. А.** Функциональные свойства линии фиолетовозёрной пшеницы he1730/C68//Эритроспермум223 саратовской селекции

76

**Васюков В. М., Курапов А. С.** Новые флористические находки в Республике Башкортостан (по материалам 2025 года)

87

#### Экология

**Нестеркина Д. Д., Голубев Д. М., Тарасюк А. К., Тихомирова Е. И., Нечаева О. В., Уткин Д. В., Глинская Е. В.**

Эколого-физиологический потенциал аборигенных штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв с высоким уровнем нефтяного загрязнения

90

**Дьякова Н. А.** Сравнительный элементный анализ корней лопуха большого и одуванчика лекарственного

100

### Приложение

#### Personalia

**Юдакова О. И.** Научное наследие профессора В. С. Тырнова. К 85-летию со дня рождения

110

Журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Химия. Биология. Экология» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Запись о регистрации СМИ ПИ № ФС77-76649 от 26 августа 2019 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (категория К2, специальности: 1.4.2; 1.4.3; 1.4.4; 1.5.2; 1.5.9; 1.5.12; 1.5.14; 1.5.15).

Журнал входит в Международную базу данных DOAJ

Подписной индекс издания 36013. Подписку на печатные издания можно оформить в интернет-каталоге ГК «Урал-Пресс» ([ural-press.ru](http://ural-press.ru)). Журнал выходит 4 раза в год. Цена свободная. Электронная версия находится в открытом доступе ([ichbe.sgu.ru](http://ichbe.sgu.ru))

#### Директор издательства

Бучко Ирина Юрьевна

#### Редактор

Митенева Елена Анатольевна

#### Редактор-стилист

Агафонов Андрей Петрович

#### Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

#### Технический редактор

Каргин Игорь Анатольевич

#### Корректор

Шевякова Виктория Валентиновна

В оформлении издания использованы работы художника Соколова Дмитрия Валерьевича (13.11.1940–20.11.2023)

#### Адрес учредителя, издателя

и издательства (редакции):  
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83  
Тел.: +7(845-2) 51-29-94, 51-45-49, 52-26-89  
E-mail: [publ@sgu.ru](mailto:publ@sgu.ru), [izdat@sgu.ru](mailto:izdat@sgu.ru)

Подписано в печать 20.03.2026.

Подписано в свет 31.03.2026.

Выход в свет 31.03.2026.

Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 13,48 (14,5).

Тираж 100 экз. Заказ 10-Т.

Отпечатано в типографии Саратовского университета.

Адрес типографии:  
410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2026



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует научные статьи по аналитической химии, органической химии, физической химии, биофизике (биологические науки), ботанике, зоологии, экологии, (по отраслям) (биологические науки), энтомологии.

Объем публикуемой статьи не должен превышать 16 страниц в формате MS Word для Windows.

Статья должна быть оформлена строго в соответствии с требованиями журнала и тщательно отредактирована.

Для публикации статьи автору необходимо представить в редакцию следующие материалы и документы:

- текст статьи в электронном виде;
- два экземпляра подписанного Лицензионного договора на право использования научного произведения.

Структура подачи материала:

- на русском языке: индекс УДК, название статьи, имена, отчества и фамилии авторов, сведения об авторах (ученая степень, должность, место работы/учебы (структурное подразделение, организация, почтовый адрес), город, страна, e-mail), аннотация, ключевые слова, текст статьи, благодарности и источники финансирования работы (если есть), список литературы;

- на английском языке: название статьи, имена (полностью), отчества и фамилии авторов, сведения об авторах (ORCID, место работы/учебы (организация, почтовый адрес организации), e-mail); аннотация, ключевые слова, благодарности и источники финансирования работы (если есть).

Требования к аннотации и библиографическому списку:

- аннотация не должна содержать сложных формул, ссылок на список литературы, по содержанию повторять название статьи, быть насыщена общими словами, не излагающими сути исследования; оптимальный объем 150–200 слов;

- в списке литературы должны быть указаны только процитированные в статье работы; ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Образцы оформления различных источников приведены в правилах для авторов по адресу: <https://www.ichbe.sgu.ru/ru/ru/dlya-avtorov>.

Датой поступления статьи считается дата поступления ее окончательного варианта. Возвращенная на доработку статья должна быть прислана в редакцию не позднее чем через 3 месяца. Возвращение статьи на доработку не означает, что статья будет опубликована, после переработки она вновь будет рецензироваться. Материалы, отклоненные редколлегией, не возвращаются.

Адреса для переписки с редколлекцией серии: [ichbe-sgu@yandex.ru](mailto:ichbe-sgu@yandex.ru); 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, биологический факультет, ответственному секретарю журнала «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология». Website: <https://ichbe.sgu.ru>

## CONTENTS

### Scientific Part

#### Chemistry

**Kubasheva R. N., Yerzhanova N. S., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh.** Liquid products of thermal treatment of organo-mineral sludge: Chemical characterization and fuel properties 4

**Yerzhanova N. S., Kubasheva R. N., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh.** Thermal transformation of drilling sludge: Structural and surface changes 13

**Ustinova M. N., Zolotukhina K. A., Korolenko M. V.** Photodegradation of xenobiotics and their mixtures 21

**Danilina V. V., Zubarev K. E., Khloptsev N. O., Cherkasov D. G.** Effect of lithium carbonate on the solubility and phase behavior of water–diisopropylamine and water–triethylamine binary systems 34

**Shablovsky Ya. O.** Thermodynamical modelling for equilibriumless processes in biochemical systems 47

#### Biology

**Karpulyanskaya A. V., Peterson A. M.** The influence of growing conditions on the microbiota of eggplant (*Solanum melongena* L., 1753) plants in the Saratov Region 54

**Musaelyan A. G., Alipov V. V., Efimova E. S., Gritsai U. O., Sharabarina T. V., Tuchin V. V., Tuchina E. S.** Photodynamic treatment using led red (660 nm) and laser infrared (808 nm) radiation for the treatment of simulated abdominal abscesses in laboratory animals 63

**Sadigova M. K., Konysbaeva Zh. A.-A., Shakenova G. M., Kanevsky M. V., Grinev V. S., Sibikeev S. N., Andreeva L. V., Fitileva Z. E., Shirokov A. A.** Functional traits of the Saratov-bred purple-grain wheat line hei730/c68//Erythrospermum 223 76

**Vasjukov V. M., Kurapov A. S.** New floral finds in the Republic of Bashkortostan (based on the materials of 2025) 87

#### Ecology

**Nesterkina D. D., Golubev D. M., Tarasyuk A. K., Tikhomirova E. I., Nechaeva O. V., Utkin D. V., Glinskaya E. V.** Ecophysiological potential of indigenous hydrocarbon-degrading bacteria isolated from heavily oil-contaminated soils 90

**Dyakova N. A.** Comparative elemental analysis of roots of burdock and medicinal dandelion 100

### Appendix

#### Personalia

**Yudakova O. I.** Scientific heritage of professor V. S. Tyrnov. On his 85th birthday anniversary 110



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ. СЕРИЯ:  
ХИМИЯ. БИОЛОГИЯ. ЭКОЛОГИЯ»**

**Главный редактор**

Горячева Ирина Юрьевна, доктор химических наук, профессор (Саратов, Россия)

**Заместитель главного редактора**

Коннова Светлана Анатольевна, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

**Ответственный секретарь**

Глинская Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент (Саратов, Россия)

**Члены редакционной коллегии:**

Аникин Василий Викторович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

Берберова Надежда Титовна, доктор химических наук, профессор (Астрахань, Россия)

Богатырев Владимир Александрович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

Гаркушин Иван Кириллович, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член РАЕН (Самара, Россия)

Горбунов Олег Григорьевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (Москва, Россия)

Гулий Ольга Ивановна, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник (Саратов, Россия)

Дубатовол Владимир Викторович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (Новосибирск, Россия)

Дыкман Лев Абрамович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (Саратов, Россия)

Егорова Алевтина Юрьевна, доктор химических наук, профессор (Саратов, Россия),

Ерошенко Галина Александровна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник (Саратов, Россия)

Захаров Владимир Михайлович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН (Москва, Россия)

Кашин Александр Степанович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

Кулагин Алексей Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Башкортостан, академик РАЕН (Уфа, Россия)

Кулиш Елена Ивановна, доктор химических наук, доцент (Уфа, Россия)

Ларионова Дарья Анатольевна, кандидат химических наук (Гент, Бельгия)

Максимов Георгий Владимирович, доктор биологических наук, профессор (Москва, Россия)

Мисра Прадумна Кумар, PhD (Бхопал, Индия)

Монахова Юлия Борисовна, доктор химических наук (Аахен, Германия)

Мостовский Михаил Борисович, доктор биологических наук (Тель-Авив, Израиль; Питермаритцбург, ЮАР)

Опарин Михаил Львович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

Позднякова Наталия Николаевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник (Саратов, Россия)

Ревин Виктор Васильевич, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)

Шанцер Иван Алексеевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник (Москва, Россия)

Шиповская Анна Борисовна, доктор химических наук, доцент (Саратов, Россия)

Шихалиев Хидмет Сафарович, доктор химических наук, профессор (Воронеж, Россия)

Штыков Сергей Николаевич, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член РАЕН (Саратов, Россия)

Щеголев Сергей Юрьевич, доктор химических наук, профессор (Саратов, Россия),

Юдакова Ольга Ивановна, доктор биологических наук, доцент (Саратов, Россия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL  
"IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY.  
CHEMISTRY. BIOLOGY. ECOLOGY"**

**Editor-in-Chief** – Irina Yu. Goryacheva (Saratov, Russia)

**Deputy Editor-in-Chief** – Svetlana A. Konnova (Saratov, Russia)

**Executive Secretary** – Elena V. Glinskay (Saratov, Russia)

**Members of the Editorial Board:**

Vasilii V. Anikin (Saratov, Russia)

Nadezhda T. Berberova (Astrakhan, Russia)

Vladimir A. Bogatyrev (Saratov, Russia)

Ivan K. Garkushin (Samara, Russia)

Oleg G. Gorbunov (Moscow, Russia)

Olga I. Guliy (Saratov, Russia)

Vladimir V. Dubatolov (Novosibirsk, Russia)

Lev A. Dykman (Saratov, Russia)

Alevtina Yu. Egorova (Saratov, Russia)

Galina A. Eroshenko (Saratov, Russia)

Alexandr S. Kashin (Saratov, Russia)

Alexey Yu. Kulagin (Ufa, Russia)

Elena I. Kulish (Ufa, Russia)

Dariya A. Larionova (Ghent, Belgium)

Georgy V. Maksimov (Moscow, Russia)

Pradyumna Kumar Mishra (Bhopal, India)

Yuliya B. Monakhova (Aachen, Germany)

Mikhail B. Mostovski (Tel Aviv, Israel;

Pietermaritzburg, South African Republic)

Michail L. Oparin (Saratov, Russia)

Natalia N. Pozdnyakova (Saratov, Russia)

Viktor V. Revin (Saransk, Russia)

Ivan A. Shanzer (Moscow, Russia)

Anna B. Shipovskaya (Saratov, Russia)

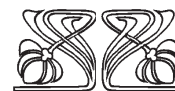
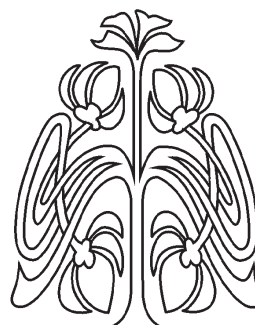
Khidmet S. Shikhaliev (Voronezh, Russia)

Sergey N. Shtykov (Saratov, Russia)

Sergey Ju. Shchyogolev (Saratov, Russia)

Olga I. Yudakova (Saratov, Russia)

Vladimir M. Zakharov (Moscow, Russia)

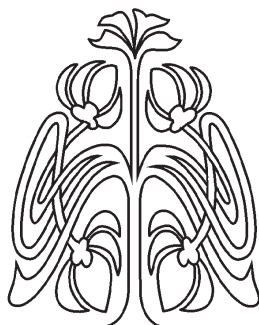


**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ**

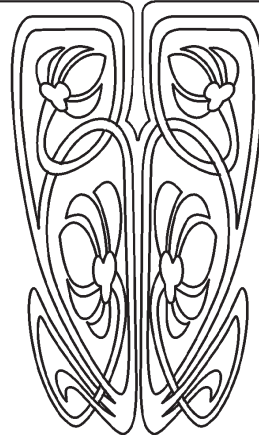




## ХИМИЯ



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–12

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–12

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>

EDN: AJGSAM

Научная статья  
УДК 544.015.4

### Жидкие продукты термообработки органо-минерального осадка: химическая характеристика и топливные свойства

Р. Н. Кубашева<sup>1</sup>✉, Н. С. Ержанова<sup>1</sup>, Р. И. Кузьмина<sup>1</sup>, З. Х. Кунашева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Казахстан, 090000, г. Уральск, ул. Н. Назарбаева, д. 161

Кубашева Раушан Нуртаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [r\\_kubasheva@mail.ru](mailto:r_kubasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Ержанова Нургуль Сандибаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [nurgul.yerzhanova@mail.ru](mailto:nurgul.yerzhanova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Кузьмина Раиса Ивановна, доктор химических наук, профессор кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [kuzminaraisa@mail.ru](mailto:kuzminaraisa@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Кунашева Зарипа Хайроллиевна, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, [kunasheva@mail.ru](mailto:kunasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты комплексного исследования жидких продуктов, образующихся в процессе термической обработки органо-минерального осадка. Основное внимание уделено определению химического состава, установлению фракционного распределения и оценке топливных характеристик полученной жидкой фракции. Методы газовой хроматографии, инфракрасной спектроскопии и элементного анализа позволили получить детальную характеристику продукта. Установлено, что жидкая фракция обогащена изопарафиновыми, ароматическими, нафтеновыми и олефиновыми углеводородами, при этом содержание парафинов составляет 5,2 мас. %, а оксигенатов – 4,5 мас. %. Химическая природа соединений указывает на протекание процессов термической деструкции органической части осадка с последующей вторичной конденсацией летучих продуктов. Детализированный хроматографический анализ показал, что легкая фракция жидкого продукта содержит значительные количества толуола (10,96 мас. %), этилбензола (3,06 мас. %), о-ксилола (3,75 мас. %), триметилбензола (4,19 мас. %), а также изопарафиновых углеводородов – 2,3,5-триметилгексана (5,20 мас. %) и *i*-бутилциклопентана (5,77 мас. %). Дополнительно присутствуют нафтеновые соединения с различной длиной цепи (C<sub>7</sub>-C<sub>17</sub>) и арены (C<sub>11</sub>-C<sub>18</sub>), что формирует разнообразный углеводородный профиль жидкой фракции. Фракционирование жидкого продукта показало, что легкокипящая часть (до 100°C) характеризуется высокими октановыми числами: 76,8 по моторному методу и 93,3 по исследовательскому методу. Наибольший вклад в октановое число вносят изопарафины (38,1 по исследовательскому методу) и ароматические соединения (33,5), тогда как доля парафинов, олефинов и оксигенатов существенно ниже.



Таким образом, жидкая фракция, получаемая при термической обработке органо-минерального осадка, обладает комплексом характеристик, близких к моторным топливам, и может рассматриваться как перспективный источник альтернативного топлива либо как сырьё для дальнейшего химического синтеза. Представленные результаты демонстрируют возможность эффективного использования органо-минеральных отходов в энергетике и химической промышленности.

**Ключевые слова:** термическая обработка, органо-минеральный осадок, жидкий продукт, фракционный состав, групповой состав, углеводороды, изопарафины, ароматические соединения, нафтенy, олефины, октановое число, газовая хроматография

**Для цитирования:** Кубашева Р. Н., Ержанова Н. С., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х. Жидкие продукты термообработки органо-минерального осадка: химическая характеристика и топливные свойства // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–12. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>, EDN: AJGSAM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Liquid products of thermal treatment of organo-mineral sludge: Chemical characterization and fuel properties

R. N. Kubasheva<sup>1</sup> ✉, N. S. Yerzhanova<sup>1</sup>, R. I. Kuzmina<sup>1</sup>, Z. Kh. Kunasheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>West Kazakhstan University named after M. Utemissov, 161 N. Nazarbayev St., Uralsk 090000, Kazakhstan

Raushan N. Kubasheva, [r\\_kubasheva@mail.ru](mailto:r_kubasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Nurgul' S. Yerzhanova, [nurgul.yerzhanova@mail.ru](mailto:nurgul.yerzhanova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Raisa I. Kuzmina, [kuzminaraisa@mail.ru](mailto:kuzminaraisa@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Zaripa Kh. Kunasheva, [kunasheva@mail.ru](mailto:kunasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

**Abstract.** This study presents the results of a comprehensive investigation of liquid products obtained during the thermal treatment of organo-mineral sludge. The main focus is placed on determining the chemical composition, establishing fractional distribution, and evaluating the fuel characteristics of the resulting liquid fraction. A set of analytical methods, including gas chromatography, infrared spectroscopy, and elemental analysis, has been employed to provide a detailed characterization of the product. It has been established that the liquid fraction is enriched with isoparaffinic, aromatic, naphthenic, and olefinic hydrocarbons, while paraffins (5,2 wt.%) and oxygenates (4,5 wt.%) are present in smaller amounts. The chemical composition indicates the occurrence of complex thermal degradation processes of the organic part of the sludge, followed by secondary condensation of volatile products. Chromatographic analysis of the light fraction revealed significant contents of toluene (10,96 wt.%), ethylbenzene (3,06 wt.%), o-xylene (3,75 wt.%), and 1,2,4-trimethylbenzene (4,19 wt.%). In addition, isoparaffinic hydrocarbons such as 2,3,5-trimethylhexane (5,20 wt.%) and *i*-butylcyclopentane (5,77 wt.%) have been identified, along with naphthenic compounds (C<sub>7</sub>-C<sub>17</sub>) and arenes (C<sub>11</sub>-C<sub>18</sub>), forming a diverse hydrocarbon profile of the liquid fraction. Fractionation of the liquid product showed that the light fraction (up to 100°C) is characterized by high octane numbers: 76,8 by the motor method and 93,3 by the research method. The main contribution to the octane number comes from isoparaffins (38,1 by the research method) and aromatic compounds (33,5), while the share of paraffins, olefins, and oxygenates is significantly lower. Thus, the liquid fraction obtained from the thermal treatment of organo-mineral sludge exhibits properties comparable to motor fuels and may be considered both as a promising alternative fuel and as a feedstock for chemical synthesis. These findings highlight the potential of utilizing organo-mineral wastes as secondary energy resources within sustainable waste-to-energy technologies.

**Keywords:** thermal treatment, organo-mineral sludge, liquid product, fractional composition, group composition, hydrocarbons, isoparaffins, aromatic compounds, naphthenes, olefins, octane number, gas chromatography

**For citation:** Kubasheva R. N., Yerzhanova N. S., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh. Liquid products of thermal treatment of organo-mineral sludge: Chemical characterization and fuel properties. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–12 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>, EDN: AJGSAM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Жидкие продукты, образующиеся в результате термической обработки органо-минеральных осадков, представляют собой сложные многокомпонентные системы, включающие широкий спектр углеводородов и кислородсодержащих соединений. Их химическая природа и топливные свойства определяются исходным составом сырья и режимами термообработки. Согласно литературным данным, получаемая жидкая фракция по своим характеристикам со-

поставима с традиционными углеводородными топливами и при соответствующей доочистке может рассматриваться в качестве альтернативного источника энергии [1–3].

Современные исследования указывают, что в составе жидких продуктов термической переработки осадков сточных вод преобладают ароматические углеводороды, изопарафины, нафтенy и олефины, при этом фиксируется присутствие кислородсодержащих соединений и небольших количеств парафинов [4, 5]. Подобный компонентный состав был установлен в ряде



экспериментальных работ с использованием газовой хроматографии и масс-спектрометрии, что подтверждает универсальность процессов термической деструкции органической части осадка и последующей вторичной конденсации летучих соединений [6–8].

Особое внимание в зарубежных исследованиях уделяется оценке топливных характеристик легких фракций жидкого продукта. Так, работы по термической обработке отходов нефтепроизводства демонстрируют, что октановое число легкокипящей фракции может достигать 90–95 по исследовательскому методу, что сопоставимо с бензиновыми фракциями нефтяного происхождения [9, 10]. При этом вклад различных классов соединений в октановое число варьирует: изопарафины и ароматические углеводороды обеспечивают основной вклад, в то время как нафтены и парафины снижают этот показатель [11].

Термическая обработка органо-минерального осадка сопровождается сложными физико-химическими процессами, протекающими в несколько взаимосвязанных стадий. Их результатом является образование жидкой фракции, включающей широкий спектр алифатических, ароматических, нафтеновых и кислородсодержащих соединений.

Образование жидкой фракции при термической обработке органо-минерального осадка происходит через последовательные реакции термолитиза, крекинга, изомеризации, дегидрирования и конденсации, что приводит к получению сложной смеси алифатических, ароматических, нафтеновых и кислородсодержащих соединений [12].

Таким образом, анализ опубликованных данных позволяет сделать вывод о высокой перспективности исследований жидкой фазы, образующейся при термической обработке органо-минеральных осадков. Систематизация результатов по её составу и топливным свойствам не только способствует развитию технологий переработки отходов, но и формирует научные основы для создания альтернативных видов топлива и сырья для химической промышленности.

## Материалы и методы

В продолжение анализа актуальности использования жидких продуктов термической обработки органо-минеральных осадков в ка-

честве вторичных энергетических ресурсов, в данной работе объектом исследования выбран жидкий продукт, полученный при термической обработке органо-минерального осадка. Основное внимание уделялось его компонентному составу и топливным характеристикам.

### Газовая хроматография

Для проведения исследования отобран образец органо-минерального осадка, подвергнутый термической обработке при контролируемых условиях. Полученный жидкий продукт был предварительно очищен от механических примесей и влаги с целью исключения влияния посторонних факторов на результаты анализа.

Анализ углеводородного состава жидкой фракции осуществлялся с применением газового хроматографа «Кристалл-5000», работающего в режиме линейного программирования температуры в диапазоне от 35°C до 250°C. В качестве детектора использован пламенно-ионизационный детектор (ПИД), обеспечивающий высокую чувствительность к органическим соединениям.

Идентификация компонентов проводилась на основе логарифмических индексов удерживания с сопоставлением полученных значений с табличными данными для углеводородов различных классов. Количественный анализ осуществлялся с применением программы «Хроматэк Аналитик», позволяющей рассчитывать концентрации компонентов, среднюю молекулярную массу, относительную плотность, давление насыщенных паров и температуру выкипания.

Определение топливных характеристик выполнялось по совокупности полученных данных. Октановое число рассчитывалось как по исследовательскому, так и по моторному методу, что обеспечило достоверную оценку топливных свойств легкой фракции жидкого продукта. Для оценки воспроизводимости измерений каждый эксперимент проводился в трёхкратной повторности, а результаты усреднялись [12].

### Расчёт октанового числа смеси

Для расчёта октанового числа (ОЧ) смеси применяется хроматографический метод с использованием данных о составе легкой фракции жидкого продукта. Если в наличии площади пиков  $S_i$  и известны коэффициенты ответа (факторы детектирования)  $F_i$ , массовые доли  $w_i$  компонентов рассчитывают по формуле [13]:

$$w_i = (S_i / F_i) / \sum(S_j / F_j).$$



Если факторы ответа неизвестны и принято приближение одинаковой чувствительности, можно использовать  $F_i = 1$ .

### Результаты и их обсуждение

Полученный в результате термической обработки органо-минерального осадка жидкий продукт после отстаивания разделился на два слоя. Верхний слой представлял собой жёлтую маслянистую жидкость с характерным неприятным запахом, тогда как нижний слой имел более светло-жёлтый оттенок, был менее вязким и отличался резко выраженным, резким запахом. В ходе отстаивания также зафиксировано выделение газовой фазы над жидкостью. Анализ газов показал щелочную реакцию (рН 11–12 при контакте с влажной индикаторной бумагой), что указывает на присутствие газообразных азот- и кислородсодержащих соединений, формирующих специфический запах.

Для исследования компонентного состава жидкий продукт подвергался фракционированию на установке атмосферной разгонки нефти. В ходе эксперимента удалось выделить одну фракцию в интервале температур 75–100°C. Повышение температуры выше данного диапазона приводило к вспениванию вязкого остатка без выделения дополнительных летучих фракций. Полученный остаток при комнатной температуре представлял собой высоковязкую чёрную субстанцию, обладающую горючестью. При сжигании наблюдалось неполное горение с выделением сажи, что, вероятно, обусловлено присутствием в его составе конденсированных высокоуглеродистых систем.

Компонентный состав верхнего слоя жидкого продукта был исследован методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл-5000» с использованием пламенно-ионизационного детектора.

Высокая доля изопарафиновых (24,0 мас. %) и ароматических углеводородов (26,3 мас. %) в составе лёгкой фракции свидетельствует о значительном потенциале исследуемого продукта как топлива. Известно, что изопарафины и арены играют ключевую роль в формировании высоких октановых чисел, что подтверждает перспективность их использования в составе моторных топлив. Наличие нафтеновых соединений (7,1 мас. %) дополнительно повышает стабильность горения, однако их энергетическая эффективность ниже по сравнению с аренами и изопарафинами.

В то же время присутствие олефинов (3,6 мас. %) и кислородсодержащих компонентов (0,2 мас. %) указывает на склонность продукта к химической нестабильности, что может проявляться в процессе хранения (полимеризация, смолообразование). Это обуславливает необходимость проведения последующей доочистки или гидрообработки для улучшения эксплуатационных характеристик топлива.

Фракционный анализ жидкого продукта показал, что начальная температура кипения составляет 72,7°C, что указывает на присутствие лёгких углеводородов, в основном низкомолекулярных аренов и изопарафинов. Уже при отгоне 10–20% фиксируются температуры 109–119°C, что соответствует диапазону бензиновых фракций (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Температурные характеристики фракционного состава жидкого продукта**  
**Temperature characteristics of the fractional composition of the liquid product**

Отгон, % / Distillate, %	Температура, °C / Temperature, °C	Отгон, % / Distillate, %	Температура, °C / Temperature, °C
0,5	72,735	55,0	150,369
5,0	100,970	60,0	157,009
10,0	109,470	65,0	163,771
15,0	114,125	70,0	170,655
20,0	118,923	75,0	179,187
25,0	123,801	80,0	188,291
30,0	128,376	85,0	198,298
35,0	132,544	90,0	219,907
40,0	136,768	95,0	262,549
45,0	141,047	98,0	348,784
50,0	145,381	99,5	370,510



С ростом температуры отмечается плавный отгон компонентов, относящихся к среднекипящим фракциям: при 50% отгона температура достигает 145,4°C, а при 75% – 179,2°C. Такой профиль характерен для углеводородов бензинового ряда с высокой концентрацией изопарафинов и аренов, что согласуется с результатами хроматографического анализа.

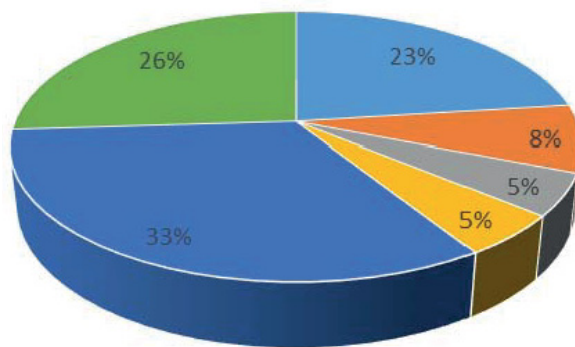
Дальнейшее повышение температуры сопровождается выделением более тяжёлых углеводородов: при 90% отгона температура составляет 219,9°C, а при 95% достигает 262,5°C, что свидетельствует о присутствии керосиновых и дизельных фракций. Данная температура кипения (370,5°C при 99,5% отгона) указывает на наличие тяжёлых ароматических соединений и конденсированных структур, образующих высококипящий остаток.

Исследуемый жидкий продукт характеризуется широким интервалом выкипания (72–370°C), охватывающим бензиновые, керосиновые и частично дизельные фракции. Основная масса углеводородов сконцентрирована в диапазоне 100–200°C, что определяет его топливный потенциал как аналога моторных бензинов. Однако наличие значительного количества высококипящих компонентов (до 20% от массы) требует дополнительной очистки или каталитической переработки для стабилизации свойств и улучшения эксплуатационных характеристик топлива.

Групповой состав жидкого продукта свидетельствует о его сложной и многокомпонентной природе (рис. 1). Наибольшая доля приходится на изопарафиновые углеводороды (32,8 мас. %), что является положительным фактором с точки зрения топливных характеристик. Известно, что именно изопарафины обеспечивают высокий уровень детонационной стойкости и формируют значительный вклад в октановое число моторных топлив.

Вторую по величине группу составляют ароматические углеводороды (25,6 мас. %). Их присутствие также способствует повышению октанового числа, однако избыточное содержание ароматических соединений может приводить к экологическим ограничениям вследствие увеличения токсичности выхлопных газов.

Значительная доля приходится на нефтяные углеводороды (23,4 мас. %), которые, с одной стороны, обеспечивают хорошие смазывающие свойства и высокую теплопроводную способность, а с другой – несколько



- Нафтены/ Naphthenes
- Олефины/ Olefins
- Оксигенаты / Oxygenates
- Парафины/ Paraffins
- Изопарафины / Isoparaffins
- Ароматика / Aromatics

Рис. 1. Групповой состав жидкого продукта (цвет онлайн)

Fig. 1. Group composition of the liquid product (color online)

снижают устойчивость топлива к детонации по сравнению с изопарафинами. Тем не менее их присутствие делает продукт более универсальным по свойствам. Содержание олефинов (8,5 мас. %) указывает на наличие ненасыщенных углеводородов, которые характеризуются высокой реакционной способностью. Это может негативно влиять на стабильность хранения топлива из-за склонности к полимеризации и образованию смолистых веществ. Небольшое количество парафиновых соединений (5,2 мас. %) снижает общую детонационную стойкость, однако их присутствие в ограниченных пределах является типичным для продуктов термокatalитических процессов. Оксигенаты (4,5 мас. %) формируются в результате частичной дегидратации и окисления органической составляющей осадка; хотя их содержание невелико, они могут способствовать коррозионной активности и снижать долговечность оборудования при прямом использовании продукта в качестве топлива.

Совокупность группового состава указывает на то, что жидкий продукт по своим характеристикам близок к углеводородным системам моторного топлива. Высокая доля изопарафинов и ароматических углеводородов позволяет рассматривать его в качестве перспективного компонента для производства бензинов, однако для практического применения необходимы дополнительные стадии очистки и стабилизации с целью снижения доли олефинов и кислородсодержащих соединений.



Проведённый хроматографический анализ легкой фракции позволил уточнить природу отдельных углеводородов (табл. 2). Было установлено, что значительную часть состава формируют ароматические соединения – толуол (10,96 мас. %), этилбензол (3,06 мас. %) и о-ксилол (3,75 мас. %), которые являются

типичными компонентами моторных бензинов и обеспечивают высокие антидетонационные свойства. Среди изопарафинов доминируют 2,3,5-триметилгексан (5,20 мас. %), 2,3-диметилгептан (4,28 мас. %) и 2,3-диметилгептан (4,21 мас. %), что также положительно отражается на октановых характеристиках продукта.

Таблица 2 / Table 2

**Основные индивидуальные углеводородные компоненты легкой фракции жидкого продукта**  
**Main individual hydrocarbon components of the light fraction of the liquid product**

№	Время удерживания, мин / Retention time, min	Компонент / Component	Масса, % / Mass fraction, %	Объем, % / Volume fraction, %	Количество вещества, % / Mole fraction, %
1	26,938	3,4-диметилгексан / 3,4-dimethylhexane	1,129	1,271	1,423
2	33,225	2,4-диметилгексан / 2,4-dimethylhexane	1,470	1,610	1,739
3	36,698	толуол / toluene	10,963	9,952	14,775
4	43,725	3-этилметилциклопентан / 3-ethylmethylcyclopentane	2,486	2,551	2,751
5	46,155	п-октан / n-octane	1,821	2,041	1,980
6	47,703	2,3,5-триметилгексан / 2,3,5-trimethylhexane	5,202	5,310	5,164
7	57,889	этилбензол / ethylbenzene	3,059	2,777	3,578
8	60,378	2,3-диметилгептан / 2,3-dimethylheptane	4,276	4,383	4,236
9	64,893	3-этилгептан / 3-ethylheptane	3,809	4,127	3,688
10	65,944	о-ксилол / o-xylene	3,752	3,567	3,050
11	68,666	нафтены C <sub>7-9</sub> / naphthenes C <sub>7-9</sub>	4,059	4,377	3,930
12	71,029	<i>i</i> -бутилциклопентан / isobutylcyclopentane	5,771	5,795	5,726
13	81,974	2,3-диметилгептан / 2,3-dimethylheptane	4,214	4,295	4,060
14	85,460	1,2,4-триметилбензол / 1,2,4-trimethylbenzene	4,188	4,068	3,974
15	86,993	нафтены C <sub>10-13</sub> / naphthenes C <sub>10-13</sub>	2,710	2,882	2,365
16	97,353	нафтены C <sub>11-17</sub> / naphthenes C <sub>11-17</sub>	3,245	3,451	2,578
17	98,512	1,2-диметил, 3-этилбензол / 1,2-dimethyl-3-ethylbenzene	2,154	2,037	1,767
18	106,951	арены C <sub>11-18</sub> / arenes C <sub>11-18</sub>	1,778	1,572	1,510
19	107,919	арены C <sub>12-15</sub> / arenes C <sub>12-15</sub>	1,239	1,095	0,948

Особый интерес представляют нафтеновые углеводороды (циклоалканы), например,

*i*-бутилциклопентан (5,77 мас. %) и нафтены с различным числом атомов углерода (C<sub>7</sub>-C<sub>17</sub>),



которые в совокупности формируют около 10 мас. %. Их присутствие свидетельствует о протекании процессов циклизации и частичной ароматизации в ходе термической обработки. В то же время фиксируются и компоненты с более высокой молекулярной массой – полиароматические соединения (арены  $C_{11}$ - $C_{18}$  и  $C_{12}$ - $C_{15}$ ), что указывает на склонность системы к конденсации и образованию более тяжёлых структур.

Совокупность группового и компонентного состава демонстрирует, что полученный жидкий продукт характеризуется сбалансированным сочетанием изопарафинов и аренов, что определяет его потенциал как основы для моторных топлив. Однако присутствие олефинов и полиаренов подчёркивает необходимость дальнейшей доочистки и стабилизации для снижения склонности к смолообразованию и улучшения эксплуатационных свойств.

Результаты фракционирования (рис. 2) подтверждают высокую перспективность жидкого продукта как моторного топлива:

октановое число легкокипящей фракции (до  $100^{\circ}\text{C}$ ) составило 93,3 по исследовательскому и 76,8 – по моторному методу. Наибольший вклад в формирование высоких антидетонационных свойств вносит высокая доля изопарафинов (38,1 по исследовательскому методу) и ароматических углеводородов (33,5), что согласуется с ранее выявленным компонентным составом. Существенное присутствие нафтенных (до 15,6) дополнительно стабилизирует характеристики фракции, улучшая её смесеобразующие свойства. В то же время вклад олефинов и кислородсодержащих соединений остаётся минимальным (не более 3,1 пунктов в сумме), что снижает риск нестабильности при хранении.

Таким образом, совокупный анализ подтверждает возможность использования жидкого продукта в качестве альтернативного моторного топлива после проведения дополнительных стадий очистки и стабилизации, направленных на уменьшение содержания реакционноспособных компонентов.

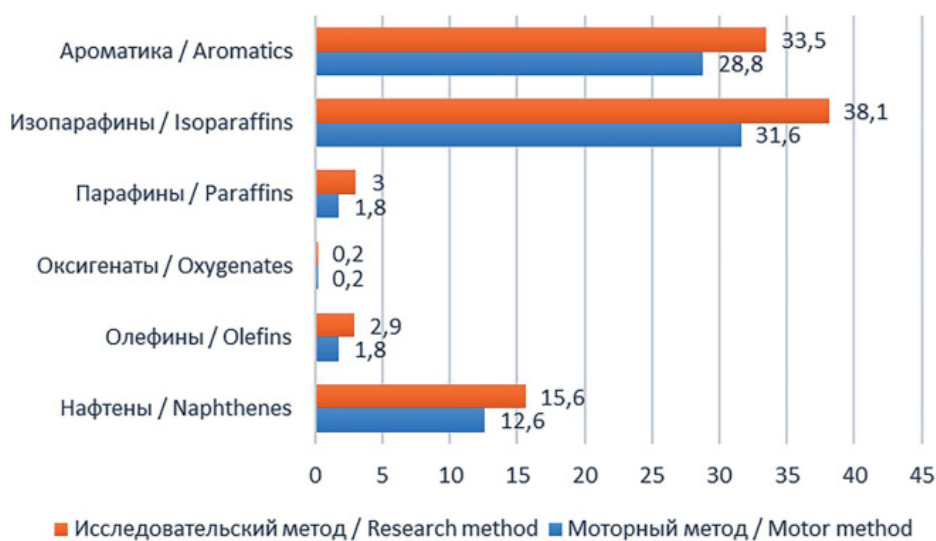


Рис. 2. Октановое число легкой фракции жидкого продукта (цвет онлайн)  
Fig. 2. Octane number of the light fraction of the liquid product (color online)

## Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что жидкий продукт, полученный при термической обработке органо-минерального осадка, характеризуется сложным многофазным составом и широким диапазоном выкипания ( $72$ – $370^{\circ}\text{C}$ ), охватывающим бензиновые, керосиновые и частично дизельные фракции. Основная масса углеводородов

сосредоточена в интервале  $100$ – $200^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о его топливном потенциале как аналога моторных бензинов.

Групповой анализ выявил преобладание изопарафиновых (32,8 мас. %) и ароматических (25,6 мас. %) углеводородов, обеспечивающих высокие антидетонационные характеристики. Существенное содержание нафтенных (23,4 мас. %) дополнительно улучшает смесеобразующие и эксплуатационные свойства



топлива. Хроматографический анализ лёгкой фракции подтвердил наличие типичных для моторных бензинов компонентов – толуола, этилбензола, о-ксилола, а также изопарафинов с высоким вкладом в октановое число. Фракционирование показало, что лёгкая фракция жидкого продукта обладает октановым числом 93,3 по исследовательскому и 76,8 по моторному методу, что соответствует требованиям к топливным системам.

В то же время присутствие олефинов (8,5 мас. %) и кислородсодержащих соединений (4,5 мас. %) указывает на склонность к химической нестабильности и необходимость проведения дополнительных стадий доочистки или гидрообработки.

Таким образом, полученный жидкий продукт осадка может рассматриваться как перспективное сырьё для производства моторных топлив. Его практическое применение требует внедрения методов каталитической доработки, направленных на снижение содержания реакционноспособных соединений и стабилизацию эксплуатационных характеристик.

#### Список литературы

1. Haghight M., Majidian N., Hallajisani A., Samipour-giri M. Producing of bio-oil from sewage sludge: A review of thermal and catalytic conversion methods // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 250. P. 119–170. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100870>
2. Smith J., Wang L., Jones P. Fractional composition and catalytic upgrading of liquid pyrolysis products from sewage sludge // *Fuel Processing Technology*. 2018. Vol. 172. P. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy // *Sustainability*. 2019. № 11. P. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>
4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil // *Sustainability*. 2019. № 11. P. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>
5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors // *Sustainability*. 2019. № 11. P. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application // *The Science Publishing Company: Beijing, China*. 2012. № 8. P. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Рудакова Л. В., Пичугин Е. А., Зильберман М. В., Зырянова Е. В. Влияние кислотного стабилизатора грунтов на кислотно-основные свойства буровых шламов // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23, № 10. С. 29–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Кузьмина Р. И., Ромаденкина С. Б., Михель А. А., Игнатъев С. В. Переработка резиновых отходов методом высокотемпературного пиролиза // *Химия твердого топлива*. 2016. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.7868/S0023117716040083>
9. Дурджевич Д., Трстеньяк М., Хуленич И. Выбор технологии термической обработки осадка сточных вод с использованием процесса аналитической иерархии // *Вода*. 2020. № 12. С. 1255–1268. <https://doi.org/10.3390/w12051255>
10. Будыкина Т. А. Сушка осадка производственных сточных вод в естественных условиях // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25, № 2. С. 242–252. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-242-252>
11. Яцун А. В., Коновалов Н. П., Ефименко И. С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ // *Химия твердого топлива*. 2013. № 4. С. 60–63. <https://doi.org/10.7868/S0023117713040130>
12. Носенко А. А., Половнева С. И. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7, № 2. С. 113–121. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121>
13. Quantitation methods in gas chromatography. Deerfield, IL : Alltech associates, Inc., 1998. 28 p.

#### References

1. Haghight M., Majidian N., Hallajisani A., Samipour-giri M. Producing of bio-oil from sewage sludge: A review of thermal and catalytic conversion methods. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 250, pp. 119–170. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100870>
2. Smith J., Wang L., Jones P. Fractional composition and catalytic upgrading of liquid pyrolysis products from sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 2018, vol. 172, pp. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>
4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>



5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application. *The Science Publishing Company: Beijing. China*, 2012, no. 8, pp. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Rudakova L. V., Pichugin E. A., Zilberman M. V., Zyryanova E. V. Influence of soil acid stabilizer on the acid–base properties of drilling sludge. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 10, pp. 29–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Kuzmina R. I., Romadenkina S. B., Mikhel A. A., Ignatiev S. V. Processing of rubber waste by high-temperature pyrolysis. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, no. 4, pp. 56–60 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0023117716040083>
9. Durdjevic D., Trstenjak M., Hulenec I. Selection of sewage sludge thermal treatment technology using the analytic hierarchy process. *Water-Magazine*, 2020, no. 12, pp. 1255–1265 (in Russian). <https://doi.org/10.3390/w12051255>
10. Budykina T. A. Drying of industrial wastewater sludge under natural conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 242–252 (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-242-252>
11. Yatsun A. V., Kononov N. P., Efimenko I. S. Liquid products of waste tire pyrolysis under microwave irradiation. *Solid Fuel Chemistry*, 2013, no. 4, pp. 60–71 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0023117713040130>
12. Nosenko A. A., Polovneva S. I. Methods and devices for measuring the surface area dispersed materials. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 113–121 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121>
13. *Quantitation methods in gas chromatography*. Deerfield, IL, Alltech associates, Inc., 1998. 28 p.

Поступила в редакцию 13.10.2025, одобрена после рецензирования 20.10.2025, принята к публикации 10.11.2025  
The article was submitted 13.10.2025, approved after reviewing 20.10.2025, accepted for publication 10.11.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 13–20

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 13–20

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

Научная статья

УДК 544.722



## Термическая трансформация бурового шлама: структурные и поверхностные изменения

Н. С. Ержанова<sup>1</sup>✉, Р. Н. Кубашева<sup>1</sup>, Р. И. Кузьмина<sup>1</sup>, З. Х. Кунашева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Казахстан, 090000, г. Уральск, ул. Н. Назарбаева, д. 161

Ержанова Нургүль Сандыбаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [nurgul.yerzhanova@mail.ru](mailto:nurgul.yerzhanova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Кубашева Раушан Нуртаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [r\\_kubasheva@mail.ru](mailto:r_kubasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Кузьмина Раиса Ивановна, доктор химических наук, профессор кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, [kuzminaraisa@mail.ru](mailto:kuzminaraisa@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Кунашева Зарипа Хайроллиевна, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, [kunasheva@mail.ru](mailto:kunasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

**Аннотация.** Исследованы структурные и поверхностные изменения, происходящие в карбонатном буровом шламе на нефтяной основе при высокотемпературном пиролизе. Основное внимание уделено изучению трансформации органо-минеральной системы методом ИК-спектроскопии, а также изменению текстурных характеристик с применением адсорбционно-порового анализа. Установлено, что пиролиз обеспечивает полное удаление органической составляющей шлама, что подтверждается исчезновением характерных полос алифатических углеводородов в ИК-спектрах. При этом сохраняются и трансформируются более термостабильные ароматические и минеральные компоненты, включая карбонаты, сульфаты и силикаты. Процессы дегидратации и дегидроксилирования сопровождаются формированием активных кислотных центров, усиливающих реакционную способность материала. Адсорбционно-поровый анализ показал развитие устойчивой мезо- и макропористой структуры твердого остатка. Для образца, пиролизованного при 800°C, удельная поверхность достигает 7,3 м<sup>2</sup>/г, при среднем радиусе пор около 36Å. Гранулометрический анализ подтвердил, что остаток характеризуется мелкодисперсной и однородной структурой, с преобладанием частиц в диапазоне 0,6–2,9 нм. Такая текстура в сочетании с высокой поверхностной активностью делает материал перспективным для практического применения.

Таким образом, пиролиз бурового шлама представляет собой не только метод экологически безопасной утилизации, но и способ получения вторичного ресурса с ценными сорбционными и каталитическими свойствами. Полученные результаты могут служить основой для разработки технологий переработки буровых отходов и создания на их основе функциональных материалов.

**Ключевые слова:** буровой шлам, пиролиз, ИК-спектроскопия, адсорбционно-поровый анализ, удельная поверхность, пористая структура, термическая деструкция, вторичная переработка

**Для цитирования:** Ержанова Н. С., Кубашева Р. Н., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х. Термическая трансформация бурового шлама: структурные и поверхностные изменения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 13–20. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Thermal transformation of drilling sludge: Structural and surface changes

N. S. Yerzhanova<sup>1</sup>✉, R. N. Kubasheva<sup>1</sup>, R. I. Kuzmina<sup>1</sup>, Z. Kh. Kunasheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>West Kazakhstan University named after M. Utemissov, 161 N. Nazarbayev St., Uralsk 090000, Kazakhstan

Nurgul' S. Yerzhanova, [nurgul.yerzhanova@mail.ru](mailto:nurgul.yerzhanova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Raushan N. Kubasheva, [r\\_kubasheva@mail.ru](mailto:r_kubasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Raisa I. Kuzmina, [kuzminaraisa@mail.ru](mailto:kuzminaraisa@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Zaripa Kh. Kunasheva, [kunasheva@mail.ru](mailto:kunasheva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>



**Abstract.** The study investigates the structural and surface changes occurring in carbonate drilling sludge (CDS) of oil-based origin under high-temperature pyrolysis. The main focus is placed on the transformation of the organo-mineral system using IR spectroscopy, as well as on the changes in textural characteristics analyzed by adsorption-pore methods (BET and BJH). It has been established that pyrolysis ensures the complete removal of the organic fraction of the sludge, which is confirmed by the disappearance of characteristic aliphatic hydrocarbon bands in the IR-spectra. At the same time, more thermally stable aromatic and mineral components, including carbonates, sulfates, and silicates, are preserved and undergo transformation. The processes of dehydration and dehydroxylation are accompanied by the formation of active acidic sites that enhance the reactivity of the material. Adsorption-pore analysis has revealed the development of a stable meso- and macroporous structure in the solid residue. For the sample pyrolyzed at 800°C, the specific surface area reached 7.3 m<sup>2</sup>/g, with an average pore radius of about 36Å. Granulometric analysis has confirmed that the residue is characterized by a fine-dispersed and homogeneous structure, with a predominance of particles in the 0.6–2.9 µm range. Such a texture, combined with high surface activity, makes the material promising for practical applications. Thus, pyrolysis of drilling sludge is not only an environmentally safe disposal method but also a way to obtain a secondary resource with valuable sorption and catalytic properties. The results obtained may serve as a basis for the development of technologies for drilling waste recycling and the creation of functional materials derived from them.

**Keywords:** drilling sludge, pyrolysis, IR-spectroscopy, adsorption-pore analysis, specific surface area, porous structure, thermal degradation, recycling

**For citation:** Yerzhanova N. S., Kubasheva R. N., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh. Thermal transformation of drilling sludge: Structural and surface changes. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 13–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Рост мирового спроса на жидкие углеводородные ресурсы неизбежно приводит к увеличению объемов бурового шлама, представляющего собой сложный техногенный отход нефтегазовой отрасли. Буровой шлам на нефтяной основе, состоящий из минеральных компонентов, остатков буровых растворов и органических примесей, является источником серьезного экологического загрязнения, а его утилизация – сложная и дорогостоящая задача [1]. Тем не менее, этот отход также обладает потенциалом в качестве альтернативного ресурса. Одним из перспективных подходов к его переработке является пиролиз – термическое разложение при высоких температурах в отсутствие кислорода. Этот метод позволяет не только обезвредить шлам, но и преобразовать его органическую часть в ценные продукты: синтетическое топливо и твердый углеродсодержащий остаток [2].

Исследования процессов пиролиза бурового шлама ведутся уже давно. Так, работы [3–6] показали, что пиролиз эффективно разлагает органические компоненты шлама, а состав и выход продуктов сильно зависят от температуры и скорости нагрева. Было установлено, что в вакуумных условиях можно повысить выход и качество жидких продуктов за счет ускоренного удаления летучих веществ и предотвращения их вторичного разложения. Однако многие аспекты изменения физико-химических свойств минеральной части шлама, в частности, формирование его пористой структуры и образование новых функциональных групп, изучены недостаточно.

Таким образом, целью настоящей работы является комплексное исследование физико-химических процессов, протекающих на поверхности карбонатного бурового шлама (КБШ) на нефтяной основе до и после его пиролиза. Для этого будет применен комплекс современных аналитических методов, включая ИК-спектроскопию для анализа изменений в составе органических и минеральных фаз, а также адсорбционно-пористый анализ (BET и BJH) для оценки структурных трансформаций и развития пористости материала. Полученные результаты позволят не только глубже понять механизмы термической деструкции бурового шлама, но и обосновать его потенциальное использование в качестве перспективного сорбента или каталитического носителя.

## Материалы и методы

Для изучения физико-химических процессов, протекающих на поверхности карбонатного бурового шлама на нефтяной основе до и после пиролиза, применялся комплекс методов спектроскопического и сорбционного анализа.

### ИК-спектроскопия

Анализ функциональных групп органической и минеральной составляющих шлама проводился с использованием инфракрасного спектрометра ИКС-29, который зарекомендовал себя как надёжный прибор для качественного и количественного исследования органо-минеральных систем. Перед началом работы спектрофотометр включался в соответствии с инструкцией производителя и проходил прогрев в течение 45 мин.



Образцы предварительно измельчались до порошкообразного состояния; для регистрации спектров готовились прессованные таблетки с бромидом калия либо суспензии в парафиновом масле. Подготовленные образцы помещались в кюветное отделение прибора, после чего регистрировались спектры поглощения в диапазоне средних ИК-частот. Полученные данные использовались для идентификации изменений в составе органических и минеральных фаз, происходящих в процессе пиролиза [7, 8].

#### Адсорбционно-поровый анализ

Изучение удельной поверхности и распределения пор по размерам в твёрдом остатке после пиролиза проводилось методом низкотемпературной адсорбции азота при 77 К на автоматическом анализаторе поверхности «Quantachrome NOVA 1200e», сопряжённом с персональным компьютером и специализированным программным обеспечением. Перед измерениями образцы подвергались дегазации под вакуумом при температуре 200°C в течение 2 ч для удаления влаги и адсорбированных газов.

Расчёт удельной поверхности осуществлялся по методу Брунауэра – Эммета – Теллера (ВЕТ). По уравнению ВЕТ определялся объём монослоя адсорбата, число молекул в монослое и суммарная площадь поверхности, принимая во внимание стандартную площадь, занимаемую одной молекулой. Метод применялся в области относительных давлений 0,05–0,35 ( $P/P_0$ ), где его погрешность составляет 5–10%.

Для определения распределения пор по размерам использовался метод Баррета – Джойнера – Халенды (ВЖН). В основе модели лежало допущение о цилиндрической форме пор и равенстве радиуса поры сумме радиуса Кельвина и толщины адсорбированной плёнки на стенке пор. Для расчётов использовались данные десорбционной ветви изотерм в диапазоне относительных давлений 0,967–0,4 ( $P/P_0$ ) [9, 10].

#### Результаты и их обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что пиролиз оказывает комплексное воздействие на органо-минеральную систему карбонатного бурового шлама на нефтяной основе. Изменения прослеживаются как на уровне функциональных групп, так и в характеристиках пористой структуры. Дальнейшее обсуждение сосредоточено на интерпретации этих изменений и их возможных механизмах.

##### 1. ИК-спектроскопический анализ

Сравнительный анализ ИК-спектров бурового шлама до и после пиролиза позволяет выявить закономерности трансформации его органо-минеральной структуры и установить ключевые физико-химические процессы, происходящие в материале при термообработке.

В спектре исходного бурового шлама доминируют полосы, связанные с органической составляющей нефтяной основы (рис. 1).

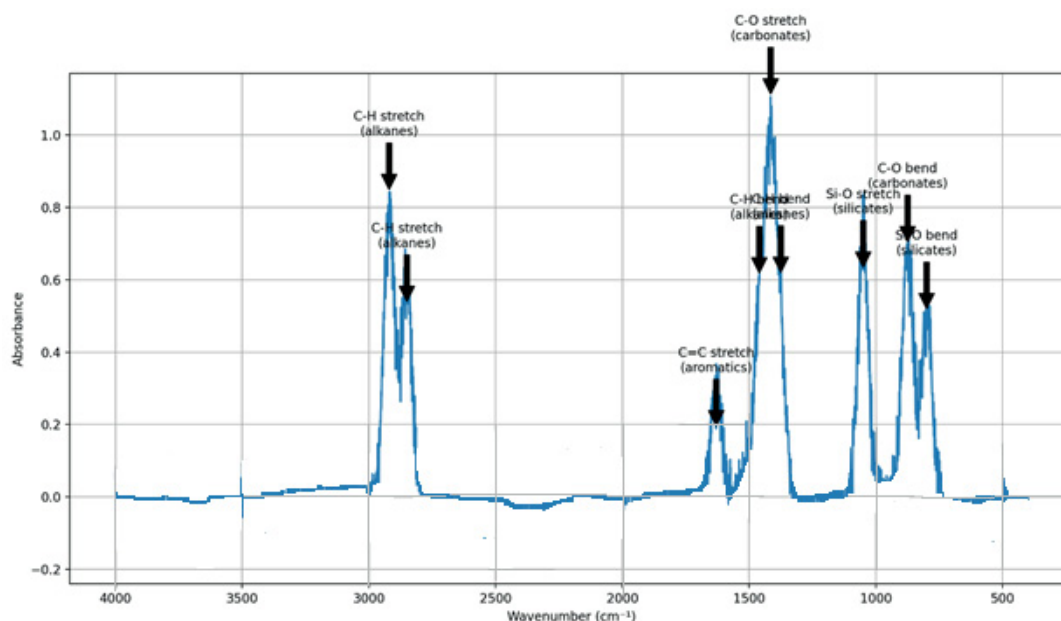


Рис. 1. ИК-спектр образца КБШ до пиролиза  
Fig. 1. IR-spectrum of the carbonate drilling sludge sample before pyrolysis



Валентные колебания связей С–Н в алканах ( $2920$  и  $2850\text{ см}^{-1}$ ) и деформационные колебания метильных и метиленовых групп ( $1460$  и  $1375\text{ см}^{-1}$ ) свидетельствуют о высоком содержании алифатических углеводородов. Наличие полосы при  $1630\text{ см}^{-1}$  указывает на присутствие ароматических структур, а широкая область  $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ , а также полоса при  $\sim 1630\text{ см}^{-1}$  связаны с присутствием физически адсорбированной и координированной воды. Характерные полосы карбонатных ионов ( $1415$  и  $875\text{ см}^{-1}$ ), а также Si–O связей в силикатных структурах ( $1050$  и  $800\text{ см}^{-1}$ ) подтверждают минеральную природу неорганической матрицы шлама.

В ИК-спектре твердого остатка после пиролиза интенсивность полос, связанных с алифатическими углеводородами ( $2920$  и  $2850\text{ см}^{-1}$ ), резко снижается, что указывает на их термическое разрушение и выделение летучих продуктов пиролиза (рис. 2). Полоса при  $1630\text{ см}^{-1}$ , связанная с ароматическими структурами, сохраняется, что отражает их более высокую термическую устойчивость и склонность к карбонизации. Существенные изменения наблюдаются в области  $3200\text{--}3600$  и  $1630\text{ см}^{-1}$ , где исчезают или значительно ослабевают сигналы, связанные с O–H и H–O–H колебаниями, что обусловлено дегидратацией и дегидроксилированием.

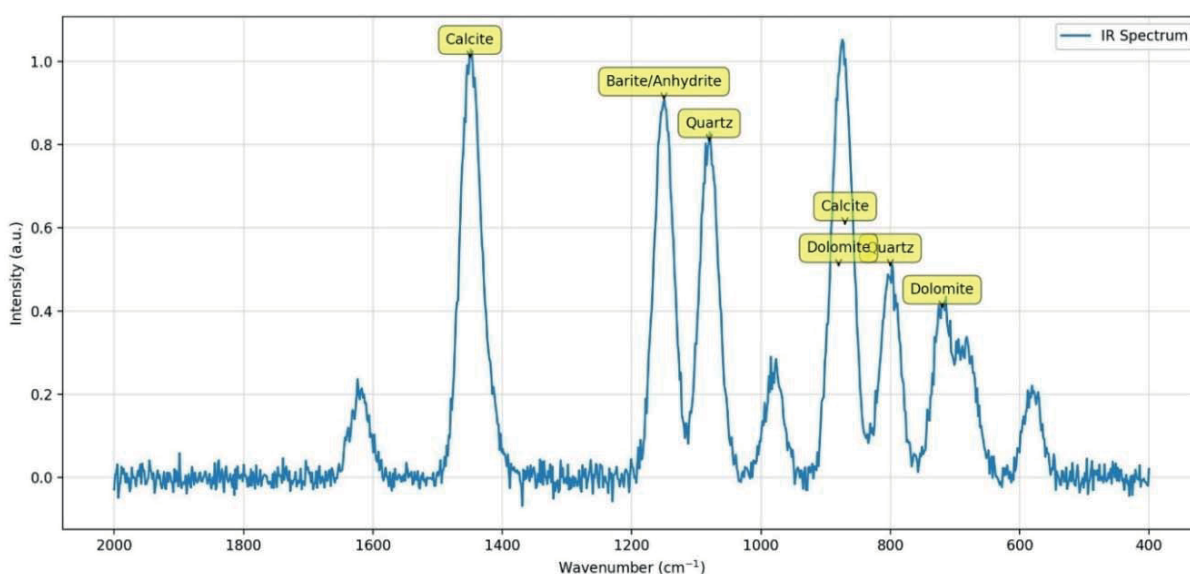


Рис. 2. ИК-спектр КБШ после пиролиза  
Fig. 2. IR-spectrum of the carbonate drilling sludge after pyrolysis

Одновременно усиливаются полосы, характерные для минеральной матрицы. В области  $1400\text{--}1450$  и  $870\text{ см}^{-1}$  более отчетливо проявляются карбонатные фазы (кальцит, доломит), а в диапазоне  $1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$  фиксируются интенсивные сигналы сульфатных минералов (барит, ангидрит). Полосы кварца и силикатов ( $1080$ ,  $800$  и  $780\text{ см}^{-1}$ ) становятся более выраженными, что связано как с относительным увеличением минеральной составляющей после выгорания органики, так и с частичной перестройкой силикатной решетки при нагреве. В низкочастотной области ( $400\text{--}600\text{ см}^{-1}$ ) появляются широкие полосы, соответствующие колебаниям металл–кислород, что может указывать на формирование оксидов железа, кальция и других металлов.

Таким образом, пиролиз бурового шлама сопровождается последовательным разрушением органической составляющей, дегидратацией и дегидроксилированием, а также концентрацией и частичной трансформацией минеральных фаз. Эти процессы приводят к образованию значительного количества кислотных активных центров (карбонатных, сульфатных, силикатных и оксидных), которые способны определять реакционную и сорбционную способность твердого остатка. Полученные результаты позволяют заключить, что пиролиз не только способствует утилизации органической части шлама, но и формирует перспективный по своим физико-химическим свойствам продукт для дальнейшего промышленного применения.



Однако данные ИК-спектроскопии отражают лишь качественный состав поверхности. Для более полного понимания необходимо учитывать текстурные характеристики материала.

### 2. Текстурные характеристики

Методы низкотемпературной адсорбции азота (ВЕТ, ВЈН) подтвердили данные спектроскопии, показав развитие мезо- и макропористой структуры твердого остатка. Для образца, пиролизованного при 800°C, удельная поверхность составляет 7,3 м<sup>2</sup>/г (ВЕТ) и 3,8 м<sup>2</sup>/г (ВЈН), объем пор – 0,017 см<sup>3</sup>/г, при среднем радиусе 36 Å (рис. 3).

Распределение пор свидетельствует о преобладании мезо- и макропор: около 45% приходится на поры радиусом более 100 Å. При этом повышение температуры сопровождается уменьшением доли макропор и перераспределением порового пространства в пользу пор диаметром 10–20 и 40–80 Å. Эти изменения связаны с уплотнением углеродной матрицы и осаждением углеродсодержащих остатков на стенках пор, что подтверждает данные ИК-анализа о накоплении коксообразующих фракций.

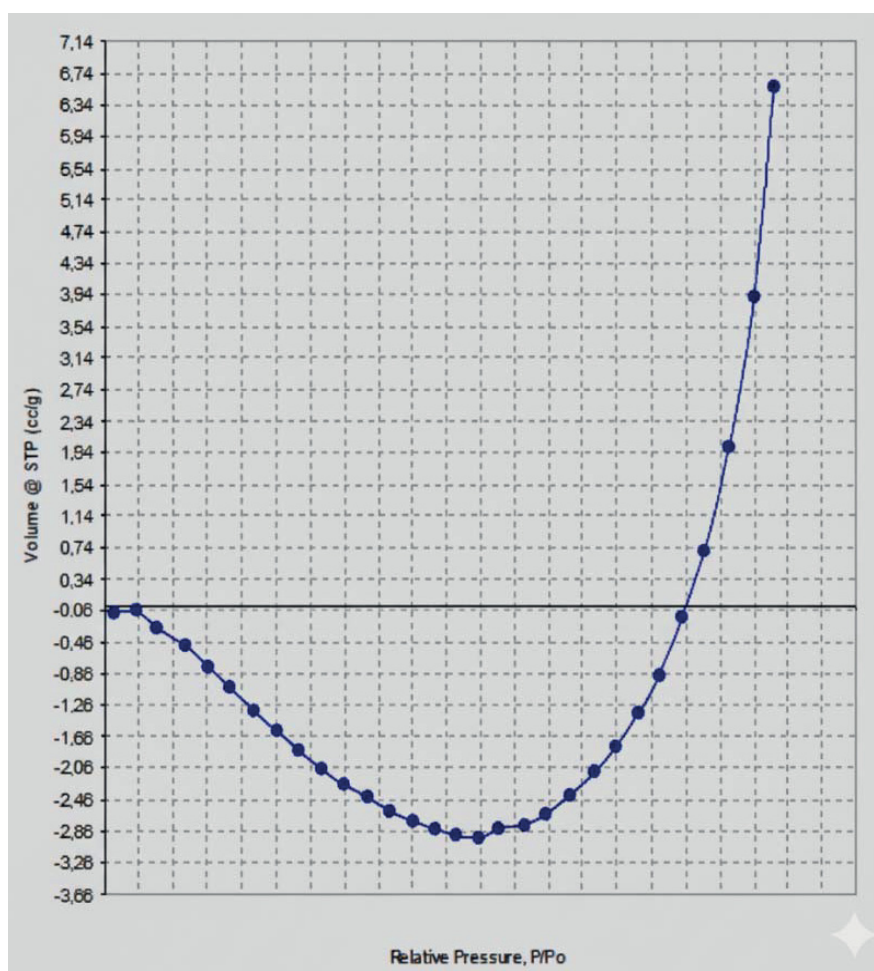


Рис. 3. Зависимость объема пор поверхности КБШ после пиролиза от относительного давления

Fig. 3. Dependence of pore volume of the carbonate drilling sludge after pyrolysis on relative pressure

### 3. Гранулометрический состав

Гранулометрический анализ показал, что твердый остаток пиролиза КБШ при 800°C характеризуется мелкодисперсной структурой. Основная масса частиц сосредоточена

в диапазоне 0,6–2,9 нм, при этом наиболее выражены фракции 0,554–0,840 нм (21,3%) и 1,035–1,933 нм (21,8%) (рис. 4).

Более крупные частицы (3,6–4,4 нм) составляют лишь 12,3% от общей массы (таблица).

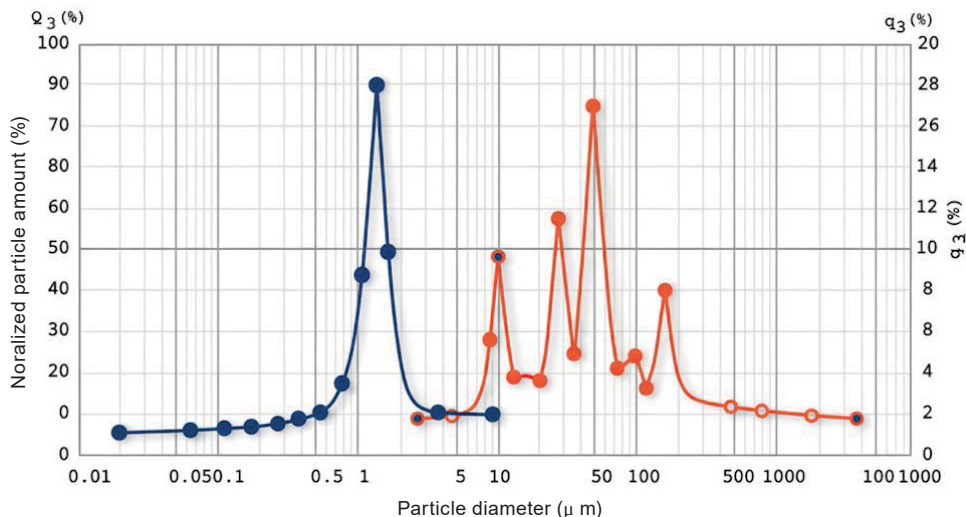


Рис. 4. Количественное распределение частиц по размерам  
Fig. 4. Quantitative particle size distribution

**Гранулометрический состав КБШ полученного после пиролиза**

Table. Particle size distribution of the carbonate drilling sludge obtained after pyrolysis

Размер частиц, нм / Particle size, µm	Содержание частиц, % от общего количества / Particle content, % of the total amount
0,556–0,841	21,3
1,037–1,929	21,8
2,371	15,6
2,946	16,8
3,616–4,440	12,3

Высокая степень дисперсности и однородность частиц создают предпосылки для увеличения удельной поверхности и улучшения сорбционных свойств твердого остатка.

**4. Функциональная значимость полученных результатов**

Совокупность данных ИК-спектроскопии, адсорбционных измерений и гранулометрии показывает, что пиролиз бурового шлама сопровождается комплексной трансформацией структуры материала:

- 1) разложением органической фазы и формированием углеродсодержащего покрытия;
- 2) дегидратацией и дегидроксилированием, сопровождающимся исчезновением полос воды и ОН-групп;
- 3) перераспределением порового пространства с формированием устойчивой мезопористой структуры;
- 4) измельчением частиц и повышением их однородности.

Эти изменения придают твердому остатку новые функциональные свойства: наличие кислотных центров, развитая поверхность и устойчивая текстура. Такой материал может рассматриваться как перспективный сорбент, носитель катализатора или минеральная добавка для строительных композиционных материалов.

**Заключение**

Проведенное исследование позволило комплексно изучить физико-химические и структурные изменения, происходящие с карбонатным буровым шламом на нефтяной основе под воздействием высокотемпературного пиролиза. Результаты, полученные с помощью ИК-спектроскопии, адсорбционно-порового анализа и гранулометрии, подтвердили, что пиролиз является эффективным методом для утилизации этого вида промышленных отходов.



#### Основные выводы исследования

1. ИК-спектры убедительно показали, что пиролиз полностью разрушает органические соединения, содержащиеся в шламе, что приводит к образованию твердого углеродсодержащего остатка. Это не только решает проблему экологической опасности, но и позволяет получить потенциально ценный продукт.

2. Адсорбционно-поровой анализ продемонстрировал, что пиролиз способствует формированию развитой мезо- и макропористой структуры. Наличие разветвленной системы пор и высокой удельной поверхности делает твердый остаток перспективным материалом для применения в качестве сорбента, например, для очистки сточных вод или газов, а также как носителя катализаторов.

3. В процессе термической обработки происходит концентрация минеральных фаз и образование новых активных центров (карбонатных, сульфатных, оксидных), что усиливает сорбционные и реакционные свойства материала.

4. Гранулометрический анализ подтвердил, что твердый остаток пиролиза представляет собой мелкодисперсный, гомогенный порошок. Этот фактор значительно расширяет возможности его использования, например, в качестве минеральной добавки в строительные смеси или цемент.

Таким образом, пиролиз бурового шлама является не просто методом его обезвреживания, но и технологией, позволяющей получать ценный вторичный ресурс с уникальными физико-химическими свойствами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию условий пиролиза для получения материала с заданными характеристиками, а также на изучение его эффективности в конкретных промышленных применениях.

#### Список литературы

1. Моисеенко А. С., Командровский В. Г., Ступак И. С. Специализированная информационно-измерительная система оперативного инфракрасного анализа минерального состава шлама бурящейся скважины // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 2. С. 7–9.
2. Moghaddas M. A., Yi A. Y., Graff K. F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. № 103. P. 187–199. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03487-7>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy // Sustainability. 2019. № 11. P. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>
4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil // Sustainability. 2019. № 11. P. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>
5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors // Sustainability. 2019. № 11. P. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application // The Science Publishing Company: Beijing, China. 2012. № 8. P. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Рудакова Л. В., Пичугин Е. А., Зильберман М. В., Зырянова Е. В. Влияние кислотного стабилизатора грунтов на кислотно-основные свойства буровых шламов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 10. С. 29–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Сивакова Л. Г., Касьянова О. В. Модификация твердого остатка пиролиза растворами ПАВ // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : сб. материалов IV Всерос. конф. (Кемерово, 27–28 ноября 2018 г.). Кемерово : КузГТУ, 2018. С. 1–5.
9. Касьянова О. В., Шапранко Д. С., Дудникова Ю. Н., Исмаилов З. Р. Исследование физико-химических характеристик твердого остатка пиролиза резино-технических изделий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.267/30/1999-4125-2019-2-101-110>
10. Moghaddas M. A., Short M. A., Wiley N. A., Yi A. Y., Graff K. F. Performance of an ultrasonic-assisted drilling module // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. № 94. P. 3019–3028. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0495-7>

#### References

1. Moiseenko A. S., Komandrovskiy V. G., Stupak I. S. Specialized information-measuring system for operational infrared analysis of the mineral composition of drilling well sludge. *Automation, Telemechanization and Communication in the Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 7–9 (in Russian).
2. Moghaddas M. A., Yi A. Y., Graff K. F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 103, pp. 187–199. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03487-7>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>



4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>
5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application. *The Science Publishing Company: Beijing, China*, 2012, no. 8, pp. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Rudakova L. V., Pichugin E. A., Zilberman M. V., Zyryanova E. V. Influence of soil acid stabilizer on the acid–base properties of drilling sludge. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 10, pp. 29–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Sivakova L. G., Kasyanova O. V. Modification of the solid residue of pyrolysis with surfactant solutions. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy: sb. materialov IV Vseros. konf. (Kemerovo, 27–28 noyabrya 2018 g.)* [Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects: Coll. of materials IV All-Russian conf. (Kemerovo, November 27–28, 2018)]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University Publ., 2018, pp. 1–5 (in Russian).
9. Kasyanova O. V., Shapranko D. S., Dudnikova Yu. N., Ismagilov Z. R. Research of the physical and chemical characteristics solid residue pyrolysis of resinotechnical products. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2019, no. 2, pp. 101–110 (in Russian). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-2-101-110>
10. Moghaddas M. A., Short M. A., Wiley N. A., Yi A. Y., Graff K. F. Performance of an ultrasonic-assisted drilling module. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, no. 94, pp. 3019–3028. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0495-7>

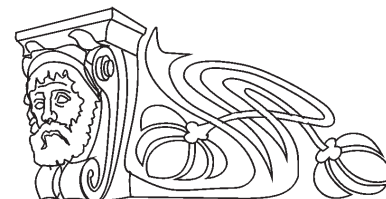
Поступила в редакцию 13.10.2025, одобрена после рецензирования 20.10.2025, принята к публикации 10.11.2025  
The article was submitted 13.10.2025, approved after reviewing 20.10.2025, accepted for publication 10.11.2025



Научная статья

УДК 544.45.454.542.943-92

## Фотодеградация ксенобиотиков и их смесей



М. Н. Устинова ✉, К. А. Золотухина, М. В. Короленко

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Устинова Мария Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии института фармации, химии и биологии, [ustinova@bsuedu.ru](mailto:ustinova@bsuedu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>

Золотухина Ксения Андреевна, магистрант Института фармации, химии и биологии, [1389050@bsuedu.ru](mailto:1389050@bsuedu.ru)

Короленко Марина Викторовна, магистрант Института фармации, химии и биологии, [990486@bsuedu.ru](mailto:990486@bsuedu.ru)

**Аннотация.** Загрязнение окружающей среды продуктами человеческой деятельности в настоящее время является серьезной экологической проблемой. Органические ксенобиотики подвергаются биодеградации медленно и накапливаются в объектах окружающей среды: регулярный мониторинг не только подтверждает наличие различных загрязнителей в реках, почвах и атмосфере, но и указывает на их рост. Несмотря на то что предложено множество методов инактивации химических реагентов и очистки от загрязнителей, до сих пор нет универсального, применимого к различным классам ксенобиотиков метода, который можно было бы использовать для создания локальных высокоэффективных очистных сооружений. Целью работы являлось изучение деградации модельных систем ксенобиотиков различной природы, а также их смесей. Методом деструкции было выбрано УФ-облучение. Изучали деструкцию модельных веществ: двух красителей, трех фармацевтических препаратов и трех нитропроизводных фенола, а также деструктивные процессы модельных систем различных загрязнителей. Показано, что изученные субстраты уже в течение первого часа подвергаются фотодеструкции. Рассчитаны кинетические характеристики данных процессов. Изучено взаимное влияние субстратов на процесс деструкции. Показано влияние pH растворов на процесс деградации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что УФ-облучение можно рассматривать как перспективный метод инактивации различных загрязнителей и их смесей.

**Ключевые слова:** деградация, ксенобиотики, УФ-облучение, pH

**Для цитирования:** Устинова М. Н., Золотухина К. А., Короленко М. В. Фотодеградация ксенобиотиков и их смесей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-21-33>, EDN: CPUKEM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Photodegradation of xenobiotics and their mixtures

М. N. Ustinova ✉, К. A. Zolotukhina, М. V. Korolenko

Belgorod State University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

Maria N. Ustinova, [ustinova@bsu.edu.ru](mailto:ustinova@bsu.edu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>

Kseniya A. Zolotukhina, [1389050@bsu.edu.ru](mailto:1389050@bsu.edu.ru)

Marina V. Korolenko, [990486@bsuedu.ru](mailto:990486@bsuedu.ru)

**Abstract.** Environmental pollution from human activities is currently a serious environmental problem. Organic xenobiotics are slowly biodegraded and accumulate in the environment: regular monitoring not only confirms the presence of various pollutants in rivers, soils, and the atmosphere, but also indicates their growth. Despite the fact that many methods have been proposed for the inactivation of chemical reagents and the removal of pollutants, there is still no universal method that can be applied to various classes of xenobiotics and used to create local, highly efficient wastewater treatment facilities. The purpose of this work was to study the destructive processes of model systems of xenobiotics of various types and their mixtures. UV irradiation was used as a method of destruction. The work has studied the destruction of model substances: two dyes, three pharmaceuticals, and three nitro derivatives of phenol. The destructive processes of model systems of various pollutants have been studied. It has been shown that the studied substrates undergo photodestruction within the first hour. The kinetic characteristics of these processes have been calculated. The mutual influence of substrates on the destruction process has been studied. The effect of pH on the degradation process has been shown. The results obtained indicate that UV irradiation can be considered as a promising method for inactivating various pollutants and their mixtures.

**Keywords:** degradation, xenobiotics, UV irradiation, pH

**For citation:** Ustinova M. N., Zolotukhina K. A., Korolenko M. V. Photodegradation of xenobiotics and their mixtures. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 21–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-21-33>, EDN: CPUKEM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



## Введение

Человек в своей повседневной деятельности постоянно использует множество химических веществ в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, попадающих в огромном количестве в экосистему [1]. На сегодняшний день проблема загрязнения окружающей среды выбросами отходов различных производств весьма актуальна [2–4].

Широкое применение фармацевтических препаратов, средств личной гигиены, косметической продукции, бытовой химии, дезинфицирующих средств и пестицидов напрямую отражается на концентрации ксенобиотиков в водной среде и приводит к тому, что эти химические компоненты и продукты их трансформации обнаруживаются уже не только в поверхностных, но и в подземных водах.

Значительным источником поступления ксенобиотиков в водную среду являются сточные воды лакокрасочных и текстильных, фармацевтических и химических производств. Данные токсиканты способны наносить ущерб объектам окружающей среды, отрицательно влиять на водную биоту, почвы и экосистему в целом [5–9]. Поэтому объектами данного исследования были выбраны модельные растворы красителей, фармацевтические препараты и пестициды.

Создание локальных очистных сооружений требует изучения массива экспериментальных данных по возможности применимости того или иного метода деструкции на различного рода загрязнителях [10–15], который впоследствии может быть положен в основу технологии очистки. Поскольку сточные воды богаты множеством загрязнителей, то изучение деструктивных особенностей загрязнителей различного класса, а также влияние концентрации, pH, совместного присутствия необходимо для формирования единого кластера данных для детального изучения механизма реакции.

Ранее нами была изучена деструкция некоторых азокрасителей, тетрациклинов и нитропроизводных фенола под действием УФ-облучения при pH близком к нейтральному (pH 5) [16], а также их смесей [17]. Целью данной работы являлось изучение влияния pH на деструктивные процессы изучаемых модельных систем ксенобиотиков. Также в данной работе изучали влияние pH на деструктивные процессы смесей ксенобиотиков: интерес представляло

исследование взаимного влияния субстратов на процесс деструкции многокомпонентной смеси, так как в природных объектах они накапливаются совместно. В качестве метода деструкции применяли УФ-облучение.

## Материалы и методы

Объектами исследования в работе являлись модельные вещества различного назначения: красители, лекарственные препараты и пестициды [16, 18, 19].

Из красителей было выбрано два металлохромных индикатора: эриохром чёрный Т (ЭХЧТ / ЕВТ) и эриохром синий (ЭС / ЕВ) классификации ЧДА, общая информация о которых сведена в табл. 1.

Из лекарственных препаратов были выбраны тетрациклин (Т / Т), доксициклин (Д / D) и фурацилин (Ф / F).

Из пестицидов были выбраны 4-нитрофенол (НФ / NPh), 2,4-динитрофенол (2,4-ДНФ / 2.4dNPh) и 2,6-динитрофенол (2,6-ДНФ / 2.6dNPh), реактивы классификации ЧДА, характеристики даны в табл. 1.

Во всех экспериментах изучена деструкция водных растворов субстратов при постоянной температуре 20°C.

За изменением концентрации субстратов следили спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Specord Plus 210 в диапазоне волн от 190 до 600 нм с шагом 1 нм. Концентрация всех исследуемых веществ была одинакова и составляла 0,08 ммоль/л.

Для изучения взаимного влияния субстратов изучали смеси краситель – субстрат, взятых в соотношении 1:1, при средних изученных значениях концентраций 0,08 мМ. Для количественного определения субстратов в двухкомпонентной смеси использовали метод спектрофотометрии с наложением спектров поглощения, основанный на законе аддитивности оптической плотности. Поскольку спектры поглощения перекрываются частично, использовали максимум поглощения длинноволнового диапазона для определения содержания красителя, при котором нет поглощения света другим компонентом, а длину волны, при которой поглощают свет оба компонента смеси, использовали для расчета вклада субстрата с вычитанием красителя, определенного по градуировочному графику (рис. 1–3). Градуировочные графики красителей при pH 5 представлены в работе [17].



Таблица 1 / Table 1

**Изучаемые вещества  
Compounds under study**

Название исследуемого образца / Name of the reagents	Структурная формула / Structural formula	$\lambda_{\max}$ , нм / nm	
		pH 2	pH 10
Эриохром чёрный Т / Eriochrome black T		530	540
Эриохром синий / Eriochrome blue		320 540	325 570
Тетрациклин «Биосинтез», таблетки / Tetracycline, "Biosynthesis", tablets		225 280 365	280 340 450
Доксициклин «Велфарм», капсулы / Doxycycline "Velpharm", capsules		270 350	245 290 380
Фурацилин «Южфарм», таблетки / Furaciline "Ugfarm", tablets		260, 380	295 457
4-нитрофенол / 4-nitrophenol		230 330	410
2,4-динитрофенол / 2,4-dinitrophenol		270 300	270 365 400
2,6-динитрофенол / 2,6-dinitrophenol		260 360	270 440

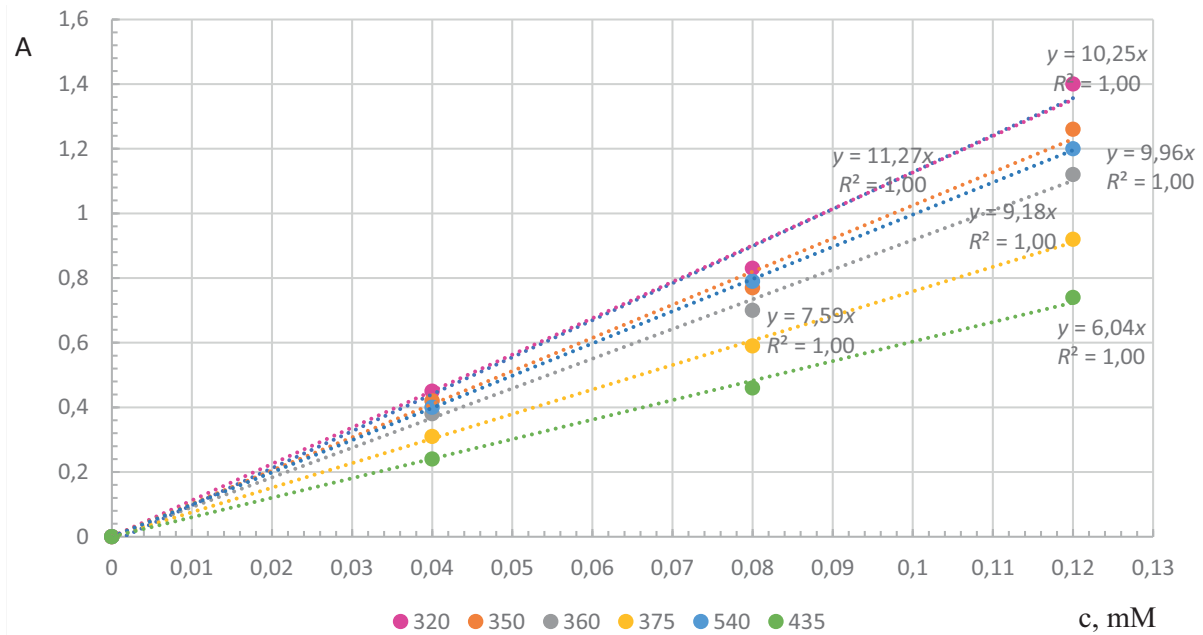


Рис. 1. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома чёрного Т при разных длинах волн при рН 2 и рН 10 (цвет онлайн)

Fig. 1. Concentration dependence on the optical density of black T eriochrome at different wavelengths for pH 2 and pH 10 (color online)

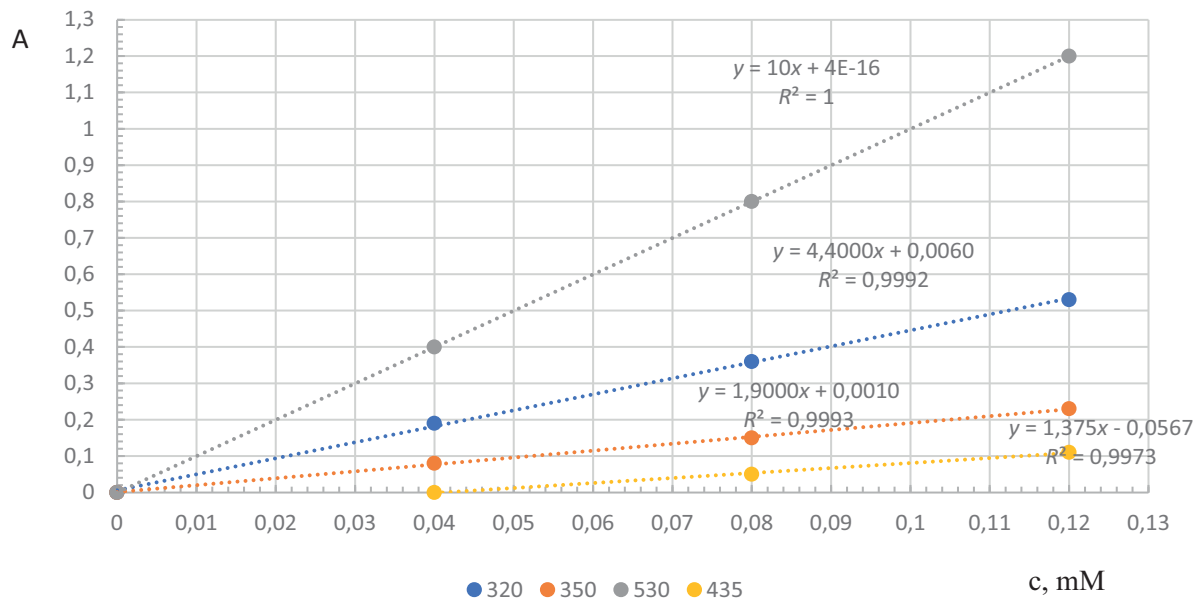


Рис. 2. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома синего при разных длинах волн при рН 2 (цвет онлайн)

Fig. 2. Concentration dependence of the optical density of Eriochrome Blue at different wavelengths for pH 2 (color online)

Для изучения влияния рН на процесс фотолиза изучаемых систем были выбраны три значения диапазона, соответствующие кислот (рН 2), близкой к нейтральной (рН 5) и щелочной средам (рН 10). Для создания необходимого рН изучаемых систем в раствор вносили гидроксид натрия 0,1М или соляную

кислоту 0,1М, реактивы классификации ЧДА, до достижения нужного значения. рН систем фиксировали с помощью рН-метра Mettler Toledo на протяжении всего процесса и поддерживали постоянным.

Фотолиз растворов проводили в фотолизной камере Вольта ФК-12М, оснащенной

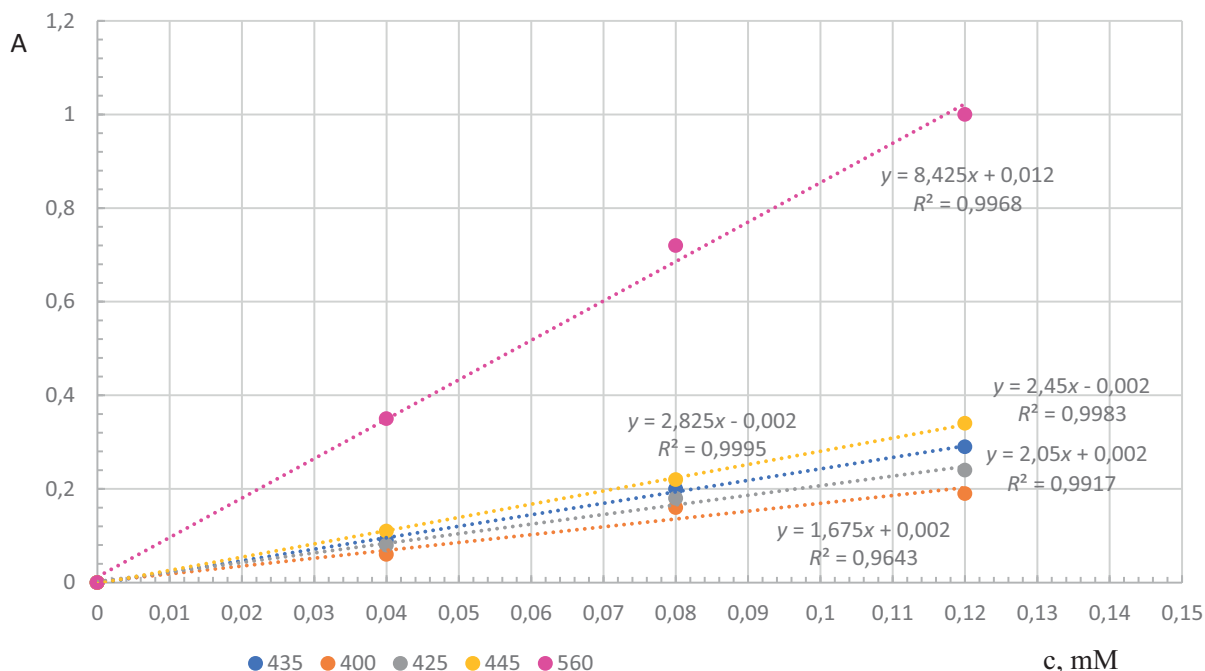


Рис. 3. Зависимость концентрации от оптической плотности эриохрома синего при разных длинах волн при pH 10 (цвет онлайн)

Fig. 3. Concentration dependence of the optical density of Eriochrome Blue at different wavelengths for pH 10 (color online)

ртутной лампой ДРТ-1000 мощностью 1000 Вт, с лучистым потоком 128 Вт. Поток излучения лампы лежит в области спектра 240–320 нм. Фотолиз проводили в течение часа [16].

### Результаты и их обсуждение

Для изучения взаимного влияния субстратов в смесях предварительно необходимо

изучить деструкцию каждого реагента отдельно. Поэтому изначально изучали деструкцию чистых компонентов. Исследование деструкции каждого образца при pH 2 и pH 10 представлено в табл. 2. Деструкция образцов при pH 5 проводилась ранее [16].

Для наглядного сравнения влияния pH на степень деструкции изучаемых субстратов построены диаграммы (рис. 4, 5).

Таблица 2 / Table 2

**Кинетические характеристики изучаемых систем**  
**Kinetic characteristics of the studied systems**

Субстрат / The substrate (S)	Степень деструкции, час % / Degree of destruction, hour %		Начальная скорость деструкции, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min	
	pH 2	pH 10	pH 2	pH 10
ЭС / EB	98,08	98,04	0,60	2,00
ЭХЧТ / EBТ	97,73	97,44	1,00	13,30
Т / Т	61,11	81,08	0,50	5,60
Д / D	71,26	81,08	2,56	5,60
Ф / F	98,36	99,17	10,60	5,90
4НФ / NPh	97,59	93,75	3,10	1,90
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	94,12	92,31	2,50	2,00
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	73,68	89,09	0,80	1,20

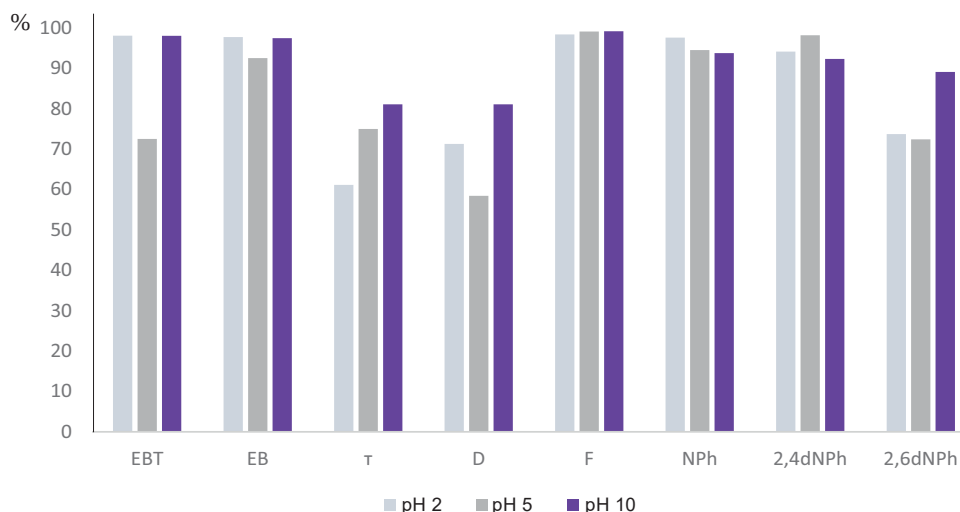


Рис. 4. Эффективность деструкции субстратов при трех значениях pH, % (цвет онлайн)  
Fig. 4. The efficiency of substrate degradation at three pH values, % (color online)

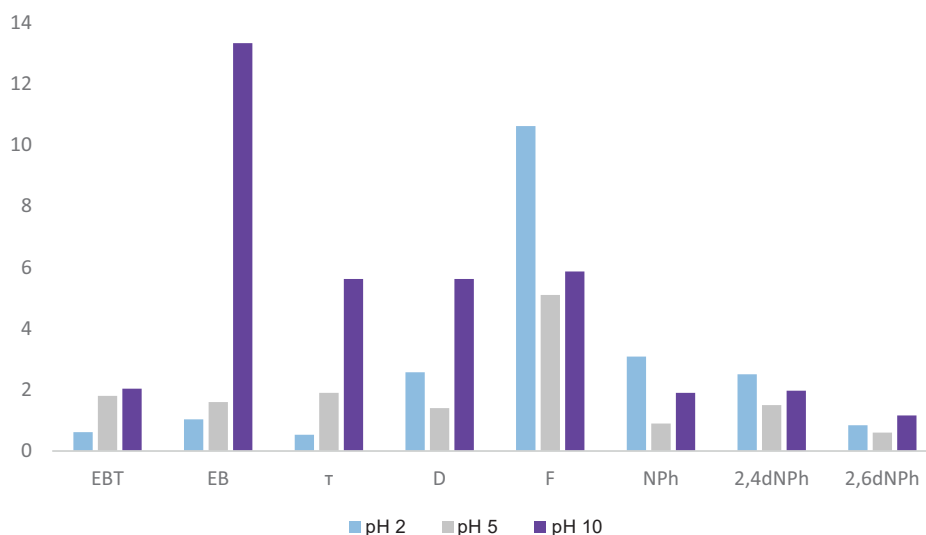


Рис. 5. Начальные скорости деструкции субстратов при трех значениях pH, мкмоль/л×мин (цвет онлайн)  
Fig. 5. Initial rates of substrate degradation at three pH values, mkmol/l×min (color online)

По росту способности к деструкции можно составить ряды:

pH 2: Т<Д<2,6-ДНФ<2,4ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭХЧТ<Ф;  
pH 5: 2,6-ДНФ<ЭХЧТ<Д<Т<ЭС<ПНФ<2,4-ДНФ<Ф;  
pH 10: Т<Д<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭХЧТ<Ф.

Видно, что в кислой и щелочной среде получен одинаковый ряд деградации субстратов. Фотодеградация фурацилина при всех изученных pH имеет максимальную степень деструкции.

Можно отметить, что инактивация исследуемых веществ высока, процесс фотолиза можно считать эффективным для поллютантов различного строения и назначения.

Далее изучали деструкцию смесей ксенобиотиков состава краситель – субстрат. В табл. 3 приведено сравнение степени деструкции чистого субстрата под действием УФ-облучения и субстрата в смеси с красителем при pH 5.

По росту способности к фотодеструкции субстратов при pH 5 можно составить ряд: в присутствии ЭС: 2,4-ДНФ<ПНФ<2,6-ДНФ<Д<Т<Ф; в присутствии ЭХЧТ: ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Т<Д<Ф.

Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии доксициклина. Видно, что фотодеградация фурацилина в смесях также имеет наибольшее значение степени деструкции.



Таблица 3 / Table 3

**Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 5**  
**Kinetic characteristics of the studied systems for pH 5**

Система / System	Степень деструкции, ч % / Degree of destruction, hour %			Начальная скорость деструкции, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min		
	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / Mixture S:C	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / mixture S:C
Смеси с эриохромом синим / Mixtures with Eriochrome Blue						
T / T	74,98	92,50	58,35 / 65,06	1,9	1,6	1,6 / 3,1
Д / D	58,42		49,99 / 37,65	1,4		1,6 / 1,3
Ф / F	99,08		<b>84,52 / 95,18</b>	5,1		4,4 / 1,5
4НФ / NPh	94,50		38,77 / 52,38	0,9		1,3 / 0,8
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	98,15		34,16 / 60,24	1,5		0,3 / 1,3
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	72,41		48,76 / 67,86	0,5		0,7 / 1,5
Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T						
T / T	74,98	72,50	37,16 / 26,56	1,9	1,8	1,1 / 1,0
Д / D	58,42		42,1 / 24,24	1,4		1,4 / 1,2
Ф / F	99,08		49,58 / 39,39	5,1		3,9 / 1,0
4НФ / NPh	94,5		21,51 / 43,75	0,9		0,3 / 1,8
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	98,15		36,72 / 38,03	1,5		0,5 / 1,1
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	72,41		28,7 / 34,67	0,5		0,2 / 1,5

Аналогично проведены эксперименты при pH 2 и pH 10. Результаты представлены в табл. 4.

По росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд при pH 2: в присутствии ЭС: Т<2,4-ДНФ<ПНФ<Д<Ф<2,6-ДНФ (рис. 6, а). Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина и доксициклина при pH 2 (рис. 7).

В присутствии ЭХЧТ: 2,4-ДНФ<2,6-ДНФ<Т<Д<ПНФ<Ф (рис. 8, а).

Аналогично, по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд при pH 10: в присутствии ЭС: Д<Т<ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Ф (см. рис. 6. б); в присутствии ЭХЧТ: Д<2,4-ДНФ <Т<ПНФ <Ф <2,6-ДНФ (см. рис. 8, б).

Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина, доксициклина и фурацилина при pH 10 (рис. 9).

Также приведено сравнение начальных скоростей деструкции чистых субстратов и их смесей при разном значении pH (табл. 5).

Таким образом, в ходе длительных измерений различных растворов и их смесей, были выявлены различные закономерности инактивации субстратов. Окисление субстратов в смеси происходит медленнее, чем для чистых компонентов.

Создание локальных очистных сооружений требует изучение массива экспериментальных данных по возможности применимости того или иного метода деструкции на различного рода загрязнителях, который



Таблица 4 / Table 4

**Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 2 и pH 10**  
**Kinetic characteristics of the studied systems for pH 2 and pH 10**

Система / System	Степень деструкции при pH 2, ч % / Degree of destruction, hour %			Степень деструкции при pH 10, ч % / Degree of destruction, hour %		
	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / Mixture S:C	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / Mixture S:C
Смеси с эриохромом синим / Mixtures with Eriochrome Blue						
T / T	61,11	97,73	35,94:75,00	81,08	97,44	69,55:82,85
Д / D	71,26		66,67:83,33	81,08		54,69:87,50
Ф / F	98,36		<b>96,05:98,82</b>	99,17		<b>97,48:78,70</b>
4НФ / NPh	97,59		63,34:98,88	93,75		77,51:98,65
2,4ДНФ / 2.4dNPh	94,12		42,40:98,86	92,31		88,74:98,63
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	73,68		96,37:98,73	98,08		82,35:98,89
Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T						
T / T	61,11	98,08	55,55:55,00	81,08	98,04	52,55:67,86
Д / D	71,26		53,49:46,67	81,08		42,53:74,07
Ф / F	98,36		<b>94,13:93,44</b>	99,17		<b>74,86:87,5</b>
4НФ / NPh	97,59		61,10:90,48	93,75		65,34:98,33
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	94,12		29,53:80,00	92,31		44,00:77,60
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	73,68		32,17:95,00	98,08		90,34:98,75

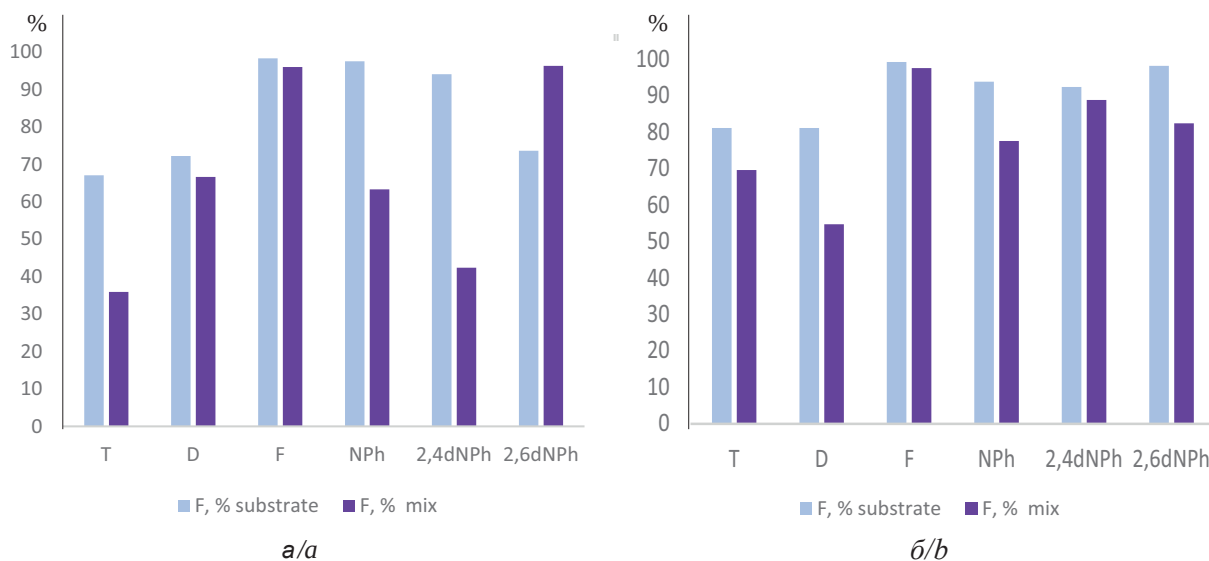


Рис. 6. Степень деструкции чистого субстрата и субстрата в смеси с красителем ЭС при pH 2 (а) и pH 10 (б), %

Fig. 6. Degree of destruction of pure substrate and substrate mixed with dye (EB) at pH 2 (a) and pH 10 (b), %



Таблица 5 / Table 5

**Кинетические характеристики изучаемых систем при pH 2 и pH 10**  
**Kinetic characteristics of the studied systems for pH 2 and pH 10**

Система / System	Начальная скорость деструкции при pH 2, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min			Начальная скорость деструкции при pH 10, мкмоль/л×мин / Initial destruction rate, mkmol/l×min		
	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / Mixture S:C	Субстрат / The substrate (S)	Краситель / The dye (C)	Смесь / Mixture S:C
Смеси с эриохромом синим // Mixtures with Eriochrome Blue						
Т / T	0,50	1,00	0,04:1,90	5,60	13,30	0,40:4,80
Д / D	2,60		2,30:5,60	5,60		1,40:2,70
Ф / F	10,60		6,40:4,50	5,90		5,00:11,22
4НФ / NPh	3,10		0,60:4,50	1,90		0,80:10,60
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	2,50		1,20:5,10	2,00		0,20:11,80
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	0,80		0,70:10,10	1,20		2,50:4,30
Смеси с эриохромом чёрным Т / Mixtures with Eriochrome Black T						
Т / T	0,50	0,60	0,90:1,30	5,60	2,00	0,06:1,60
Д / D	2,60		1,60:1,90	5,60		0,50:1,00
Ф / F	10,60		11,20:5,00	5,90		1,50:0,70
4НФ / NPh	3,10		0,90:4,10	1,90		0,20:2,90
2,4-ДНФ / 2.4dNPh	2,50		0,06:1,30	2,00		0,20:2,30
2,6-ДНФ / 2.6dNPh	0,80		0,20:0,80	1,20		4,80:3,20

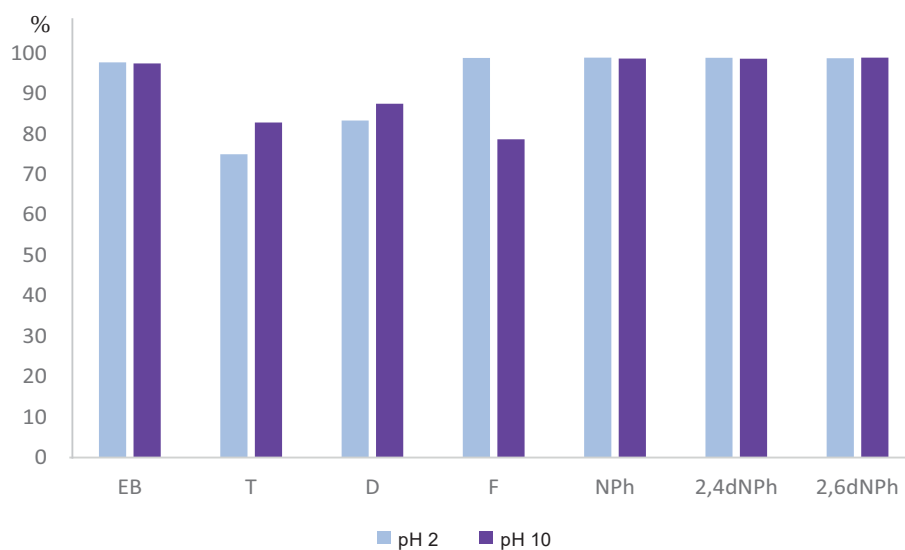


Рис. 7. Степень деструкции чистого красителя ЭС и красителя в смеси с субстратом при pH 2 и pH 10, %

Fig. 7. Degree of destruction of pure dye (EB) and dye mixed with substrate at pH 2 and pH 10, %

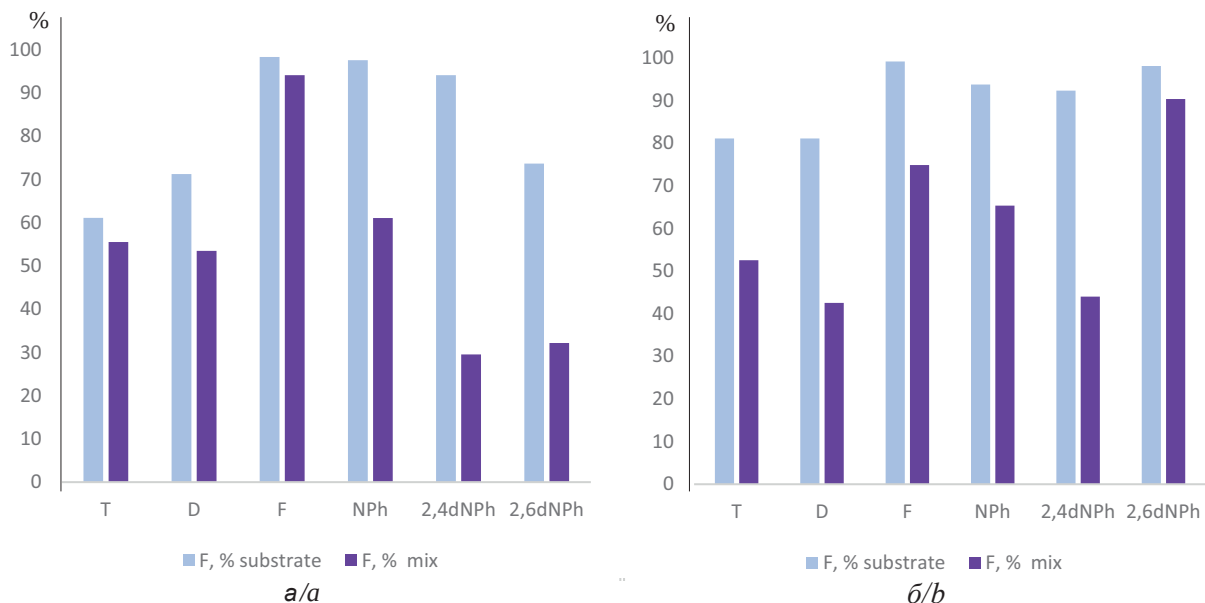


Рис. 8. Степень деструкции чистого субстрата и субстрата в смеси с красителем ЭХЧТ при pH 2 (а) и pH 10 (б), %

Fig. 8. Degree of destruction of pure substrate and substrate mixed with dye (EBT) at pH 2 (a) and pH 10 (b), %

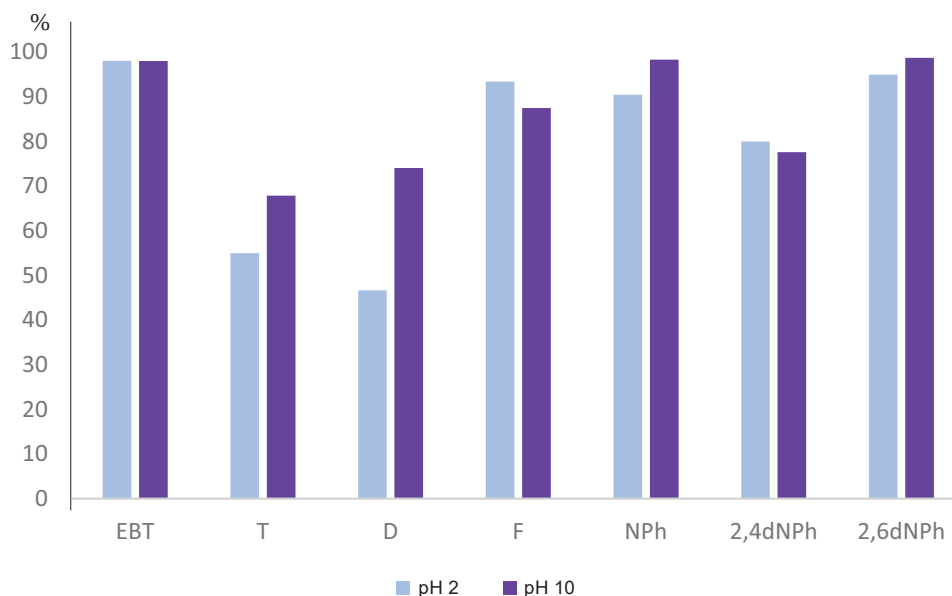


Рис. 9. Степень деструкции чистого красителя ЭХЧТ и красителя в смеси с субстратом при pH 2 и pH 10, %

Fig. 9. Degree of destruction of pure dye (EBT) and dye mixed with substrate at pH 2 and pH 10, %

впоследствии может быть положен в основу технологии очистки. Поскольку сточные воды богаты множеством загрязнителей, то изучение деструктивных особенностей загрязнителей различного класса, влияние их концентрации, pH, совместного присутствия необходимо для всестороннего анализа и моделирования механизмов деструкции.

### Заключение

Показано, что многие субстраты уже в течение первого часа подвергаются инактивации под действием УФ-облучения: труднодеструктируемым оказался тетрациклин, его степень деструкции достигает 61% при pH 2, наиболее легкодеструктируемым является фурацилин,



его степень деструкции наибольшая при любом значении рН, и более 99% при рН 10. По росту способности к деструкции составлен ряд, который одинаков для кислой и щелочной сред: Т<Д<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<ПНФ<ЭС<ЭРХЧТ<Ф. В нейтральной среде получен следующий ряд: 2,6-ДНФ<ЭХЧТ<Д<Т<ЭС<ПНФ<2,4-ДНФ<Ф.

Выявлено, что при окислении смеси субстратов скорость деструкции снижается: труднодеструктурируемым в смеси с ЭХЧТ оказался 2,4-динитрофенол, его степень деструкции достигает 29% при рН 2 (также как 2,6-динитрофенол и тетрациклин), наиболее легкодеструктурируемым является фурацилин, а также нитрофенолы в смеси в эриохромом синим в кислой среде, их степень деструкции более 98%.

Выявлено влияние рН на деструкцию субстратов в смеси: по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд в кислой среде в присутствии эриохрома синего: Т<2,4-ДНФ<ПНФ<Д<Ф<2,6-ДНФ; в присутствии эриохрома черного Т: 2,4-ДНФ<2,6-ДНФ<Т<Д<ПНФ<Ф. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина и доксициклина при рН 2. По росту способности к деструкции субстратов в нейтральной среде можно составить ряд в присутствии эриохрома синего: 2,4-ДНФ<ПНФ<2,6-ДНФ<Д<Т<Ф; в присутствии эриохрома черного Т: ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Т<Д<Ф. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии доксициклина. Аналогично, по росту способности к деструкции субстратов можно составить ряд в щелочной среде в присутствии эриохрома синего: Д<Т<ПНФ<2,6-ДНФ<2,4-ДНФ<Ф; в присутствии эриохрома черного Т: Д<2,4-ДНФ<Т<ПНФ<Ф<2,6-ДНФ. Деструкция самих красителей наименьшая в присутствии тетрациклина, доксициклина и фурацилина при рН 10.

Метод УФ-облучения может быть рекомендован для инактивации ксенобиотиков: азокрасителей, тетрациклинов и производных нитрофурана, а также нитропроизводных фенола.

#### Список литературы

1. Юркова А. А. Химическое загрязнение окружающей среды // *Colloquium-Journal*. 2021. № 18, ч. 1(105). С. 9–12. <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-18105-9-12>
2. Баренбойм Г. М. Загрязнение природных вод лекарствами. М. : Наука, 2015. 283 с.
3. Демин А. П. Сброс сточных вод и загрязнение водных объектов в бассейне реки Волга (1990–2018 гг.) // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 2020. Т. 1, № 5. С. 138–143. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143>
4. Сафонова Л. Б. Загрязнение окружающей среды химическими соединениями и отходами сельскохозяйственной промышленности // *Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 12 ноября 2015 г.)*. Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2015. Ч. 3. С. 237–244.
5. Пат. RU 2333161 С2. Состав для очистки почвы и воды от нефтяных загрязнений и способ очистки воды от нефтяных загрязнений / И. Х. Гараев, И. И. Гараев, А. И. Гараев, И. А. Гараев, М. А. Гараев. Заявка № 2006128823/13. 10.09.2008.
6. Кизилов О. А., Байкин Ю. Л., Овчинников П. Ю. Применение минеральных сорбентов при загрязнении почв тяжелыми металлами // *Вестник биотехнологии*. 2017. № 1 (11). С. 16. URL: <http://bio.urgau.ru/images/01-2017>
7. Водяницкий Ю. Н., Яковлев А. С. Загрязнение почв и почвенно-грунтовых вод новыми органическими микрополлютантами // *Почвоведение*. 2016. Т. 49, № 5. С. 609–619. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050154>
8. Оралбаев Б. С., Нурғалиев А. М. Загрязнение почв нефтепродуктами и эффективный метод их восстановления // *Молодой ученый*. 2019. № 52 (290). С. 459–462.
9. Abseit A. S., Kelesbaev K. N., Abdikarim G. G. Indicator of air pollution in Turkestan // *Международный студенческий научный вестник*. 2020. № 2. С. 137.
10. Высотина А.А., Федоров В. А., Литовченко В. И. Очистка сточных вод лесопромышленного предприятия методом флотации // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации : материалы XXI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Красноярск, 18 мая 2022 г.)*. Красноярск : СибГУ им. М. Д. Решетнева, 2022. С. 205–207.
11. Andreyuk S. V., Zan M. V. Study of methods for physico-chemical treatment of groundwater from nitrates // *Vestnik of Brest State Technical University*. 2023. № 3 (132). С. 15–17. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-15-17>
12. Hajiyeva S. R., Shamilov N. T., Bayramov G. I., Rakida N. M. Ecological effective treatment of industrial wastewater formed in the oil-producing industry by coagulation method // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2021. № 3. С. 63–66. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-3-63-66>
13. Кушаев Э. Н. Экспериментальные исследования метода озонирования в технологии очистки сточных вод газохроматографическим методом // *Интеграционные процессы в науке в современных условиях : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (Волгоград, 5 июня 2017 г.) : в 4 ч. Ч. 3*. Уфа : Аэтерна, 2017. С. 82–85.



14. Лупандина Н. С., Марченкова Е. Н. Очистка сточных вод биологическими методами и сопряженные с методом проблемы // Актуальные аспекты и перспективы развития современной биотехнологии : сб. докл. междунар. науч. конф. (Белгород, 26–28 марта 2024 г.). Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2024. С. 268–272.
15. Кащенко О. В., Киселев К. А. Комбинирование методов хлорирования и УФ-облучения // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 6 (122). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/06/95826>
16. Устинова М. Н., Золотухина К. А. Инактивация ксенобиотиков: некоторых азокрасителей, нитропроизводных фенола и тетрациклинов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 4. С. 382–391. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-382-391>, EDN: DYDGWL
17. Устинова М. Н., Золотухина К. А. Фотодеструкция смесей ксенобиотиков // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2024. № 4 (58). С. 42–55. <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.4.5>
18. Устинова М. Н., Филиппова К. А. Окислительная деструкция тетрациклинов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 23–33. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-23-33>, EDN: DUOUC
19. Устинова М. Н., Дмитрук Д. И. Инактивация фармацевтических отходов // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2024. № 3 (57). С. 137–152. <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.13>
20. Safety: Proc. of the Intern. sci. and pract. conf. (Voronezh, November 12, 2015), part 3]. Voronezh, Voronezh State Technical University Publ., 2015, pp. 237–244 (in Russian).
5. Pat. RU 2333161 C2. *Composition for treatment of soil and water from oil contamination and method of water treatment from oil contamination*. I. Kh. Garaev, I. I. Garaev, A. I. Garaev, I. A. Garaeva, M. A. Garaeva. Application No. 2006128823/13. 10.09.2008 (in Russian).
6. Kizilov O. A., Bajkin Yu. L., Ovchinnikov P. Yu. Application of mineral sorbents in soil contamination by heavy metals. *Bulletin of Biotechnology*, 2017, vol. 1 (11), pp. 16 (in Russian). Available at: <http://bio.urgau.ru/images/01-2017>
7. Vodyanitskii Y. N., Yakovlev A. S. Contamination of soil and groundwater with new organic micropollutants: A review. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 560–569. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050154>
8. Oralbaev B. S., Nurgaliev A. M. Soil pollution by petroleum products and an effective method for their restoration. *Young Scientist*, 2019, no. 52 (290), pp. 459–462 (in Russian).
9. Abseit A. S., Kelesbaev K. N., Abdikarim G. G. Indicator of air pollution in Turkestan. *International Student Scientific Magazine*, 2020, no. 2, pp. 137.
10. Vysotina A. A., Fedorov V. A., Litovchenko V. I. Waste water treatment of timber industry enterprises by flotation method. *Molodezh. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii: materialy XXI Vseros. nauch. konf. s mezhdynar. uchastiem (Krasnoyarsk, 18 maya 2022 g.)* [Youth. Society. Modern Science, Technology, and Innovations: Proc. XXI All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Krasnoyarsk, May 18, 2022)]. Krasnoyarsk, Reshetov Siberian State University of Science and Technologies Publ., 2022, pp. 205–207 (in Russian).
11. Andreyuk S. V., Zan M. V. Study of methods for physico-chemical treatment of groundwater from nitrates. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2023, no. 3 (132), pp. 15–17. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-15-17>
12. Hajiyeva S. R., Shamilov N. T., Bayramov G. I., Raki-da N. M. Ecological effective treatment of industrial wastewater formed in the oil-producing industry by coagulation method. *Azerbaijan Chemical Journal*, 2021, no. 3, pp. 63–66. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2021-3-63-66>
13. Kushaev E. N. Experimental studies of the ozonation method in wastewater treatment technology using gas chromatography. In: *Integratsionnye protsessy v nauke v sovremennykh usloviyakh: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Volgograd, 5 iyunya 2017 g.): v 4 ch. Ch. 3* [Integration Processes in Science in Modern Conditions: Proc. All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Volgograd, June 5, 2017): in 4 pt. Pt 3]. Ufa, Aeterna, 2017, pp. 82–85 (in Russian).

## References

1. Yurkova A. A. Chemical environment pollution. *Colloquium-Journal*, 2021, vol. 18, part 1 (105), pp. 9–12 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-18105-9-12>
2. Barenbojm G. M. *Zagryaznenie prirodnikh vod lekarstvami* [Pollution of natural waters by medicines]. Moscow, Nauka, 2015. 283 p. (in Russian).
3. Demin A. P. Waste discharge and water pollution in the volga river basin (1990–2018 gg). *Ecology, Economy, Informatics: System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 138–143 (in Russian). <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143>
4. Safonova L. B. Environmental pollution caused by chemical compounds and agricultural waste. *Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Voronezh, 12 noyabrya 2015 g.). Ch. 3* [Complex Problems of Technosphere



14. Lupandina N. S., Marchenkova E. N. Wastewater treatment by biological methods and problems associated with the method. In: *Aktualnye aspekty i perspektivy razvitiya sovremennoy biotekhnologii: sbornik dokl. mezhdunar. nauch. konf. (Belgorod, 26–28 marta 2024 g.)* [Actual Aspects and Prospects of Development of Modern Biotechnology: Coll. of reports of the conf. Intern. sci. (Belgorod, March 26–28, 2024)]. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov Publ., 2024, pp. 268–272 (in Russian).
15. Kashchenko O. V., Kiselev K. A. Combining methods of chlorination and UV irradiation. *Modern Scientific Researches and Innovations*, 2021, no. 6 (122) (in Russian). Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2021/06/95826>
16. Ustinova M. N., Zolotukhina K. A. Inactivation of xenobiotics: Some azo dyes, phenol nitro derivatives, and tetracyclines. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 4, pp. 382–391 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-4-382-391>, EDN: DYDGWL
17. Ustinova M. N., Zolotukhina K. A. Photodestruction of xenobiotic mixtures. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry*, 2024, no. 4 (58), pp. 42–55 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.4.5>
18. Ustinova M. N., Filippova K. A. Oxidative degradation of tetracyclines. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 23–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-23-33>, EDN: DUOUC
19. Ustinova M. N., Dmitruk D. I. Inactivation of pharmaceutical waste. *Bulletin of Tver State University. Series: Chemistry*, 2024, no. 3 (57), pp. 137–152 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.13>

Поступила в редакцию 05.08.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 20.11.2025  
The article was submitted 05.08.2025, approved after reviewing 17.11.2025, accepted for publication 20.11.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 34–46

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 34–46

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

Научная статья

УДК 544.344.016+536.445:544.344.013-16-14+66.061

## Влияние карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин



В. В. Данилина , К. Е. Зубарев, Н. О. Хлопцев, Д. Г. Черкасов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Данилина Вероника Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института химии, [daniilinaa-3@mail.ru](mailto:daniilinaa-3@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6385-2428>

Зубарев Кирилл Евгеньевич, магистрант Института химии, [zubarevk4@mail.ru](mailto:zubarevk4@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8716-0822>

Хлопцев Никита Олегович, студент Института химии, [nikitun68@gmail.com](mailto:nikitun68@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-1329-3086>

Черкасов Дмитрий Геннадиевич, доктор химических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, [dgcherkasov@mail.ru](mailto:dgcherkasov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6862-1917>

**Аннотация.** Фазовые равновесия и растворимость изучены визуально-политермическим методом в смесях компонентов по ряду сечений треугольника состава в интервале 10–60°C в тройных системах карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин). Для каждой системы определены температуры образования критической ноды монотектического состояния: в системе с триэтиламином она равна 14.0°C, с диизопропиламином 22.4°C. Изотермические фазовые диаграммы тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин построены при 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30°C, определена растворимость компонентов. Установлено, что в интервале 20.0–30.0°C на изотермах существует монотектический треугольник с примыкающими полями насыщенных растворов и расслоения. Установлено, что при введении карбоната лития в водно-аминные смеси происходит понижение НКТР: с 18.3 до 14.0°C для системы вода – триэтиламин и с 27.3 до 22.4°C для системы вода – диизопропиламин. Это указывает на высаливающее действие карбоната лития на смеси компонентов указанных бинарных систем. Оценена эффективность применения триэтиламина в процессе экстрактивной кристаллизации карбоната лития. Методом рентгенофлуоресцентного анализа показано, что использование триэтиламина в качестве антирастворителя позволяет значительно снизить содержание ряда примесей (Cu, Ni, Al, S) и полностью удалить некоторые из них (Mn, Cr, Pm). Таким образом, подтверждена принципиальная возможность очистки карбоната лития с помощью экстрактивной кристаллизации.

**Ключевые слова:** фазовая диаграмма, растворимость, экстрактивная кристаллизация, карбонат лития, диизопропиламин, триэтиламин

**Благодарности.** Авторы благодарят центр коллективного пользования СГУ, доцента А. В. Ушакова за регистрацию и интерпретацию рентгеновских дифрактограмм, профессора М. М. Бурашникову за проведение рентгенофлуоресцентного анализа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-79-00095, <https://rscf.ru/project/24-79-00095/>).

**Для цитирования:** Данилина В. В., Зубарев К. Е., Хлопцев Н. О., Черкасов Д. Г. Влияние карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 34–46. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Effect of lithium carbonate on the solubility and phase behavior of water–diisopropylamine and water–triethylamine binary systems

V. V. Danilina , K. E. Zubarev, N. O. Khloptsev, D. G. Cherkasov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Veronica V. Danilina, [daniilinaa-3@mail.ru](mailto:daniilinaa-3@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6385-2428>

Kirill E. Zubarev, [zubarevk4@mail.ru](mailto:zubarevk4@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8716-0822>

Nikita O. Khloptsev, [nikitun68@gmail.com](mailto:nikitun68@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-1329-3086>

Dmitry G. Cherkasov, [dgcherkasov@mail.ru](mailto:dgcherkasov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6862-1917>



**Abstract.** Phase equilibria and solubility have been studied by the visual polythermal method in mixtures of components along a series of sections of the composition triangle within the temperature range of 10–60°C in the ternary systems lithium carbonate – water – diisopropylamine (triethylamine). For each system, the temperatures of formation of the critical node of the monotectic state have been determined: in the system with triethylamine, it is 14.0°C, and with diisopropylamine, it is 22.4°C. Isothermal phase diagrams of the ternary system lithium carbonate – water – diisopropylamine have been constructed at 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3, and 30°C, and the component solubility was determined. It has been established that in the temperature range of 20.0–30.0°C, the isotherms feature a monotectic triangle adjacent to the fields of saturated solutions and phase separation. It has been found that the introduction of lithium carbonate into water-amine mixtures leads to a decrease in the Lower Critical Solution Temperature (LCST): from 18.3 to 14.0°C for the water – triethylamine system and from 27.3 to 22.4°C for the water – diisopropylamine system. This indicates a salting-out effect of lithium carbonate on the component mixtures of the specified binary systems. The efficiency of using triethylamine in the process of extractive crystallization of lithium carbonate has been evaluated. X-ray fluorescence analysis has demonstrated that the use of triethylamine as an antisolvent allows for a significant reduction in the content of a number of impurities (Cu, Ni, Al, S) and the complete removal of some of them (Mn, Cr, Pm). Thus, the fundamental possibility of purifying lithium carbonate via extractive crystallization has been confirmed.

**Keywords:** phase diagram, solubility, extractive crystallization, lithium carbonate, diisopropylamine, triethylamine

**Acknowledgments.** The authors thank the Saratov State University Shared Use Center, Associate Professor Arseny V. Ushakov for recording and interpreting X-ray diffraction patterns, and Professor Marina M. Burashnikova for conducting X-ray fluorescence analysis.

The research has been carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 24-79-00095, <https://rscf.ru/project/24-79-00095/>).

**For citation:** Danilina V. V., Zubarev K. E., Khloptsev N. O., Cherkasov D. G. Effect of lithium carbonate on the solubility and phase behavior of water–diisopropylamine and water–triethylamine binary systems. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 34–46 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-34-46>, EDN: ETJXCS

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Одним из перспективных способов получения чистых солей является экстрактивная кристаллизация. Органический растворитель, называемый антирастворителем, добавляют в водный раствор соли, что приводит к значительному снижению ее растворимости и выпадению в осадок.

Актуальность данного способа получения солей заключается в его меньшей энергозатратности по сравнению с традиционным упариванием растворов [1–3]. Второе преимущество – возможность извлечения солей, для которых традиционный способ является малоэффективным. Это особенно относится к карбонату лития, который имеет небольшой отрицательный температурный коэффициент растворимости. Третье преимущество заключается в совмещении процесса кристаллизации с одновременной очисткой получаемых кристаллов от примесей [2, 4–6]. Среди антирастворителей наиболее перспективными являются те, которые вызывают расслаивание при введении в водные растворы солей. Это позволяет отделить органическую фазу, регенерировать из нее антирастворитель и использовать его повторно. Установлено [7, 8], что наилучшим сочетанием физико-химических свойств среди антирастворителей обладают алифатические амины. Основываясь на нашем опыте работы

[9–11] с соединениями этого класса, в качестве антирастворителей выбраны триэтиламин и диизопропиламин.

В литературе были найдены несколько работ [12–16], посвященных влиянию солей лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода–органический растворитель. Авторы работы [12] изучали четыре тройные системы сульфат (формиат) лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) для выяснения возможности применения этих аминов в процессе экстрактивной кристаллизации солей. Для проведения регенерации аминов была выбрана температура 20°C. Процесс кристаллизации соли в системе сульфат лития – вода – триэтиламин проводили при температуре равной 2°C, а для системы с диизопропиламином был предложен интервал от –5 до 1°C. Для двух тройных систем формиат лития – вода – триэтиламин (диизопропиламин) была выбрана температура кристаллизации равная 1°C. Был сделан вывод, что триэтиламин и диизопропиламин являются перспективными антирастворителями. Однако для получения сульфата и формиата лития выгоднее использовать триэтиламин, так как его содержание в органической фазе больше, чем диизопропиламина, а содержание обоих аминов в водной фазе практически одинаково.

В [13] приведены результаты изучения фазовых равновесий четырех тройных систем



пропан-1-ол + вода + хлорид натрия, пропан-1-ол + вода + хлорид калия, пропан-2-ол + вода + хлорид лития и пропан-2-ол + вода + бромид лития при атмосферном давлении. Фазовое поведение этих смесей демонстрирует трехфазное равновесие двух жидких фаз и паровой фазы. Построены фрагменты фазовых диаграмм для этих систем, изображающие участки бинодальных кривых при температурах кипения смесей и атмосферном давлении.

Данные о равновесии жидкость – жидкость для расслаивающихся тройных систем вода + 1-бутанол + соль были измерены при 25°C [14]. В качестве солей использовали хлорид лития, бромид натрия и иодид калия. Системы сравнивали с точки зрения эффективности высаливания и эффектов сольватации. Предполагается, что процесс сольватации в органической фазе различен для всех трех солей. Сольватация NaBr, по-видимому, осуществляется только водой, в то время как для LiCl и KI наблюдаются смешанные эффекты сольватации. Все три соли оказывают сильный эффект высаливания 1-бутанола из водной фазы, эффективность которого снижается в ряду LiCl > NaBr > KI.

В статье [15] экспериментально представлены данные о равновесии твердое–жидкость–жидкость для тройных систем вода–LiCl–2-бутанол, вода–LiCl–2-метил-1-пропанол и вода–LiCl–1-бутанол при 25°C. Построенные фазовые диаграммы показывают различия между системами. В системе с 1-бутанолом твердая фаза равновесия жидкость–жидкость–твердое представляет собой моногидрат хлорида лития. Однако в системах с 2-бутанолом и 2-метил-1-пропанолом в равновесии с двумя жидкими фазами находится безводная соль. В области двух жидких фаз три диаграммы очень похожи и имеют необычную S-образную форму бинодальной кривой.

Данные о равновесии жидкость – жидкость и жидкость – твердое в тройной системе вода + LiCl + 2-метил-2-пропанол (трет-бутанол) были определены экспериментально при 25 и 40°C в работе [16]. В системе проявляется заметный эффект высаливания: введение небольших количеств LiCl в гомогенные смеси вода + 2-метил-2-пропанол вызывает их расслаивание. Авторам не удалось определить состав твердой фазы, находящейся в равновесии с двумя жидкими фазами. Предполагается, что соль может

образовывать смешанный сольват, содержащий как молекулы воды, так и 2-метил-2-пропанола.

Авторы работ [15, 16] делают попытку объяснить такую необычную S-образную форму бинодальной кривой участием органического растворителя в сольватации ионов лития: в органической фазе вода и органический растворитель конкурируют за сольватацию ионов. Известно, что ионный радиус Li<sup>+</sup> намного меньше, чем у Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>. Высокая удельная поверхностная плотность заряда иона Li<sup>+</sup> может индуцировать ион-дипольные взаимодействия между ионом Li<sup>+</sup> и молекулами бутанола, которые могут сольватировать ион. Это может быть причиной того, что растворимость LiCl в бутанолах высока (выше 10 мас. %).

В литературе нет сведений о влиянии карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – триэтиламин и вода – диизопропиламин. Цель нашего исследования состояла в выявлении влияния карбоната лития на растворимость и фазовое поведение двойных систем вода – диизопропиламин и вода – триэтиламин путем изучения фазовых равновесий в тройных системах карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) в широком интервале температур и оценка возможности очистки карбоната лития в процессе экстрактивной кристаллизации под действием триэтиламина. Указанные тройные системы впервые изучены в настоящей работе.

В тройные системы карбонат лития – вода – диизопропиламин и карбонат лития – вода – триэтиламин входят четыре двойных составляющих системы. Кратко охарактеризуем растворимость и фазовые равновесия в них.

**Двойная система вода – карбонат лития.** Диаграмма растворимости двойной системы карбонат лития – вода изучена в широком интервале температур [17, 18]. Карбонат лития мало растворим в воде, его растворимость увеличивается с понижением температуры, т.е. эта соль имеет отрицательный температурный коэффициент растворимости, не образует кристаллогидратов.

**Двойная система вода – диизопропиламин.** Растворимость компонентов двойной системы исследована в работах [3, 7, 9, 19, 20]. Приведенные в [3, 20] критические температуры различаются, и состав критического раствора не указывается. В работе [21] иссле-



довали растворимость компонентов двойной системы в интервале от 20 до 90°C. Отмечено, что указанная жидкостная система характеризуется нижней критической температурой растворения (НКТР) при 27.3°C. Нами [11] продолжено изучение смесей компонентов двойной системы визуально-политермическим методом при температурах ниже нуля градусов для определения границ поля кристаллизации льда. Установлено, что кривая кристаллизации льда пологая и имеет короткий горизонтальный участок в области составов, отвечающих критическим смесям.

#### **Двойная система вода – триэтиламин.**

Эта двойная система характеризуется расщеплением с НКТР, определенные значения которой многочисленны и различаются в пределах от 17.55°C [22] до 18.7°C [23]. Наибольшие расхождения наблюдаются в части диаграммы растворимости, отвечающей интервалу 18–30°C. НКТР, приводимые авторами, имеют следующие значения: 17.55°C [22], 17.6°C [24, 25], 18.24°C [26, 27], 18.3°C [28, 29], 18.33°C [30], 18.36°C [31], 18.39°C [32], 18.6°C [33], 18.7°C [23]. Содержание амина в смеси, отвечающей НКТ, значительно различается: 25.8 мас.% [23], ~30 мас.% [22], 32.2 мас.% [30], 35.15 мас.% [31], 35.4 мас.% [24], 51.90 мас.% [33]. Рассматриваемая двойная система была повторно исследована в нашей лаборатории [34]. Координаты нижней критической точки ( $t=18.3^\circ\text{C}$ , содержание триэтиламина в критическом растворе 32.10 мас.%) и результаты определения взаимной растворимости компонентов хорошо согласуются с данными работы [30]. В работе [28] приведена фазовая диаграмма двойной системы триэтиламин – вода, на которой отмечен плавящийся конгруэнтно при  $-22^\circ\text{C}$  дигидрат триэтиламина.

**Система карбонат лития – диизопропиламин (триэтиламин).** Данные по растворимости карбоната лития в аминах в литературе не обнаружены. Проведенные нами исследования показали, что эта соль практически не растворима в указанных растворителях во всем интервале температуры исследования.

#### **Материалы и методы**

Деионизированная вода высокой чистоты (удельное электрическое сопротивление 18 МОм·см при 25°C) была получена с исполь-

зованием системы очистки воды «Спектр Осмос». Препарат триэтиламина квалификации «ч» (Вектон, Россия) очищали по методике [35]. Сначала его осушали щелочью (KOH) в течение трех дней, затем фильтрат перегоняли на установке с елочным дефлегматором высотой 0.3 м. Для работы отбирали фракцию с температурой кипения 90.0–91.0°C. Растворитель идентифицировали по температуре кипения ( $t_{\text{кип}} = 89.4^\circ\text{C}$ ) и показателю преломления ( $n_D^{20} = 1.4007$ ). Физико-химические константы в пределах погрешности совпали с литературными данными [36]. Показатели преломления измеряли на рефрактометре ИРФ-22 с погрешностью  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ . Препарат диизопропиламина (ACROSS ORGANICS, содержание основного вещества  $\geq 99.0\%$ ) дополнительной очистке не подвергался, поскольку его физико-химические константы в пределах погрешности совпали с литературными данными [36].

Карбонат лития «х.ч.» (Новосибирский завод редких металлов, содержание основного вещества  $\geq 99.0\%$ ) тонко растирали в агатовой ступке и сушили над оксидом фосфора (V) при 120°C до постоянной массы. Отсутствие влаги в соли контролировали термогравиметрическим анализом.

Визуально-политермический метод описан в [37]. Методология его применения к тройным системам соль–два растворителя подробно изложена в [38]. Растворимость и фазовые равновесия в смесях компонентов тройных систем карбонат лития – вода – диизопропиламин (триэтиламин) исследовали этим методом в запаянных термостойких стеклянных ампулах при давлении паров растворителей и воздуха в интервале температур 10–60°C. Запаянные стеклянные ампулы со смесями поочередно помещали в ультратермостат Lauda A-100 с прозрачными стенками (рабочая жидкость – дистиллированная вода). В термостате температуру поддерживали с точностью 0.1°C и измеряли электронным термометром ЛТ-300-Н. Нагревание и охлаждение рабочей жидкости около температуры фазового перехода проводили со скоростью 0.5 град/мин. Каждое значение температуры фазового перехода являлось средним результатом нескольких повторных измерений и характеризовалось погрешностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Твердую фазу насыщенных растворов идентифицировали с помощью термического (дериватограф OD-102, MOM,



Венгрия) и рентгенофазового (дифрактометр ДРОН-8Т) анализов. Установлено, что твердой фазой при всех температурах интервала исследования являлся карбонат лития.

По результатам политермических исследований для каждого сечения концентрационного треугольника были построены политермы фазовых состояний. Они представляют собой зависимости температуры фазового перехода от содержания одного из компонентов в смесях. Используя политермы графической интерполяции, были определены составы смесей, соответствующие точкам фазовых переходов при выбранных нами температурах. Затем при этих температурах были построены изотермические фазовые диаграммы тройной системы [38]. Относительная погрешность определения составов смесей, отвечающим точкам фазовых переходов, составила  $\pm 0.5\text{--}1.0\%$ .

Элементный состав карбоната лития, полученного в процессе экстрактивной кристаллизации, определяли рентгенофлуоресцентным методом с применением энергодисперсионного анализатора EDX-720 (производитель SHIMADZU, Япония). Для возбуждения спектра использовалась рентгеновская трубка с Rh-анодом (напряжение 50 кВ, ток 100 мкА).

## Результаты и их обсуждение

### Тройная система карбонат лития – вода – диизопропиламин

Визуально-политермическим методом в интервале от 10 до 60°C изучены фазовые равновесия в смесях компонентов тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин, составы которых изменялись по пяти сечениям концентрационного треугольника.

Сечения I–IV характеризовались переменным содержанием карбоната лития и постоянным соотношением масс амина и воды: 10 : 90 (I), 25 : 75 (II), 40 : 60 (III), 60 : 40 (IV). Политермы фазовых состояний по сечениям I–IV аналогичны и состоят из четырех кривых, сходящихся в одной точке и отделяющих друг от друга четыре поля фазовых состояний: ненасыщенные растворы  $\ell$ , насыщенные растворы  $\ell + S$  ( $S$  – карбонат лития), расслоение  $\ell_1 + \ell_2$  ( $\ell_1$  – органическая фаза,  $\ell_2$  – водная фаза) и монотектика  $\ell_1 + \ell_2 + S$ . В качестве примера на рис. 1 представлены политермы сечений I и II. Ввиду малой растворимости соли, кривые, отделяющие поле монотектики от поля расслоения и поле насыщенного раствора от ненасыщенного раствора, экспериментально не были определены и на рис. 1 представлены пунктиром.

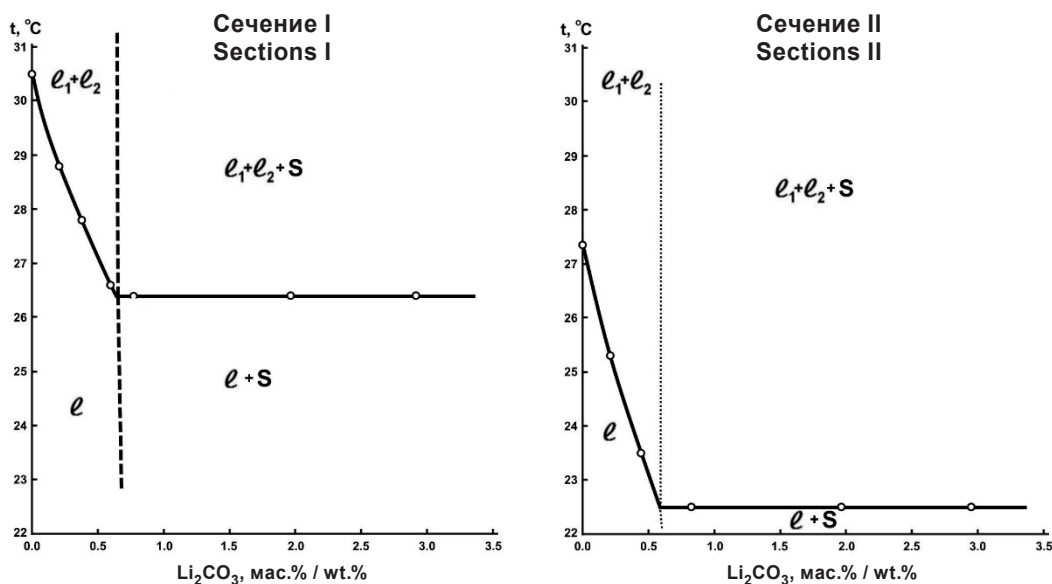


Рис. 1. Политермы фазовых состояний смесей компонентов по сечениям I, II треугольника тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин

Fig. 1. Polytherms of phase states of mixtures of components in sections I, II of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–diisopropylamine

Сечение V характеризовалось переменным содержанием диизопропиламина и постоянным соотношением масс карбоната лития и

воды: 5:95. На политерме (рис. 2) две плавные кривые, соединяющиеся в точке KS, отделяют поля насыщенных растворов  $\ell_1+S$  и  $\ell_2+S$  от поля



монотектики  $l_1+l_2+S$ . Введение карбоната лития в двойную систему вода – диизопропиламин понижает НКТР с 27.3 до 22.4°C вследствие

эффекта высаливания солью. На рис. 2 для сравнения приведена бинодальная кривая двойной системы вода – диизопропиламин [11].

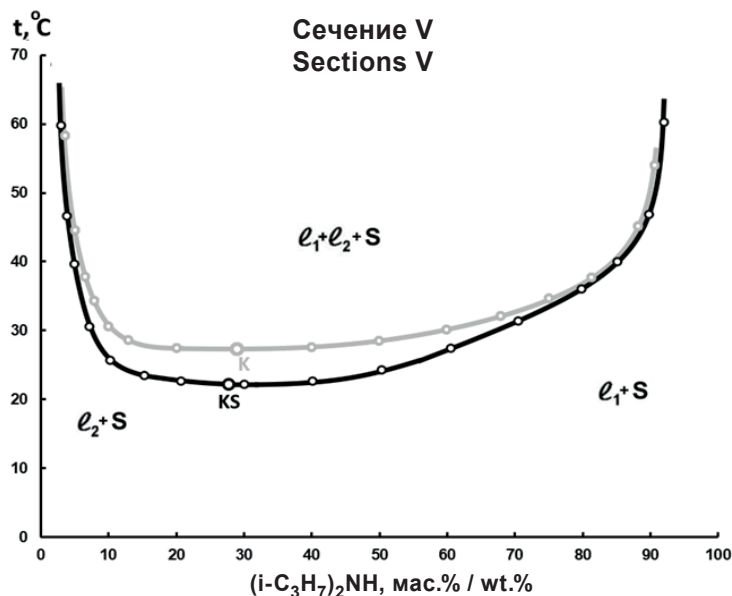


Рис. 2. Политерма фазовых состояний смесей компонентов по сечению V треугольника тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин (черные точки и кривая) в сравнении с двойной жидкостной системой вода – диизопропиламин (серые точки и кривая)

Fig. 2. Polytherm of phase states of mixtures of components in section V of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–diisopropylamine (black dots and curve) in comparison with the water – diisopropylamine binary liquid system (gray dots and curve)

Найдено содержание карбоната лития и диизопропиламина в водной и органической фазе монотектического состояния при различных температурах (рис. 3). На основании

полученных политермических данных построены изотермические фазовые диаграммы при шести температурах: 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30.0°C.

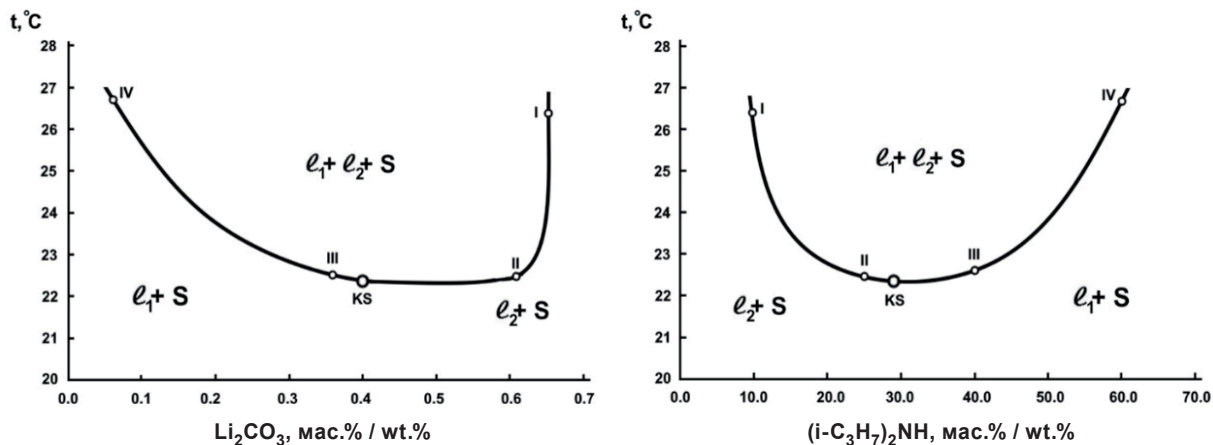


Рис. 3. Зависимость содержания карбоната лития и диизопропиламина в водной и органической фазе монотектического состояния по сечениям I–IV

Fig. 3. Dependence of the content of lithium carbonate and diisopropylamine in the aqueous and organic phases of the monotectic state in sections I–IV



При температуре 15.0°C диаграмма системы характеризуется наличием линии растворимости, разделяющей поля гомогенно-жидкого состояния  $\ell$  и насыщенных растворов  $\ell+S$  (рис. 4). При повышении температуры до 20.0°C поле гомогенно-жидкого состояния незначительно увеличивается вследствие увеличения растворимости карбоната лития в водно-диизопропиламинных растворах. При 22.4°C на линии растворимости появляется критическая точка К, соответствующая смеси, в которой две жидкие

фазы идентичны по составу и свойствам, поле гомогенно-жидкого состояния  $\ell$  незначительно увеличивается. Критическая жидкая фаза К находится в равновесии с твердой фазой S ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), следовательно, возникает критическая нода KS монотектического равновесия. Состав критической жидкой фазы К (0.4 мас.%  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , 70.7 мас.%  $\text{H}_2\text{O}$ , 28.9 мас.%  $(i\text{-C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}$ ) определяли графически на концентрационном треугольнике по точке пересечения критической ноды с линией растворимости при 22.4°C.

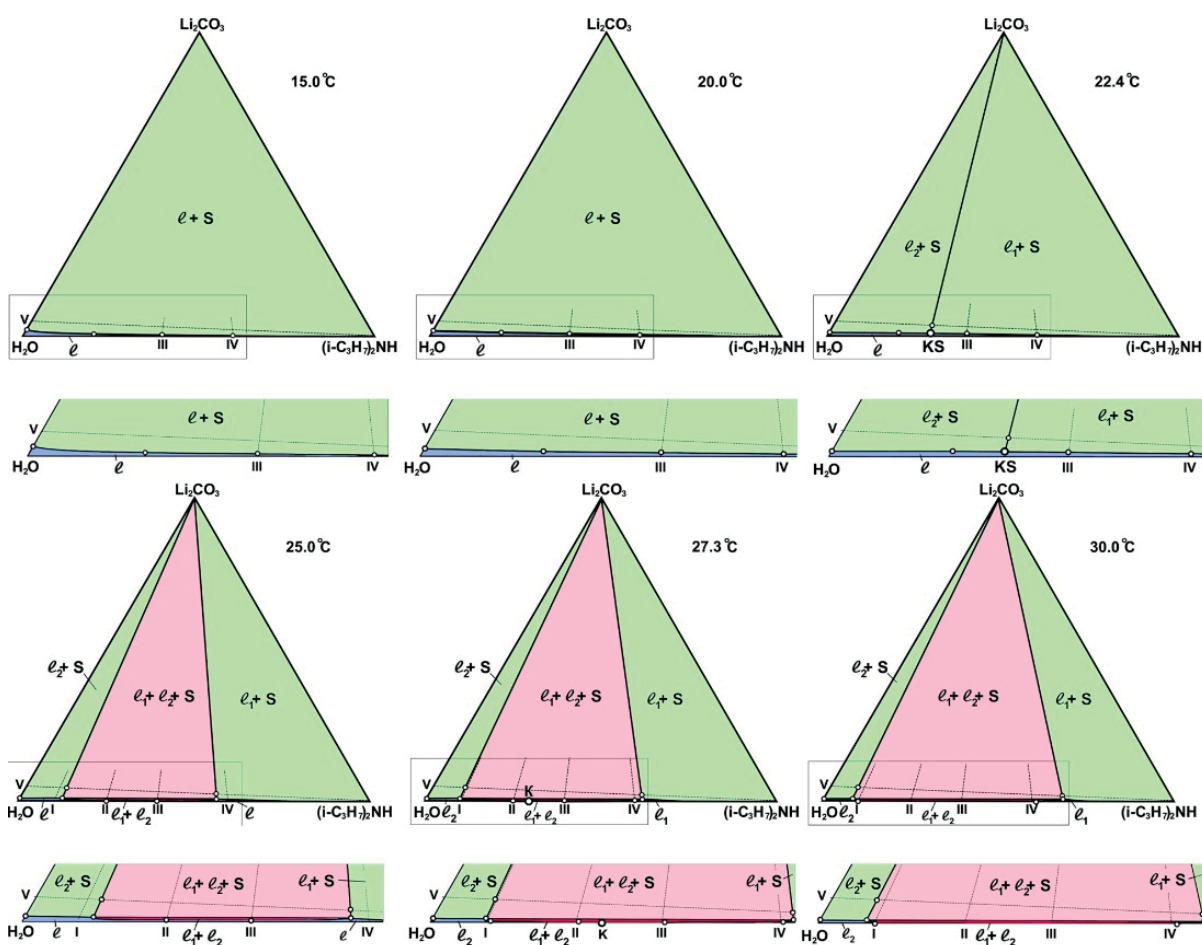


Рис. 4. Изотермы фазовых состояний (мас.%) тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин при 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 и 30.0°C

Fig. 4. Isotherms of phase states (wt.%) of the ternary system lithium carbonate – water – diisopropylamine at 15.0, 20.0, 22.4, 25.0, 27.3 and 30.0°C

С повышением температуры, как видно из изотермы при 25.0°C (рис. 5), критическая нода KS трансформируется в монотектический треугольник  $\ell_1+\ell_2+S$  с примыкающими к нему полями насыщенных растворов  $\ell_1+S$ ,  $\ell_2+S$  и небольшим полем расслоения  $\ell_1+\ell_2$ . С дальнейшим повышением температуры размер поля расслоения увеличивается и оно касается стороны

треугольника состава вода – диизопропиламин при 27.3°C, что соответствует НКТР этой двойной системы. Поля насыщенных растворов уменьшаются с ростом температуры. Значения растворимости карбоната лития в воде при указанных температурах были определены методом графической интерполяции по кривой растворимости, построенной по справочным данным [39].

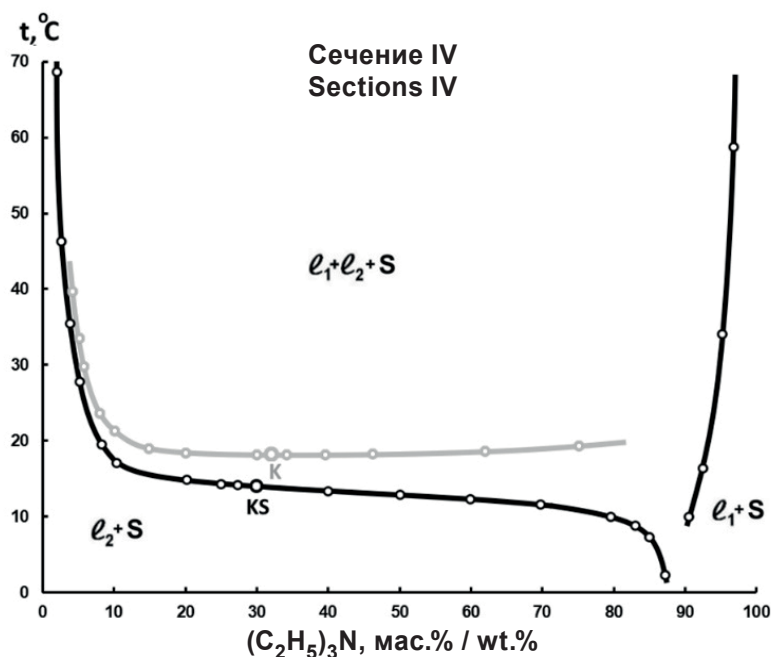


Рис. 5. Политерма фазовых состояний смесей компонентов по сечению I треугольника тройной системы карбонат лития – вода – триэтиламин (черные точки и кривая) в сравнении с двойной жидкостной системой вода – триэтиламин (серые точки и кривая)

Fig. 5. Polytherm of phase states of mixtures of components in section I of the triangle of the composition of the ternary system lithium carbonate–water–triethylamine (black dots and curve) in comparison with the water – triethylamine binary liquid system (gray dots and curve)

### Тройная система карбонат лития – вода – диизопропиламин

В данной тройной системе визуально-политермическим методом были изучены фазовые равновесия в смесях компонентов, составы которых изменялись по четырем сечениям треугольника состава тройной системы карбонат лития – вода – триэтиламин в интервале от 10 до 60°C.

Сечения I–III характеризовались переменным содержанием карбоната лития и постоянным соотношением масс амина и воды: 10:90 (I), 25:75 (II), 40:60 (III). Политермы фазовых состояний по указанным сечениям рассматриваемой системы аналогичны ранее описанным для тройной системы карбонат лития – вода – диизопропиламин.

Сечение IV характеризовалось постоянным содержанием карбоната лития и воды (5:95) и переменным содержанием триэтиламина. При введении карбоната лития в двойную систему вода – триэтиламин происходит понижение НКТР с 18.3 до 14.0°C (см. рис. 5). При этом данная температура не является минималь-

ной температурой, при которой существует расслаивание в тройной системе карбонат лития – вода – триэтиламин. В области растворов, богатых амином, существует еще один компонент – дигидрат триэтиламина [28]. Он влияет на растворимость двойной системы вода – триэтиламин и система ведет себя как псевдочетырехкомпонентная. Нами было найдено содержание карбоната лития и триэтиламина в водной и органической фазах монотектического состояния и построены их зависимости от температуры (рис. 6).

### Экстрактивная кристаллизация карбоната лития в тройных системах соль – вода – триэтиламин

Для оценки изменения содержания примесей в исходном препарате карбоната лития после проведения экстрактивной кристаллизации был проведен рентгенофлуоресцентный анализ осажденного и высушенного препарата, полученного введением триэтиламина (80 мас.%) в насыщенный раствор этой соли при 25°C. Из результатов рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что элементный состав примесей в

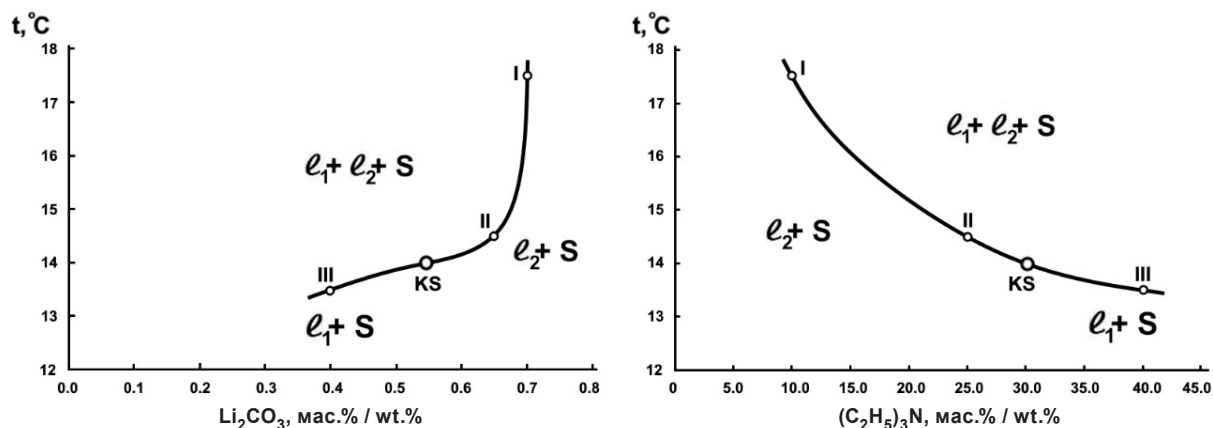


Рис. 6. Зависимость содержания карбоната лития и триэтиламина в водной и органической фазе монотектического состояния по сечениям I–III

Fig. 6. Dependence of the content of lithium carbonate and triethylamine in the aqueous and organic phases of the monotectic state in sections I–III

карбонате лития до и после экстрактивной кристаллизации отличается. Главные изменения коснулись марганца, хрома и прометия, примеси которых не обнаружены после проведения экстрактивной кристаллизации. Содержание меди и никеля сократилось более чем в два раза, алюминия и серы почти в 10 раз.

После экстрактивной кристаллизации было замечено присутствие бария, кальция, ванадия, калия, цинка и скандия, которые в исходном карбонате не обнаруживались. Можно предположить, что произошло концентрирование этих примесей из раствора исходной соли. Кроме этого, анализ показал небольшое увеличение содержания кремния после проведения процесса, которое можно объяснить растворением стекла в щелочных водных растворах карбоната лития, возникающих вследствие значительного гидролиза этой соли. Таким образом, в результате экстрактивной кристаллизации удалось значительно снизить содержание ряда примесей, а некоторые – полностью удалить.

### Заключение

Впервые изучена растворимость компонентов и фазовые равновесия для смесей компонентов по ряду сечений треугольника состава тройных систем карбонат лития – вода – триэтиламин (диизопропиламин) в интервале от 10 до 60.0°C. Определена температура образования критической ноды монотектического состояния: в системе с триэтиламином она равна 14.0°C, с диизопропиламином 22.4°C.

Установлено, что при введении карбоната лития в водно-аминные смеси происходит понижение с 18.3 (НКТР) до 14.0°C для системы вода – триэтиламин, и с 27.3 (НКТР) до 22.4°C для системы вода – диизопропиламин. Это указывает на высаливающее действие карбоната лития на данные двойные системы.

Проведена оценка возможности очистки карбоната лития в процессе экстрактивной кристаллизации под действием триэтиламина с использованием рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что в результате экстрактивной кристаллизации удалось значительно снизить содержание ряда примесей (Cu, Ni, Al, S), а некоторые – полностью удалить (Mn, Cr, Pm). Таким образом, триэтиламин проявляет высокую эффективность как антирастворитель карбоната лития в процессе очистки указанной соли.

Полученные в нашем исследовании результаты могут пополнить базы данных по фазовым равновесиям и растворимости компонентов в тройных системах соль – два растворителя и найти практическое применение в процессах извлечения карбоната лития из его водных техногенных растворов путем введения диизопропиламина и триэтиламина.

### Список литературы

1. Ma Y., Svärd M., Xiao X., Gardner J. M., Olsson R. T., Forsberg K. Precipitation and crystallization used in the production of metal salts for Li-ion battery materials: A review // *Metals*. 2020. Vol. 10, № 12. Art. 1609. <https://doi.org/10.3390/met10121609>



2. Choi O. K., Seo J. H., Kim G. S., Hendren Z., Kim G. D., Kim D., Lee J. W. Non-membrane solvent extraction desalination (SED) technology using solubility-switchable amine // *J. Hazard. Mater.* 2021. Vol. 403. Article ID: 123636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123636>
3. Zijlema T. G., Geertman R. M., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. van, de Graauw J. Antisolvent crystallization as an alternative to evaporative crystallization for the production of sodium chloride // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2000. Vol. 39, № 5. P. 1330–1337. <https://doi.org/10.1021/ie990221h>
4. McNally J. S., Foo Z. H., Deshmukh A., Orme C. J., Lienhard J. H., Wilson A. D. Solute displacement in the aqueous phase of water–NaCl–organic ternary mixtures relevant to solvent-driven water treatment // *RSC Adv.* 2020. Vol. 10, № 49. P. 29516–29528. <https://doi.org/10.1039/D0RA06361D>
5. Du Y., Wang H., Du S., Wang Y., Huang C., Qin Y., Gong J. The liquid–liquid phase separation and crystallization of vanillin in 1-propanol/water solution // *Fluid Phase Equilib.* 2016. Vol. 409. P. 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.09.011>
6. Sun Y., Yan L., Fu H., Xiu Z. Salting-out extraction and crystallization of succinic acid from fermentation broths // *Process Biochem.* 2014. Vol. 49, № 3. P. 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.12.016>
7. Stephenson R. M. Mutual solubility of water and aliphatic amines // *J. Chem. Eng. Data.* 1993. Vol. 38, № 4. P. 625–629. <https://doi.org/10.1021/je00012a039>
8. Zijlema T. G., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. Specific heats and enthalpies of mixing of amine – H<sub>2</sub>O and amine – H<sub>2</sub>O – NaCl mixtures // *J. Chem. Eng. Data.* 1999. Vol. 44, № 6. P. 1335–1339. <https://doi.org/10.1021/je9900878>
9. Danilina V. V., Klimova Y. S., Il'in K. K., Smotrov M. P., Cherkasov D. G. Physicochemical rationale for the method of extractive crystallization of salts based on the analysis of the phase diagrams of salt–water–amine ternary systems // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2024. Vol. 98, № 14. P. 3273–3284. <https://doi.org/10.1134/S0036024424702789>
10. Danilina V. V., Cherkasov D. G., Klimova Y. S., Il'in K. K. Solubility of components, phase equilibria, and extractive salt crystallization in the ternary lithium chloride + water + triethylamine system from T = 293.15 to 363.15 K // *J. Chem. Eng. Data.* 2025. Vol. 70, № 8. P. 3296–3306. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5c00191>
11. Черкасов Д. Г., Данилина В. В., Ильин К. К. Фазовые равновесия, критические явления и экстрактивная кристаллизация соли в тройной системе хлорид натрия–вода–диизопропиламин // *Журн. неорг. химии.* 2021. Т. 66, № 6. С. 785–793. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21060076>
12. Carton A., Bolado S., Marcos M. Liquid – liquid equilibria for aqueous solutions of lithium sulfate or lithium formate and triethylamine or diisopropylamine // *J. Chem. Eng. Data.* 2000. Vol. 45, № 2. P. 260–264. <https://doi.org/10.1021/je990235u>
13. Lin C. L., Lee L. S., Tseng H. C. Phase-equilibria for propan-1-ol plus water plus sodium-chloride and plus potassium-chloride and propan-2-ol plus water plus lithium-chloride and plus lithium bromide // *J. Chem. Eng. Data.* 1993. Vol. 38, № 2. P. 306–309. <https://doi.org/10.1021/je00010a004>
14. Al-Sahhaf T. A., Kapetanovic E. Salt effects of lithium chloride, sodium bromide, or potassium iodide on liquid–liquid equilibrium in the system water+ 1-butanol // *J. Chem. Eng. Data.* 1997. Vol. 42, № 1. P. 74–77. <https://doi.org/10.1021/je960234r>
15. Gomis Y. V., Ruiz B. F., Boluda B. N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the systems water+ lithium chloride+ 1-butanol or 2-butanol or 2-methyl-1-propanol // *Fluid Phase Equilib.* 1999. Vol. 155, № 2. P. 241–249. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(99\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(99)00008-4)
16. Gomis V., Ruiz F., Boluda N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the system water + lithium chloride + 2-methyl-2-propanol // *J. Chem. Eng. Data.* 2008. Vol. 53, № 12. P. 2851–2853. <https://doi.org/10.1021/je800588p>
17. Кургинцев А. Н., Трушников Л. Н., Лаврентьева Л. Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л. : Химия, 1972. 248 с.
18. Miller R. R., Smith S. H., Williams D. D. Solubility of lithium carbonate at elevated temperatures // *J. Chem. Eng. Data.* 1971. Vol. 16, № 1. P. 74–75. <https://doi.org/10.1021/je60048a022>
19. Davison R. R., Smith W. H., Hood D. W. Structure and amine – water solubility in desalination by solvent extraction // *J. Chem. Eng. Data.* 1960. Vol. 5, № 4. P. 420–423. <https://doi.org/10.1021/je60008a005>
20. Davison R. R. Vapor–liquid equilibria of water – diisopropylamine and water – di-n-propylamine // *J. Chem. Eng. Data.* 1968. Vol. 13, № 3. P. 348–351. <https://doi.org/10.1021/je60038a013>
21. Моханова И. Д., Черкасов Д. Г. Взаимная растворимость компонентов двойной системы вода–диизопропиламин // *Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии : межвуз. сб. науч. тр. IX Всерос. конф. молодых ученых с междунар. участием. Саратов : Изд-во «КУБиК», 2013. С. 10–12.*
22. Розачева Л. В., Остапенко Г. М., Никурашина Н. И. Изотермическое исследование высаливания водно-триэтиламинных смесей // *Журн. прикл. химии.* 1979. Т. 52, № 3. С. 697–700.
23. Meerburg P. A. Beitrag zur Kenntnis der Gleichgewichte in Systemen dreier Komponenten, wobei zwei flüssige Schichten auftreten können // *Z. Phys. Chem.* 1902. Vol. 40. P. 641–688.



24. Князькова Т. В. Равновесие бинарных систем амин – вода // Укр. хим. журн. 1976. Т. 42, № 8. С. 879–882.
25. Ishiguro T., Ikushima M., Koga N., Yagyu M. Equilibria of the systems of amine–water–caustic alkali. II. Mutual solubilities of triethylamine–H<sub>2</sub>O–NaOH and triethylamine–H<sub>2</sub>O–KOH systems // J. Pharm. Soc. Japan. 1955. Vol. 75, № 2. P. 188–192.
26. Copp J. L. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 2 // Trans. Faraday Soc. 1955. Vol. 51, № 8. P. 1056–1061.
27. Copp J. L., Everett D. H. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 3. Correlation of Thermodynamic Functions and Phase Diagrams // Trans. Faraday Soc. 1957. Vol. 53, № 1. P. 9–18.
28. Kartzmark E. M. System triethylamine–water: The equilibrium diagram and some physical properties // Canad. J. Chem. 1967. Vol. 45, № 10. P. 1089–1091. <https://doi.org/10.1139/v67-183>
29. Thangavel S. Studies in triethylamine–water. Part IV. Predicting the solubilities of triethylamine and water // J. Indian Chem. Soc. 1982. Vol. 59, № 9. P. 1044–1046.
30. Кричевский И. Р., Хазанова Н. Е., Светлова Г. М. Общее давление пара над растворами триэтиламин – вода в критической области // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 10. С. 2160–2166.
31. Letcher T. M., Spiteri W. Excess molar volumes of (triethylamine+water) at temperature close to the lower critical solution temperature // J. Chem. Thermodyn. 1983. Vol. 15, № 10. P. 965–970. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(83\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0021-9614(83)90130-1)
32. Николаев А. В., Яковлев И. И. Клатратообразование и физико-химический анализ экстракционных систем. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 191 с.
33. Rothmund V. Die gegenseitige Löslichkeit von Flüssigkeiten und der kritische Lösungspunkt // Z. Phys. Chem. 1898. Vol. 26. P. 433–492.
34. Черкасов Д. Г., Ильин К. К. Политермическое исследование высаливания триэтиламина из водных растворов нитратом натрия // Журн. прикл. химии. 2011. Т. 84, № 3. С. 396–402.
35. Лабораторная техника органической химии / под ред. Б. Кейла. М. : Мир, 1966. 751 с.
36. Химическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. И. Л. Кнунянц. М. : Сов. энциклопедия, 1988–1998. Т. 1–5.
37. Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. Основы физико-химического анализа. М. : Наука, 1976. 503 с.
38. Ильин К. К., Черкасов Д. Г. Топология фазовых диаграмм тройных систем соль – два растворителя с всаливанием – высаливанием. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2020. 212 с.
39. Справочник по растворимости. Бинарные системы / под ред. В. В. Кафарова. М. ; Л. : АН СССР, 1963. Т. 1, кн. 1, 2. 1960 с.

## References

1. Ma Y., Svärd M., Xiao X., Gardner J.M., Olsson R. T., Forsberg K. Precipitation and crystallization used in the production of metal salts for Li-ion battery materials: A review. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, art. 1609. <https://doi.org/10.3390/met10121609>
2. Choi O. K., Seo J. H., Kim G. S., Hendren Z., Kim G. D., Kim D., Lee J. W. Non-membrane solvent extraction desalination (SED) technology using solubility-switchable amine. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 403, article ID: 123636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123636>
3. Zijlema T. G., Geertman R. M., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. van, Graauw J. de. Antisolvent crystallization as an alternative to evaporative crystallization for the production of sodium chloride. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, vol. 39, no. 5, pp. 1330–1337. <https://doi.org/10.1021/ie990221h>
4. McNally J. S., Foo Z. H., Deshmukh A., Orme C. J., Lienhard J. H., Wilson A. D. Solute displacement in the aqueous phase of water–NaCl–organic ternary mixtures relevant to solvent-driven water treatment. *RSC Adv.*, 2020, vol. 10, no. 49, pp. 29516–29528. <https://doi.org/10.1039/D0RA06361D>
5. Du Y., Wang H., Du S., Wang Y., Huang C., Qin Y., Gong J. The liquid–liquid phase separation and crystallization of vanillin in 1-propanol/water solution. *Fluid Phase Equilib.*, 2016, vol. 409, pp. 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.09.011>
6. Sun Y., Yan L., Fu H., Xiu Z. Salting-out extraction and crystallization of succinic acid from fermentation broths. *Process Biochem.*, 2014, vol. 49, no. 3, pp. 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.12.016>
7. Stephenson R. M. Mutual solubility of water and aliphatic amines. *J. Chem. Eng. Data*, 1993, vol. 38, no. 4, pp. 625–629. <https://doi.org/10.1021/je00012a039>
8. Zijlema T. G., Witkamp G. J., Rosmalen G. M. Specific heats and enthalpies of mixing of amine – H<sub>2</sub>O and amine – H<sub>2</sub>O – NaCl mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 1999, vol. 44, no. 6, pp. 1335–1339. <https://doi.org/10.1021/je9900878>
9. Danilina V. V., Klimova Y. S., Il'in K. K., Smotrov M. P., Cherkasov D. G. Physicochemical rationale for the method of extractive crystallization of salts based on the analysis of the phase diagrams of salt–water–amine ternary systems. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2024, vol. 98, no. 14, pp. 3273–3284. <https://doi.org/10.1134/S0036024424702789>
10. Danilina V. V., Cherkasov D. G., Klimova Y. S., Il'in K. K. Solubility of components, phase equilibria, and extractive salt crystallization in the ternary lithium chloride + water + triethylamine system from T = 293.15 to 363.15 K. *J. Chem. Eng. Data*, 2025, vol. 70, no. 8, pp. 3296–3306. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5c00191>



11. Cherkasov D. G., Danilina V. V., Il'in K. K. Phase equilibria, critical phenomena, and extractive crystallization of the salt in the sodium chloride–water–diisopropylamine ternary system. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2021, vol. 66, no. 6, pp. 883–890. <https://doi.org/10.1134/S0036023621060073>
12. Carton A., Bolado S., Marcos M. Liquid – liquid equilibria for aqueous solutions of lithium sulfate or lithium formate and triethylamine or diisopropylamine. *J. Chem. Eng. Data*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 260–264. <https://doi.org/10.1021/je990235u>
13. Lin C. L., Lee L. S., Tseng H. C. Phase-equilibria for propan-1-ol plus water plus sodium-chloride and plus potassium-chloride and propan-2-ol plus water plus lithium-chloride and plus lithium bromide. *J. Chem. Eng. Data*, 1993, vol. 38, no. 2, pp. 306–309. <https://doi.org/10.1021/je00010a004>
14. Al-Sahhaf T. A., Kapetanovic E. Salt effects of lithium chloride, sodium bromide, or potassium iodide on liquid– liquid equilibrium in the system water+ 1-butanol. *J. Chem. Eng. Data*, 1997, vol. 42, no. 1, pp. 74–77. <https://doi.org/10.1021/je960234r>
15. Gomis Y. V., Ruiz B. F., Boluda B. N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the systems water+ lithium chloride+ 1-butanol or 2-butanol or 2-methyl-1-propanol. *Fluid Phase Equilib.*, 1999, vol. 155, no. 2, pp. 241–249. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(99\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(99)00008-4)
16. Gomis V., Ruiz F., Boluda N., Saquete M. D. Unusual S-shaped binodal curves of the system water+ lithium chloride + 2-methyl-2-propanol. *J. Chem. Eng. Data*, 2008, vol. 53, no. 12, pp. 2851–2853. <https://doi.org/10.1021/je800588p>
17. Kirgintsev A. N., Trushnikova L. N., Lavrent'eva V. G. *Rastvorimost' neorganicheskikh veshchestv v vode* [Solubility of Inorganic Substances in Water]. Leningrad, Khimiya, 1972. 248 p. (in Russian).
18. Miller R. R., Smith S. H., Williams D. D. Solubility of lithium carbonate at elevated temperatures. *J. Chem. Eng. Data*, 1971, vol. 16, no. 1, pp. 74–75. <https://doi.org/10.1021/je60048a022>
19. Davison R. R., Smith W. H., Hood D. W. Structure and amine – water solubility in desalination by solvent extraction. *J. Chem. Eng. Data*, 1960, vol. 5, no. 4, pp. 420–423. <https://doi.org/10.1021/je60008a005>
20. Davison R.R. Vapor–liquid equilibria of water – diisopropylamine and water – di-n-propylamine. *J. Chem. Eng. Data*, 1968, vol. 13, no. 3, pp. 348–351. <https://doi.org/10.1021/je60038a013>
21. Mokhonova I. D., Cherkasov D. G. Mutual solubility of the components of the binary system water–diisopropylamine. *Sovremennye problemy teoreticheskoy i eksperimental'noy khimii: mezhvuz. sb. nauch. tr. IX Vseros. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiem* [Modern Problems of Theoretical and Experimental Chemistry: Intern. coll. of sci. papers of IX All-Russ. conf. of young scientists with Intern. participation]. Saratov, Izd-vo “KUBiK”, 2013, pp. 10–12 (in Russian).
22. Rogacheva L. V., Ostapenko G. M., Nikurashina N. I. Isothermal study of salting-out of aqueous triethylamine mixtures. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, 1979, vol. 52, no. 3, pp. 697–700 (in Russian).
23. Meerburg P. A. Beitrag zur Kenntnis der Gleichgewichte in Systemen dreier Komponenten, wobei zwei flüssige Schichten auftreten können. *Z. Phys. Chem.*, 1902, vol. 40, pp. 641–688 (in German).
24. Knyaz'kova T. V. Equilibrium of binary amine–water systems. *Ukrainskii Khimicheskii Zhurnal*, 1976, vol. 42, no. 8, pp. 879–882 (in Russian).
25. Ishiguro T., Ikushima M., Koga N., Yagyu M. Equilibria of the systems of amine–water–caustic alkali. II. Mutual solubilities of triethylamine–H<sub>2</sub>O–NaOH and triethylamine–H<sub>2</sub>O–KOH systems. *J. Pharmac. Soc. Japan*, 1955, vol. 75, pp. 188–192. [https://doi.org/10.1248/yakushi1947.75.2\\_188](https://doi.org/10.1248/yakushi1947.75.2_188)
26. Copp J. L. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 2. *Trans. Faraday Soc.*, 1955, vol. 51, no. 8, pp. 1056–1061.
27. Copp J. L., Everett D. H. Thermodynamics of binary systems containing amines. Part 3. Correlation of Thermodynamic Functions and Phase Diagrams. *Trans. Faraday Soc.*, 1957, vol. 53, no. 1, pp. 9–18.
28. Kartzmark E. M. System triethylamine–water: The equilibrium diagram and some physical properties. *Canad. J. Chem.*, 1967, vol. 45, no. 10, pp. 1089–1091. <https://doi.org/10.1139/v67-183>
29. Thangavel S. Studies in triethylamine–water. Part IV. Predicting the solubilities of triethylamine and water. *J. Indian Chem. Soc.*, 1982, vol. 59, no. 9, pp. 1044–1046.
30. Krichevsky I. R., Khazanova N. E., Svetlova G. M. Total vapor pressure over triethylamine–water solutions in the critical region. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 1960, vol. 34, no. 10, pp. 2160–2166 (in Russian).
31. Letcher T. M., Spiteri W. Excess molar volumes of (triethylamine+water) at temperature close to the lower critical solution temperature. *J. Chem. Thermodyn.*, 1983, vol. 15, no. 10, pp. 965–970. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(83\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0021-9614(83)90130-1)
32. Nikolaev A. V., Yakovlev I. I. *Klatratoobrazovanie i fiziko-khimicheskii analiz ekstraktsionnykh sistem* [Clathrate Formation and Physicochemical Analysis of Extractive Systems]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1975. 191 p. (in Russian).
33. Rothmund V. Die gegenseitige Löslichkeit von Flüssigkeiten und der kritische Lösungspunkt. *Z. Phys. Chem.*, 1898, vol. 26, pp. 433–492 (in German).
34. Cherkasov D. G., Il'in K. K. Polythermal study of the salting-out of triethylamine from aqueous solutions with sodium nitrate. *Russ. J. of Applied Chem.*, 2011, vol. 84, no. 3, pp. 388–394. <https://doi.org/10.1134/S1070427211030098>



35. *Laboratornaya tekhnika organicheskoy khimii. Pod red. B. Keila* [Keil B., ed. Laboratory Technology of Organic Chemistry]. Moscow, Mir, 1966. 751 p. (in Russian).
36. *Khimicheskaya entsiklopediya: v 5 t. Gl. red. I. L. Knunyants* [Knunyants I. L., ed.-in-chief. Chemical Encyclopedia: in 5 vols]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1988–1998. Vol. 1–5 (in Russian).
37. Anosov V. Ya., Ozerova M. I., Fialkov Yu. Ya. *Osnovy fiziko-khimicheskogo analiza* [Principles of Physicochemical Analysis]. Moscow, Nauka, 1976. 503 p. (in Russian).
38. Il'in K. K., Cherkasov D. G. *Topologija fazovykh diagramm trojnykh sistem sol'-dva rastvoritelja s vsalivaniem–vysalivaniem* [Topology of the phase diagrams of the ternary systems a salt + two solvents with salting-in–salting-out]. Saratov, Saratov State University Publ., 2020. 212 p. (in Russian).
39. *Spravochnik po rastvorimosti. Binarnye sistemy. Pod red. V. V. Kafarova* [Kafarov V. V., ed. Manual in Solubility: Binary Systems]. Moscow, Leningrad, Akademiya Nauk SSSR Publ., 1961, vol. 1, book 1, 2. 1960 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 30.11.2025; принята к публикации 02.12.2025  
The article was submitted 20.11.2025; approved after reviewing 30.11.2025; accepted for publication 02.12.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 47–53

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 47–53

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-47-53>, EDN: IPPEYU

Научная статья

УДК 544.341

## Термодинамическое моделирование неравновесных процессов в биохимических системах



Я. О. Шабловский

Гомельский государственный технический университет, Белоруссия, 246746, г. Гомель, проспект Октября, д. 48

Шабловский Ярослав Олегович, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части, [ya.shablovsky@yandex.ru](mailto:ya.shablovsky@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4464-4230>

**Аннотация.** Предмет нашего исследования – режимы протекания химических реакций без достижения равновесия. Критеризация таких режимов упростит проведение реакций в мягких условиях. В биохимической реакционной системе процесс, не ведущий её к химическому равновесию, возможен при индукционном сопряжении реакций либо при сопряжении парциальных реакций. Благодаря этому при термодинамическом моделировании биохимических реакций можно отказаться от традиционных предположений о наличии в системе обратных связей, в особенности, об определяющей роли интермедиата, химическую природу которого приходится априорно постулировать. Показано, что термодинамические (а точнее, эксергетические) ограничения на самопроизвольное протекание реакций можно, во-первых, нивелировать, а во-вторых, обойти. С этой целью выполнен термодинамический анализ реакций, протекающих в обход равновесия. Конечная множественность парциальных равновесий свойственна колебательным реакциям. В работе предложена термодинамическая модель одночастотных колебаний сложной гомофазной реакции. Это позволило критеризовать возможность колебательного процесса в гомогенной реакционной системе и продемонстрировать, что для возникновения такого процесса не требуется положительная либо отрицательная обратная связь. Исследовано индукционное сопряжение двух реакций, одна из которых термодинамически запрещена и протекает только совместно с другой (индуцирующей) реакцией. Показано, что если целевая реакция гомофазна и притом гомогенна, то её термодинамический запрет можно обойти, осуществляя в том же реакционном объёме сопряжённую реакцию – гомофазную реакцию, расходующую вещество, идентичное одному из ожидаемых продуктов целевой реакции.

**Ключевые слова:** сопряжённые реакции, химическая индукция, концентрационные колебания, свободные колебания, реакционная система, химическая эксергия

**Для цитирования:** Шабловский Я. О. Термодинамическое моделирование неравновесных процессов в биохимических системах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 47–53. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-47-53>, EDN: IPPEYU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Thermodynamical modelling for equilibriumless processes in biochemical systems

Ya. O. Shablovsky

Gomel State Technical University, 48 Prospekt Oktyabrya, Gomel 246746, Belarus

Yaroslav O. Shablovsky, [ya.shablovsky@yandex.ru](mailto:ya.shablovsky@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4464-4230>

**Abstract.** The dynamics of a biochemical system is obviously subjected to universal laws of thermodynamics, but analytical forms of the criteria and constraints having been deduced up to date and findable in the literature are to some extent arguable. The paper examines the thermodynamic constraints on chemical reaction pathways and is aimed at finding the ways to boost equilibrium-limited reactions under mild conditions by means of blurring the equilibrium or circumventing it. In particular, herein we deal with the thermodynamic analysis of reactions that proceed with exhibiting either the multiplicity of equilibrium states (partial equilibria) or the total absence of an equilibrium. The multiplicity of equilibrium states refers to oscillatory reactions. Thermochemical regularities of such reactions are revealed, and it is shown that they are not determined by positive or negative feedback. The total absence of an equilibrium is inherent in conjugate reactions, i.e. in couples of chemical reactions, one of which (namely, the induced reaction) is impossible in the absence of the other one (namely, the inducing reaction) because of being thermodynamically prohibited. To tackle the challenge of providing thermodynamic control of such reactions we focus on exergetic restrictions and hence deduce general conditions for inducing a heterogeneous homophase reaction.

**Keywords:** conjugate reactions, chemical induction, concentrational oscillations, free oscillations, reactional system, chemical exergy



**For citation:** Shablovsky Ya. O. Thermodynamical modelling for equilibriumless processes in biochemical systems. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 47–53 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-47-53>, EDN: IPPEYU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Термодинамика биохимических реакций имеет ряд особенностей. Для их аналитического описания Р. Альберти [1] предложил включить водородный показатель рН в набор параметров равновесия реакции наравне с температурой. Такой подход отождествляет реакции в биологических системах с реакциями в разбавленных водных растворах и детерминирует их протекание стремлением к химическому равновесию. Многие авторы (см., например, [2]) с этим не согласны и полагают, что биохимические реакции, наоборот, далеки от равновесия. Оставляя в стороне дискуссию о правомерности и о плодотворности указанных подходов, сосредоточимся на неохваченном ими случае протекания реакций без достижения равновесия.

Обобщая результаты математического моделирования, авторы [3] заключили: при устранении равновесия в системе могут оказаться осуществимыми не только кинетически затруднённые, но и термодинамически запрещённые реакции. Последнее было подтверждено экспериментально [4, 5], что побуждает не только пересмотреть концепцию индукционного сопряжения реакций [6], но и по-иному взглянуть на сопряжение парциальных реакций [7]. Названные два типа химического сопряжения объединяет недостижимость равновесия в реакционных системах, обнаруживающих такое сопряжение. Обычно недостижимость химического равновесия связывают с наличием внешнего массообмена [8]. Между тем самоорганизация – самое яркое проявление неравновесности – наблюдается и в закрытых системах [9].

В настоящей работе предложены термодинамические модели, позволившие критеризовать протекание реакций без достижения равновесия. При этом использованы стандартные обозначения:  $T$  – температура,  $G$  – энергия Гиббса,  $S$  – энтропия,  $H$  – энтальпия,  $\Delta_r$  – изменение соответствующей величины при протекании реакции.

## Теоретический анализ

Для выявления энергетических предпосылок протекания реакций без достижения равновесия мы применим эксергетический анализ. Эта методология выгодно сочетает балансирование энергии системы с балансированием её энтропии, но стандартное определение эксергии как работоспособной теплоты делает расчёт химической эксергии неоднозначным в силу зависимости этого расчёта от выбора априорных реакций «энергетического обесценивания» [10]. Будем руководствоваться следующим. Если реакция – эндотермическая, то при её протекании поглощается теплота

$$\Delta Q = \Delta_r H + (-\Delta_r G) = T \Delta_r S;$$

а если реакция – экзотермическая, то теплота

$$\Delta Q = -\Delta_r H + \Delta_r G = -T \Delta_r S$$

при  $\Delta_r S < 0$  отдаётся внешней среде, а при  $\Delta_r S > 0$  поглощается из неё. Записанные общеизвестные выражения для теплоты  $\Delta Q$  побуждают принять следующее определение эксергии реакции:

$$\Xi = -T \Delta_r S.$$

Эксергия реакции – количественная мера связанной энергии, перераспределяемой при протекании данной реакции; при этом знак эксергии детерминирует характер необходимого теплообмена. Отрицательная величина  $\Xi$  равна по модулю количеству теплоты, без поглощения которого данная реакция не протекает, а положительная величина  $\Xi$  равна количеству теплоты, которое при протекании данной реакции должно быть отведено вовне.

Равенство

$$\Delta_r G = \Delta_r H + \Xi$$

показывает, что термодинамический запрет реакции может быть обусловлен не недостатком энергии, а её избытком, более точно – избытком эксергии: экзотермические реакции запрещены при

$$\Xi > -\Delta_r H > 0, \quad (1)$$

а эндотермические реакции запрещены при

$$\frac{\Xi}{\Delta_r H} > -1. \quad (2)$$

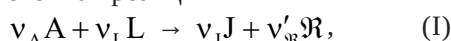
Выявим пути обхода данных запретов.



### Химическая индукция

Две реакции сопряжены, если одна из них в данных условиях термодинамически запрещена и протекает только совместно с другой (индуцирующей) реакцией. Это каноническое определение [11, с. 6–7], отождествляющее сопряжение реакций с химической индукцией, т.е. с обходом термодинамического запрета, использовалось в химии изначально. Позднее появились расширенные толкования, переносящие фокус внимания с обхода термодинамического запрета на преодоление кинетических затруднений, и сложилось мнение [6, 12], что роль индуцирующей реакции – продуцирование высокоактивных частиц для одной из промежуточных ступеней индуцируемой реакции. Такая концепция подразумевает знание механизма реакции, установление которого существенно усложняется тем, что реакция не протекает самопроизвольно. Однако даже если предположить, что природа частиц, способных активировать исходные вещества индуцируемой реакции, достоверно известна, то в подавляющем большинстве случаев эти частицы проще продуцировать не химическим путём, а физическими воздействиями (термолиз, фотолиз, сонолиз, радиолиз). Не углубляясь в концептуальную критику (см. обзор [13]), выполним термодинамический анализ сопряжения реакций, следуя каноническому определению, данному выше.

Пусть термодинамически запрещена гомофазная гомогенная реакция



у которой протеканию в прямом направлении соответствует приращение энергии Гиббса

$$\Delta_r G(I) = \Delta_r H(I) + \Xi(I) > 0.$$

Полагаем, что объём  $\mathcal{V}$ , содержащий исходные вещества реакции (I), закрыт для притока этих веществ:

$$\xi_A \leq 0, \quad \xi_L \leq 0; \quad (3)$$

здесь  $\xi = dn/dt$ ,  $n$  – число молей компонента,  $t$  – время. При указанных ограничениях в реакционной системе (I) самопроизвольное изменение её энергии Гиббса невозможно:

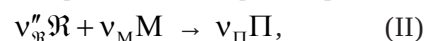
$$\frac{dG(I)}{dt} \equiv 0,$$

т.е.

$$\mu_A \xi_A + \mu_L \xi_L + \mu_J \xi_J + \mu_{\text{Я}} \xi_{\text{Я}} \equiv 0, \quad (4)$$

где  $\mu$  – химический потенциал компонента.

Практический интерес представляет случай, когда в объёме  $\mathcal{V}$ , содержащем исходные вещества реакции (I), протекает гомофазная реакция



расходуя вещество  $\text{Я}$ , идентичное одному из ожидаемых продуктов реакции (I). Тогда в реакционной системе создаётся состояние

$$\xi_{\text{Я}} < 0, \quad (5)$$

вследствие чего относимые к одному и тому же гомогенному реакционному объёму  $\mathcal{V}$  соотношения (3) – (5) оказываются совместны при

$$\xi_J > 0. \quad (6)$$

Неравенство (6) выражает возможность химической индукции: реакция (II) индуцирует протекание термодинамически запрещённой реакции (I) в обход равновесия

$$\xi_A = \xi_L = \xi_J = \xi_{\text{Я}} = 0 \quad (7)$$

в кинетическом режиме, подчинённом требованию (4).

Указанная возможность осуществится при нивелировании запрета реакции (I) за счёт динамической компенсации эксергетической составляющей этого запрета (см. (1), (2)). При  $\Delta_r H(I) < 0$  для индуцирования реакции (I) необходимо компенсировать её избыточную положительную эксергию  $\Xi(I)$ : сопряжённая реакция (II) должна иметь стехиометрически соразмерную отрицательную эксергию  $\Xi(II)$ , удовлетворяющую требованию

$$\Xi_{II} > \Xi_I, \quad (8)$$

где

$$\Xi_I = \frac{\Xi(I)}{v'_{\text{Я}}}, \quad \Xi_{II} = \frac{\Xi(II)}{v'_{\text{Я}}}.$$

Если же  $\Delta_r H(I) > 0$ , то термодинамический запрет реакции (I) будет обойдён при её сопряжении с реакцией (II), у которой

$$-\Xi_{II} \geq G_I, \quad (9)$$

где

$$G_I = \frac{\Delta_r G(I)}{v'_{\text{Я}}}.$$

Мы рассмотрели обход кинетического равновесия (7), совершаемый за счёт индукционного сопряжения реакций. Наряду с этим самопроизвольный процесс, не ведущий реакционную систему к равновесию, может быть результатом сопряжения парциальных реакций. Наиболее интересное проявление такого сопряжения – обход термодинамического равновесия, имеющий место при свободных концентрационных колебаниях. Исследуем их.



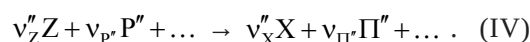
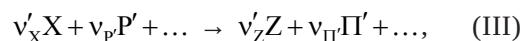
## Результаты и их обсуждение

### Свободные концентрационные колебания

Устоялось мнение [14], что колебательное протекание биохимических реакций определяется наличием обратных связей, т.е. представляет собой автоколебательный процесс. Данная парадигма привлекает возможностью использовать математический аппарат теории автоколебаний, но получаемые при этом результаты не только небесспорны [15], но и неоднозначны: одни и те же закономерности обосновывают наличием положительной обратной связи [16], отрицательной обратной связи [17], их совместным действием [18] и даже самоорганизацией, создающей динамическую обратную связь высокой размерности [19]. Между тем в действительности для колебательного протекания гомофазной реак-

ции обратная связь не обязательна, поскольку такие колебания могут быть свободными (эмпирически это следует из результатов серии опытов [20] с «генераторами химических колебаний»).

Пусть в закрытой гомогенной системе самопроизвольно циклично чередуются реакции



Такое альтернирование протекающей реакции приводит к взаимному рециклированию компонентов X и Z – регулярному чередованию состояния с преобладанием компонента X и состояния с преобладанием компонента Z. Обозначим  $\Delta_r \tilde{G}'$  и  $\Delta_r \tilde{G}''$  изменения энергии Гиббса при протекании реакций (III) и (IV). В общем случае:

$$\Delta_r \tilde{G}' = RT \left( \ln \frac{(a_Z)^{v'_Z} \cdot (a_{\Pi'})^{v_{\Pi'}} \cdot \dots}{(a_X)^{v'_X} \cdot (a_P)^{v_P} \cdot \dots} - \ln \frac{(\bar{a}'_Z)^{v'_Z} \cdot (\bar{a}'_{\Pi'})^{v_{\Pi'}} \cdot \dots}{(\bar{a}'_X)^{v'_X} \cdot (\bar{a}'_P)^{v_P} \cdot \dots} \right), \quad (10)$$

$$\Delta_r \tilde{G}'' = RT \left( \ln \frac{(a_X)^{v''_X} \cdot (a_{\Pi'})^{v_{\Pi'}} \cdot \dots}{(a_Z)^{v''_Z} \cdot (a_{P'})^{v_{P'}} \cdot \dots} - \ln \frac{(\bar{a}''_X)^{v''_X} \cdot (\bar{a}''_{\Pi'})^{v_{\Pi'}} \cdot \dots}{(\bar{a}''_Z)^{v''_Z} \cdot (\bar{a}''_{P'})^{v_{P'}} \cdot \dots} \right), \quad (11)$$

где  $\bar{a}'_X$  и  $\bar{a}'_Z$  – значения активностей  $a_X$  и  $a_Z$  компонентов X и Z, соответствующие остановке реакции (III), т.е. парциальному равновесию

$$\Delta_r \tilde{G}' = 0,$$

$\bar{a}''_X$  и  $\bar{a}''_Z$  – значения тех же активностей, соответствующие остановке реакции (IV), т.е. парциальному равновесию

$$\Delta_r \tilde{G}'' = 0.$$

Взаимное рециклирование  $X \rightleftharpoons Z$  сопровождается образованием сопутствующих продуктов и стехиометрически соразмерным расходом реагентов, так что у обеих альтернируемых реакций каждый очередной запуск происходит при новом соотношении активностей нерециклируемых компонентов. Следовательно, это соотношение не влияет ни на инициацию полувциклов колебательной реакции, ни на их остановку. Тогда, обращаясь к равенствам (10), (11), получаем:

$$\begin{cases} \frac{(\bar{a}'_Z)^{v'_Z}}{(\bar{a}'_X)^{v'_X}} \gg 1, \\ \frac{(\bar{a}''_X)^{v''_X}}{(\bar{a}''_Z)^{v''_Z}} \gg 1. \end{cases} \quad (12)$$

Очевидно, что число собственных частот свободных колебаний концентраций (актив-

ностей) равно числу пар рециклируемых компонентов. Система (III), (IV) – одночастотная, поэтому колебания активностей  $a_X$  и  $a_Z$  в ней – противофазные: минимум величины  $a_X$  соответствует максимуму величины  $a_Z$ , и наоборот. В закрытой гомогенной системе изменения концентраций (активностей) стехиометрически взаимосвязаны, причём такие взаимосвязи строго линейны. Вследствие этого противофазные колебания активностей  $a_X$  и  $a_Z$  возможны только в том случае, когда оба полувцикла колебательной реакции протекают необратимо.

Таким образом, в гомогенной реакционной системе одночастотные свободные колебания могут возникнуть, если оба полувцикла реакции: 1) ведут к образованию сложного иона либо недиссоциирующего вещества; 2) удовлетворяют требованию (12).

В дополнение к этим двум необходимым условиям свободных концентрационных колебаний отметим наличие у таких колебаний нижнего температурного порога. Реакция (III) термодинамически разрешена при

$$T > T' = \frac{\Delta_r \tilde{H}'}{\Delta_r \tilde{S}'}, \quad (13)$$



а реакция (IV) – при

$$T > T'' = \frac{\Delta_r \tilde{H}''}{\Delta_r \tilde{S}''}, \quad (14)$$

где  $\Delta_r \tilde{H}'$  и  $\Delta_r \tilde{H}''$  – тепловые эффекты реакций (III) и (IV),  $\Delta_r \tilde{S}'$  и  $\Delta_r \tilde{S}''$  – изменения молярной энтропии при их протекании. Из неравенств (13), (14) следует, что в гомогенной реакционной системе одночастотные свободные колебания возможны только при температуре, превышающей  $T'$  и  $T''$ .

Для наблюдения концентрационных колебаний предпочтительны реакции с термодинамически монотонными полужиклами:

$$\begin{cases} \Delta_r \tilde{H}' < 0, \tilde{\Xi}' < 0; \\ \Delta_r \tilde{H}'' < 0, \tilde{\Xi}'' < 0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $\tilde{\Xi}'$  и  $\tilde{\Xi}''$  – эксергии реакций (III) и (IV). Если же условие (15) не выполняется, то необходимо

$$\left| \frac{\Delta_r \tilde{G}' - \Delta_r \tilde{G}''}{\Delta_r \tilde{G}' + \Delta_r \tilde{G}''} \right| \ll 1. \quad (16)$$

Ограничение (16) формально аналогично известному условию сохранения устойчивости автоколебаний в присутствии случайных возмущений (см. [21]) и нацелено на предотвращение нестационарных концентрационных биений.

## Заключение

1. Анализ протекания реакций без достижения равновесия выполнен с учётом того, что термодинамический запрет реакции может быть обусловлен не только недостатком химической энергии, но и избытком химической эксергии (неравенства (1) и (2)).

2. Доказано (см. формулы (3) – (6)), что термодинамически запрещённую гомофазную гомогенную реакцию (I) индуцирует гомофазная реакция (II), протекающая в объёме, содержащем исходные вещества реакции (I), и расходующая вещество, идентичное одному из ожидаемых продуктов реакции (I). На основании ограничений (1), (2) определены эксергетические требования к реакции (II), необходимые для такого индуцирования (неравенства (8) и (9)).

3. Одночастотные свободные колебания в гомогенной реакционной системе могут возникнуть, если оба полужикла реакции:

1) ведут к образованию сложного иона либо недиссоциирующего вещества; 2) удовлетворяют требованию (12). При выполнении этих двух условий такие колебания будут наблюдаться при температуре, превышающей  $T'$  и  $T''$  (неравенства (13) и (14)).

## Список литературы

1. *Alberty R. A.* Equilibrium compositions of solutions of biochemical species and heats of biochemical reactions // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1991. Vol. 88, № 8. P. 3268–3271. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.8.3268>
2. *Quan H., Beard D. A.* Thermodynamics of stoichiometric biochemical networks in living systems far from equilibrium // *Biophysical Chemistry*. 2005. Vol. 114, № 2-3. P. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2004.12.001>
3. *Shinnar R., Feng C. A.* Structure of complex catalytic reactions: Thermodynamic constraints in kinetic modeling and catalyst evaluation // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1985. Vol. 24, № 1. P. 153–170. <https://doi.org/10.1021/i100018a005>
4. *Armor J. N.* Overcoming equilibrium limitations in chemical processes // *Applied Catalysis A: General*. 2001. Vol. 222, № 1-2. P. 91–99. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00833-X](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00833-X)
5. *Hung J., Song Y., Riisager A.* Interfacial thermoconvection and relay catalysis enable equilibrium shifting and rapid glucose-to-fructose isomerization // *Angewandte Chemie (International Edition)*. 2024. Vol. 63, № 50. P. e202411544-1–e202411544-10. <https://doi.org/10.1002/anie.202411544>
6. *Nagiev T.* The theory of conjugate reactions in the context of modern ideas // *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2020. Vol. 10, № 1. P. 52–68. <https://doi.org/10.4236/aces.2020.101004>
7. *Keizer J.* Thermodynamic coupling in chemical reactions // *Journal of Theoretical Biology*. 1975. Vol. 49, № 2. P. 323–335. [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(75\)80037-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(75)80037-3)
8. *Voit E. O.* Biochemical systems theory: A review // *ISRN Biomathematics*. 2013. Vol. 2013, № 1. P. 1–53. <https://doi.org/10.1155/2013/897658>
9. *Штыков С. Н.* Организованные среды как альтернатива традиционным растворителям в химическом анализе // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2005. Т. 5, вып. 1. С. 47–52.
10. *Michaelides E.* Exergy in biological systems // *Exergy analysis for energy conversion systems*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. P. 201–250. <https://doi.org/10.1017/9781108635684.006>
11. *Шилов Н. А.* О сопряжённых реакциях окисления. М. : Типография Мамонтова, 1905. 304 с.



12. Нагиев Т. М. Сопряжённые реакции окисления перекисью водорода // Успехи химии. 1985. Т. 54, № 10. P. 1654–1673. <https://doi.org/10.1070/RC1985v-054n10ABEH003152>
13. Брук Л. Г., Тёмкин О. Н. Сопряжённые реакции: новые возможности старой идеи // Кинетика и катализ. 2016. Т. 57, № 3. С. 275–295. <https://doi.org/10.7868/S0453881116030023>
14. Nicolis G., Portnow J. Chemical oscillations // Chemical Reviews. 1973. Vol. 73, № 4. P. 365–384. <https://doi.org/10.1021/cr60284a003>
15. Поваров В. Г. О некоторых издержках современного моделирования колебательных химических процессов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4: Химия. 2007. № 3. С. 75–87.
16. Ryzowicz C. J., Bertram R., Karamched B. R. Oscillations in delayed positive feedback systems // Phys. Chem. Chem. Phys. 2024. Vol. 26, № 38. P. 24861–24869. <https://doi.org/10.1039/d4cp01867b>
17. Yutaka H., Takada M., Hara S. Biochemical oscillations in delayed negative cyclic feedback: Existence and profiles // Automatica. 2013. Vol. 49, № 9. P. 2581–2590. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.04.020>
18. Bharath A., Herzel H., Thattai M. Positive feedback promotes oscillations in negative feedback loops // PLoS ONE. 2014. Vol. 9, № 8. P. e104761-1– e104761-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104761>
19. Marsland R., Wenping C., Horowitz J. The thermodynamic uncertainty relation in biochemical oscillations // Journal of The Royal Society Interface. 2019. Vol. 16, № 154. P. 20190098-1–20190098-12. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0098>
20. Kurin-Csörgei K., Epstein I., Orbán M. Systematic design of chemical oscillators using complexation and precipitation equilibria // Nature. 2005. Vol. 433, iss. 7022. P. 139–142. <https://doi.org/10.1038/nature03214>
21. Крупенин В. Л. Автоколебательные процессы в сильно нелинейных системах в присутствии случайных возмущений // Вестник научно-технического развития. 2008. Т. 14, № 10. С. 54–59.
3. Shinnar R., Feng C. A. Structure of complex catalytic reactions: Thermodynamic constraints in kinetic modeling and catalyst evaluation. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1985, vol. 24, no. 1, pp. 153–170. <https://doi.org/10.1021/i100018a005>
4. Armor J. N. Overcoming equilibrium limitations in chemical processes. *Applied Catalysis A: General.*, 2001, vol. 222, no. 1-2, pp. 91–99. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00833-X](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00833-X)
5. Hung J., Song Y., Riisager A. Interfacial thermoconvection and relay catalysis enable equilibrium shifting and rapid glucose-to-fructose isomerization. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2024, vol. 63, no. 50, pp. e202411544-1–e202411544-10. <https://doi.org/10.1002/anie.202411544>
6. Nagiev T. The theory of conjugate reactions in the context of modern ideas. *Adv. Chem. Eng. & Science*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 52–68. <https://doi.org/10.4236/aces.2020.101004>
7. Keizer J. Thermodynamic coupling in chemical reactions. *J. Theor. Biol.*, 1975, vol. 49, no. 2, pp. 323–335. [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(75\)80037-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(75)80037-3)
8. Voit E. O. Biochemical systems theory: A review. *Biometrics*, 2013, vol. 2013, no. 1, pp. 1–53. <https://doi.org/10.1155/2013/897658>
9. Shtykov S. N. Organized media as an alternative to conventional solvents in chemical analysis. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2005, vol. 5, iss. 1, pp. 47–52 (in Russian).
10. Michaelides E. Exergy in biological systems. In: *Exergy analysis for energy conversion systems*. Cambridge, Cambridge University Press, 2021, pp. 201–250. <https://doi.org/10.1017/9781108635684.006>
11. Shilov N. A. *O sopriazhennykh reaktsiyakh okisleniia* [About Coupled Reactions of Oxidation]. Moscow, Tipografiya Mamontova, 1905. 304 p. (in Russian).
12. Nagiev T. M. The coupled reactions of oxidation by hydrogen peroxide. *Russian Chemical Reviews*, 1985, vol. 54, no. 10, pp. 974–985 (in Russian). <https://doi.org/10.1070/RC1985v054n10ABEH003152>
13. Брук Л. Г., Темкин О. Н. Conjugate reactions: New potentials of an old idea. *Kinetics and Catalysis*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 277–296 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0453881116030023>
14. Nicolis G., Portnow J. Chemical oscillations. *Chem. Rev.*, 1973, vol. 73, no. 4, pp. 365–384. <https://doi.org/10.1021/cr60284a003>
15. Povarov V. G. About some mistakes of modern modeling of chemical periodic processes. *Izvestiya of Saint Petersburg University. Series 4: Chemistry*, 2007, no. 3, pp. 75–87 (in Russian).
16. Ryzowicz C. J., Bertram R., Karamched B. R. Oscillations in delayed positive feedback systems. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2024, vol. 26, no. 38, pp. 24861–24869. <https://doi.org/10.1039/d4cp01867b>

## References

1. Alberty R. A. Equilibrium compositions of solutions of biochemical species and heats of biochemical reactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1991, vol. 88, no. 8, pp. 3268–3271. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.8.3268>
2. Quan H., Beard D. A. Thermodynamics of stoichiometric biochemical networks in living systems far from equilibrium. *Biophys. Chem.*, 2005, vol. 114, no. 2-3, pp. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2004.12.001>



17. Yutaka H., Takada M., Hara S. Biochemical oscillations in delayed negative cyclic feedback: Existence and profiles. *Automatica*, 2013, vol. 49, no. 9, pp. 2581–2590. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.04.020>
18. Bharath A., Herzel H., Thattai M. Positive feedback promotes oscillations in negative feedback loops. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, no. 8, pp. e104761–e104761-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104761>
19. Marsland R., Wenping C., Horowitz J. The thermodynamic uncertainty relation in biochemical oscillations. *Journal of The Royal Society Interface*, 2019, vol. 16, no. 154, pp. 20190098–20190098-12. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0098>
20. Kurin-Csörgei K., Epstein I., Orbán M. Systematic design of chemical oscillators using complexation and precipitation equilibria. *Nature*, 2005, vol. 433, iss. 7022, pp. 139–142. <https://doi.org/10.1038/nature03214>
21. Krupenin V. L. Autooscillatory processes in strongly nonlinear systems in presence of accidental perturbations. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2008, vol. 14, no. 10, pp. 54–59 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2026; принята к публикации 04.02.2026  
The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 30.01.2026; accepted for publication 04.02.2026



## БИОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 54–62

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 54–62

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-54-62>

EDN: HYIQPL

Научная статья

УДК 579.26:635.646(470.44)

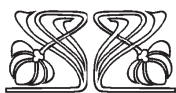
### Влияние условий произрастания на микробиоту растений баклажана (*Solanum melongena* L., 1753) в Саратовской области

А. В. Карпулянская ✉, А. М. Петерсон

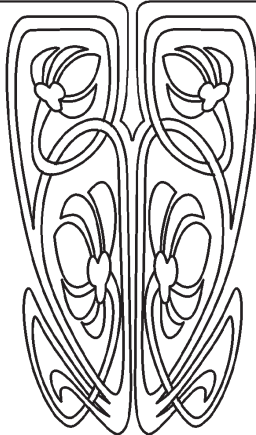
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Карпулянская Алёна Викторовна, магистрант биологического факультета, инженер кафедры микробиологии и физиологии растений, [alena.karpulyanskaya@mail.ru](mailto:alena.karpulyanskaya@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0002-7822-8745>

Петерсон Александра Михайловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, [alexandra.peterson@yandex.ru](mailto:alexandra.peterson@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2896-5739>



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



**Аннотация.** Почвенно-климатические условия являются факторами, влияющими на состав и структуру микробных сообществ различных агроценозов. Поскольку микробиота играет ключевую роль в формировании устойчивости растений к патогенам, изучение её региональной динамики представляет значительный научный и практический интерес. Было проведено сравнительное исследование микробиоты растений баклажана (*Solanum melongena* L., 1753), выращенных в различных почвенно-климатических условиях правобережной и левобережной частей Саратовской области. Микробиологически исследовано 100 образцов здоровых листьев растений. В правобережье с поверхности растений баклажанов было выделено 10 видов бактерий, из внутренних тканей – 11 видов, в левобережье эти показатели составили 5 и 4 вида соответственно. Индекс общности видового состава бактериальных микробиомов растений баклажанов из право- и левобережья Саратовской области составил 40%. Самым распространенным бактериальным видом являлся *Bacillus pseudomycoloides*. Помимо основного доминанта в правобережье на поверхности листовых пластинок баклажанов часто встречались *B. halodurans*, во внутренних тканях – *B. circulans*, *B. oleronius*, *Aneurinibacillus aneuriniliticus*. В левобережье вместе с основным доминантом на поверхности часто обнаруживались *B. lentus*, во внутренних тканях – *B. amyloliquefaciens*, *B. lentus* и *B. simplex*. Индекс общности видового состава микокомплексов растений баклажанов из право- и левобережья Саратовской области составил 67%. С поверхности растений из правобережья было изолировано 5 видов грибов, из левобережья – 8 видов, из внутренних тканей растений было выделено 7 и 6 видов соответственно. Самым распространенным микромицетом являлся *Rhizopus stolonifer*. Из растений, выращенных в правобережье, также часто выделялись *Aspergillus niger* и *Fusarium oxysporum*, в левобережье – *Alternaria solani* и *Mucor ramosissimus*. Количественное содержание микроорганизмов на растениях из право- и левобережья также варьировало. Статистически значимые различия в количественном содержании на поверхности листовых пластинок имели бактерии *B. coagulans*, *B. halodurans* и грибы *A. solani*, *R. stolonifer*, во внутренних тканях – бактерии *B. amyloliquefaciens* и грибы *A. niger*, *F. oxysporum*, *M. ramosissimus*. В большинстве случаев отмеченные различия были в сторону уменьшения численности микроорганизмов на растениях из левобережья.  
**Ключевые слова:** эпифитная микробиота, эндوفитная микробиота, *Solanum melongena*, Саратовская область, агроэкологические условия



**Для цитирования:** Карпулянская А. В., Петерсон А. М. Влияние условий произрастания на микробиоту растений баклажана (*Solanum melongena* L., 1753) в Саратовской области // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 54–62. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-54-62>, EDN: HVIQPL

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## The influence of growing conditions on the microbiota of eggplant (*Solanum melongena* L., 1753) plants in the Saratov Region

A. V. Karpulyanskaya , A. M. Peterson

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alena V. Karpulyanskaya, alena.karpulyanskaya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7822-8745>

Alexandra M. Peterson, alexandra.peterson@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2896-5739>

**Abstract.** Soil and climatic conditions are factors influencing the composition and structure of microbial communities of various agrocenoses. Since microbiota plays a key role in the development of plant resistance to pathogens, studying its regional dynamics is of significant scientific and practical interest. A comparative study of the microbiota of eggplant (*Solanum melongena* L., 1753) plants grown in different soil and climatic conditions in the right- and left-bank areas of the Saratov Region was conducted. One hundred healthy leaf samples were microbiologically analyzed. In the right-bank area, 10 bacterial species were isolated from the surface of eggplant plants and 11 species from internal tissues; in the left-bank area, these values were 5 and 4 species, respectively. The commonality index of the bacterial microbiomes of eggplant plants from the right and left banks of the Saratov Region was 40%. The most common bacterial species was *Bacillus pseudomycooides*. In addition to the main dominant species, *B. halodurans* was frequently found on the surface of eggplant leaf blades in the right-bank area, while *B. circulans*, *B. oleronius*, and *Aneurinibacillus aneuriniliticus* were found in internal tissues. On the left bank, *B. lentus* was frequently detected on the surface along with the main dominant fungus, while *B. amyloliquefaciens*, *B. lentus*, and *B. simplex* were found in the internal tissues. The similarity index of the species composition of mycocomplexes in eggplant plants from the right and left banks of the Saratov region was 67%. Five fungal species were isolated from the surface of right-bank plants, eight species from the left bank, and seven and six species, respectively, were isolated from the internal tissues of the plants. The most common micromycete was *Rhizopus stolonifer*. *Aspergillus niger* and *Fusarium oxysporum* were also frequently isolated from plants grown on the right bank, while *Alternaria solani* and *Mucor ramosissimus* were isolated from the left bank. The quantitative content of microorganisms on plants from the right and left banks also varied. Statistically significant differences in the quantitative content of *B. coagulans* and *B. halodurans* bacteria and *A. solani* and *R. stolonifer* fungi on the leaf blade surface were observed, while *B. amyloliquefaciens* bacteria and *A. niger*, *F. oxysporum*, and *M. ramosissimus* fungi were found in the internal tissues. In most cases, the observed differences were toward a decrease in microorganism abundance on plants from the left bank.

**Keywords:** epiphytic microbiota, endophytic microbiota, *Solanum melongena*, Saratov Region, agroecological conditions

**For citation:** Karpulyanskaya A. V., Peterson A. M. The influence of growing conditions on the microbiota of eggplant (*Solanum melongena* L., 1753) plants in the Saratov Region. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 54–62 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-54-62>, EDN: HVIQPL

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Совокупность абиотических факторов, таких как тип почвы, температурный режим и влагообеспеченность, оказывает существенное влияние на структуру микробных сообществ в агроценозах, влияет на выполняемые ими функции. Особый интерес представляет зависимость от условий произрастания состава ризосферной, эпифитной и эндофитной микробиоты сельскохозяйственных растений, что в конечном итоге отражается на их колонизационной резистентности к фитопатогенным микроорганизмам [1].

Саратовская область характеризуется значительным разнообразием почвенно-климатических условий. Регион расположен в зоне умеренно-континентального климата с выраженным градиентом континентальности

и аридности в направлении с северо-запада на юго-восток. Существенные различия в термическом режиме и увлажнении между правобережной (возвышенной) и левобережной (низменной) частями области, разделенными акваторией Волгоградского водохранилища, обуславливают формирование гетерогенного почвенного покрова, представленного спектром от типичных черноземов до каштановых и солонцовых комплексов.

Саратовская область является аграрным регионом с хорошо развитым овощеводством. Значительная доля площадей, занятых овощными культурами, приходится на баклажаны (*Solanum melongena* L., 1753). Область, наряду с Краснодарским краем, Волгоградской, Астраханской и Ростовской областями, входит в число лидеров по выращиванию данной культуры, на



долю которых приходится до 75 % производимых в России баклажанов [2]. Культивирование этих растений в различных почвенно-климатических зонах Саратовской области приводит к формированию специфических для каждой территории микробиомов, состав которых непосредственно влияет на устойчивость растений к основным фитопатогенам, в частности, к микромицетам родов *Fusarium*, *Verticillium* и *Phytophthora* [3]. Целью данной работы стал анализ влияния условий произрастания на микробиоту растений баклажана в Саратовской области.

## Материалы и методы

Материалом для микробиологических исследований послужили листья растений баклажана (*Solanum melongena* L., 1753) без каких-либо патологий, выращенных в фермерских хозяйствах правобережья (Гагаринский и Воскресенский районы) и левобережья (Энгельсский и Марковский районы) Саратовской области. Почвенно-климатические условия районов отбора проб существенно различаются, что обусловлено их принадлежностью к разным геоморфологическим регионам.

Правобережные районы (Гагаринский и Воскресенский) расположены в пределах Приволжской возвышенности, для которой характерна расчлененность овражно-балочной сетью. Климат здесь более влажный и прохладный по сравнению с левобережьем. Среднегодовое количество осадков составляет 450–500 мм. Среднегодовая температура воздуха – около +4,5°C, средняя температура июля +20,0...+22,5°C. Почвенный покров Гагаринского района представлен чернозёмами обыкновенными и южными. Для Воскресенского района характерны чернозёмы южные [4].

Левобережные районы (Энгельсский и Марковский) находятся в зоне Сыртовой равнины (Заволжье). Климат континентальный, с меньшим количеством осадков и более высокими летними температурами. Среднегодовое количество осадков не превышает 350–400 мм. Среднегодовая температура составляет около +6,5°C. Лето более жаркое: средняя температура июля +21,5...+24,5°C. Преобладающим типом почв являются темно-каштановые почвы, часто засоленные [4].

В ходе работы было исследовано 100 здоровых растений (по 50 растений из право- и

левобережья). Для выделения эпифитных микроорганизмов проводили посев отпечатком поверхности листовой пластинки 2×2 см. Перед выделением эндофитов листовую пластинку фламбировали для уничтожения эпифитной микробиоты, затем 0,1 г образца гомогенизировали с 0,9 мл физиологического раствора. Полученный гомогенат (0,1 мл) высевали на питательную среду. Во всех экспериментах использовали среду PDA (картофель – 200 г, агар-агар – 15 г, глюкоза – 20 г, вода – 1 л). Посевы культивировали при температуре +28°C в течение трёх суток для выделения бактерий и семи суток – для выделения грибов. Дополнительно проводили культивирование мелких фрагментов необработанных листовых пластинок во влажной камере для более полного выявления микромицетов.

Идентификацию бактериальных изолятов проводили по стандартным фенотипическим свойствам по определителю бактерий «Bergey's manual of determinative bacteriology» (2006 г.) и сайту ABIS (BIOCHEMICAL IDENTIFICATION) [5, 6]. Верификацию штаммов с сомнительной таксономической принадлежностью осуществляли с использованием метода MALDI-ToF масс-спектрометрии, который проводили на приборе MALDI масс-спектрометре серии microflex (Bruker Daltonics GmbH, Германия).

Идентификацию грибных изолятов проводили на основании анализа культуральных свойств, а также изучения морфологии мицелия гриба и органов спороношения на разных стадиях развития при помощи Определителя грибов Д. Саттона, А. Фоторгилла, М. Ринальди и учебному определителю Е. Ю. Благовещенской [7, 8].

Индексы общности видового состава рассчитывали как отношение видов, общих для двух сравниваемых групп, к общему количеству выделенных из них видов, выраженное в процентах.

Индекс встречаемости рассчитывали как число проб, в которых обнаружены микроорганизмы данного вида, к общему числу проб, выраженное в процентах.

Статистическую обработку результатов проводили в программе STATISTICA 10. Для определения нормальности распределения данных использовали тест Шапиро–Уилка, для попарного сравнения групп – тест Уилкоксона. При значении  $p < 0,05$  группы имели статистически значимые различия [9].



## Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было выделено 45 штаммов бактерий и 33 штамма грибов, которые в результате идентификации были отнесены к 14 видам бактерий (*Aneurinibacillus aneuriniliticus*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. bataviensis*, *B. circulans*, *B. coagulans*, *B. drentensis*, *B. halodurans*, *B. lentus*, *B. oleronius*, *B. pseudomycoides*, *B. psychrodurans*, *B. simplex*, *Jonesia denitrificans*, *Raoultella terrigena*) и 9 видам грибов (*Alternaria solani*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. ustus*, *Fusarium oxysporum*, *Mucor ramosissimus*, *Penicillium janthinellum*, *Rhizopus stolonifer*, *Trichoderma harzianum*).

В правобережье с поверхности растений баклажанов было выделено 10 видов бактерий, из внутренних тканей – 11 видов, в левобережье эти показатели составили 5 и 4 вида соответственно. Таким образом, бактериальная микробиота листьев баклажанов оказалась более богатой в правобережье. Это может быть связано с более мягким климатом правобережья и с более богатыми почвами, которые служат основным источником обогащения как эпифитной, так и эндофитной микробиоты растений.

Индекс общности видового состава бактериальных микробиомов растений баклажанов из право- и левобережья Саратовской области составил 40%.

Самым распространенным бактериальным видом являлся *B. pseudomycoides*, встречающийся на поверхности и во внутренних тканях растений как в правобережье, так и в левобережье Саратовской области. Данный вид является типичным представителем почвенной микробиоты [10] и эндофитной микробиоты различных растений, например, перца чили (*Capsicum annuum* L.) [11]. *B. pseudomycoides* способен стимулировать рост растений и повышать их устойчивость к засухе [12].

Помимо основного доминанта в правобережье на поверхности листовых пластинок баклажанов часто встречались *B. halodurans*, во внутренних тканях – *B. circulans*, *B. oleronius*, *A. aneuriniliticus*. В левобережье вместе с основным доминантом на поверхности часто обнаруживались *B. lentus*, во внутренних тканях – *B. amyloliquefaciens*, *B. lentus* и *B. simplex*. Все эти бактерии являются типичными почвенными обитателями, и преобладание на растениях тех или иных видов может быть связано с разными типами почв, на которых культивировались исследуемые растения.

Самыми редкими представителями бактериальной микробиоты являлись *B. drentensis*, *B. psychrodurans*, *J. denitrificans* и *R. terrigena*, частота их встречаемости составляла 6%, и выделены они были только из правобережья Саратовской области (табл. 1). *B. drentensis* чаще

Таблица 1 / Table 1

**Встречаемость бактерий на растениях баклажана в право- и левобережье Саратовской области, %  
Occurrence of bacteria on eggplant plants in the right- and left-bank areas of the Saratov Region, %**

Вид / Specie	Правобережье / The right Bank		Левобережье / The left Bank	
	Поверхность растения / Plant surface	Внутренние ткани растения / Internal plant tissues	Поверхность растения / Plant surface	Внутренние ткани растения / Internal plant tissues
<i>A. aneuriniliticus</i>	10	30	6	0
<i>B. amyloliquefaciens</i>	6	14	0	70
<i>B. bataviensis</i>	0	14	0	0
<i>B. circulans</i>	0	30	0	0
<i>B. coagulans</i>	10	20	20	0
<i>B. drentensis</i>	0	6	0	0
<i>B. halodurans</i>	40	20	4	0
<i>B. lentus</i>	0	0	30	40
<i>B. oleronius</i>	10	30	0	0
<i>B. pseudomycoides</i>	30	40	20	30
<i>B. psychrodurans</i>	6	0	0	0
<i>B. simplex</i>	10	20	0	30
<i>J. denitrificans</i>	6	0	0	0
<i>R. terrigena</i>	6	6	0	0



выделяют из компостных и органически богатых почв, поэтому в условиях высокой конкуренции с другими видами микроорганизмов его численность может снижаться [13]. *J. denitrificans* и *R. terrigena* являются граммотрицательными неспорообразующими бактериями, что затрудняет их длительное сохранение в верхних слоях почвы и на поверхности растений, особенно в условиях пониженной влажности [6, 14].

Индекс общности видового состава микромикробных комплексов растений баклажанов из право- и левобережья Саратовской области был существенно выше по сравнению с бактериями и составил

67%. Так, с поверхности растений из правобережья было изолировано 5 видов грибов, из левобережья – 8 видов, из внутренних тканей растений было выделено 7 и 6 видов соответственно.

Самым распространенным микромицетом являлся *R. stolonifer*, который был выделен из всех исследованных районов, где преобладал (табл. 2). Его высокая встречаемость может быть обусловлена тем, что микроорганизм очень быстро способен колонизировать растения через споры [15]. Также данный вид является устойчивым к различным типам загрязнения почв [16].

Таблица 2 / Table 2

**Встречаемость микромицетов на растениях баклажана в право- и левобережье Саратовской области, %**  
**Occurrence of micromycetes on eggplant plants in the right- and left-bank regions of the Saratov Region, %**

Вид / Specie	Правобережье / The right Bank		Левобережье / The left Bank	
	Поверхность растения / Plant surface	Внутренние ткани растения / Internal plant tissues	Поверхность растения / Plant surface	Внутренние ткани растения / Internal plant tissues
<i>A. solani</i>	20	10	10	30
<i>A. flavus</i>	6	0	10	0
<i>A. niger</i>	40	30	10	10
<i>A. ustus</i>	0	10	20	0
<i>F. oxysporum</i>	40	20	10	20
<i>M. ramosissimus</i>	0	10	20	30
<i>P. janthinellum</i>	0	20	10	0
<i>R. stolonifer</i>	60	20	10	50
<i>T. harzianum</i>	0	0	0	20

Из растений, выращенных в правобережье, часто выделялся *A. niger* (как с поверхности, так и из внутренних тканей) и *F. oxysporum*, который преобладал на поверхности листовых пластинок. В более засушливом и жарком левобережье дополнительных грибных доминантов в микробиоме поверхности листьев выявлено не было, а во внутренних тканях, помимо *R. stolonifer*, часто обнаруживались *A. solani* и *M. ramosissimus*.

*F. oxysporum* и *A. solani* являются возбудителями заболеваний растений баклажана, фузариоза и серой гнили соответственно. Патогены попадают в ткани растений через почву и поражают все надземные органы растений, в том числе и плоды [17]. *R. stolonifer* так же является фитопатогеном и способен поражать растения баклажана [18].

Количественное содержание микроорганизмов на растениях баклажанов также ва-

рировало в разных районах. В правобережье в бактериальных сообществах численно доминировали представители видов *B. pseudomycoloides*, *B. coagulans*, *B. halodurans*, *B. oleronius* и *B. simplex*, в левобережье – *B. pseudomycoloides*, *B. lentus* и *B. simplex* (табл. 3).

Из 4 видов бактерий, которые обнаруживались на поверхности растений как в право- так и в левобережье области, статистически значимые различия в количественном содержании на поверхности листовых пластинок имели *B. coagulans* (критерий Уилкоксона 0,0037), *B. halodurans* (0,0321), во внутренних тканях из трёх видов бактерий, выделенных из всех исследованных районов, статистически достоверные различия имел лишь *B. amyloliquefaciens* (0,0030). Во всех случаях отмечалось достоверное уменьшение численности представителей бактериальных видов на растениях из левобережья.

**Количественное содержание бактерий на растениях баклажана  
в право- и левобережье Саратовской области**  
**Quantitative content of bacteria on eggplant plants in the right- and left-bank areas of the Saratov Region**

Вид / Specie	Правобережье / The right Bank		Левобережье / The left Bank	
	Поверхность растения, КОЕ/см <sup>2</sup> / Plant surface, CFU/cm <sup>2</sup>	Внутренние ткани растения, КОЕ/г / Internal plant tissues, CFU/g	Поверхность растения, КОЕ/см <sup>2</sup> / Plant surface, CFU/cm <sup>2</sup>	Внутренние ткани растения, КОЕ/г / Internal plant tissues, CFU/g
<i>A. aneuriniliticus</i>	10	10–10 <sup>2</sup>	10	0
<i>B. amyloliquefaciens</i>	10	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	0	10 <sup>2</sup>
<i>B. bataviensis</i>	0	10	0	0
<i>B. circulans</i>	0	10 <sup>3</sup>	0	0
<i>B. coagulans</i>	10–10 <sup>2</sup>	10–10 <sup>2</sup>	10	0
<i>B. drementensis</i>	0	10	0	0
<i>B. halodurans</i>	10–10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	10	0
<i>B. lentus</i>	0	0	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>
<i>B. oleronius</i>	10 <sup>2</sup>	10–10 <sup>2</sup>	0	0
<i>B. pseudomycooides</i>	10–10 <sup>2</sup> *	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	10–10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>
<i>B. psychrodurans</i>	10 <sup>2</sup>	0	0	0
<i>B. simplex</i>	10–10 <sup>2</sup>	10–10 <sup>2</sup>	0	10–10 <sup>3</sup>
<i>J. denitrificans</i>	10	0	0	0
<i>R. terrigena</i>	10	10	0	0

Примечание. \*Диапазон варьирования признака в пробах.  
Note. \* The range of variation of the trait in the samples.

Количественное содержание большинства видов грибов на растениях было ниже по сравнению с бактериями (табл. 4). В химическом составе сока растений баклажана присутствуют биологически активные соединения, в том числе фенолы (такие как п-аллилфенол, 3,5-дигидроксифенол), линолевая кислота, ксантин, сорбит и другие, которые обладают фунгистатической активностью и способны ингибировать рост микромицетов, включая *A. flavus* [19].

Помимо вышеперечисленных веществ, растения баклажана содержат в своём составе производные хлорогеновой кислоты, которые составляют 53 % от общего количества фенолов в экстракте растений, данные соединения обладают ингибирующим действием по отношению к *A. ustus*, что, в свою очередь, могло повлиять на его низкие количественные показатели [20].

В правобережье среди микромицетов наибольшую численность на исследованных растениях демонстрировали *A. solani* и *R. stolonifer*, в левобережье – *T. harzianum*, *R. stolonifer*, *M. ramosissimus*.

Среди пяти микромицетов, встречающихся на поверхности растений в право- и левобережье, статистически значимые различия количественных показателей имели *A. solani* (0,0005) и *R. stolonifera* (0,0024), во внутренних тканях – *A. niger* (0,0021), *F. oxysporum* (0,0510), *M. ramosissimus* (0,0032). В большинстве случаев отмеченные различия были в сторону уменьшения численности грибов на растениях из левобережья. Лишь у *M. ramosissimus* было выявлено статистически значимое увеличение численности во внутренних тканях растений из этих районов, что могло стать следствием его успешной адаптации к жизни в этом относительно защищённом биотопе.



Таблица 4 / Table 4

**Количественное содержание микромицетов на растениях баклажана в право- и левобережье Саратовской области**  
**Quantitative content of micromycetes on eggplant plants in the right- and left-bank areas of the Saratov Region**

Вид / Specie	Правобережье / The right Bank		Левобережье / The left Bank	
	Поверхность растения, КОЕ/см <sup>2</sup> / Plant surface, CFU/cm <sup>2</sup>	Внутренние ткани растения, КОЕ/г / Internal plant tissues, CFU/g	Поверхность растения, КОЕ/см <sup>2</sup> / Plant surface, CFU/cm <sup>2</sup>	Внутренние ткани растения, КОЕ/г / Internal plant tissues, CFU/g
<i>A. solani</i>	10–10 <sup>2</sup>	10	10	10
<i>A. flavus</i>	10	0	10	0
<i>A. niger</i>	10	10–10 <sup>2</sup>	10	10
<i>A. ustus</i>	0	10	10	0
<i>F. oxysporum</i>	10	10 <sup>2</sup>	10	10
<i>M. ramosissimus</i>	0	10	10	10–10 <sup>2</sup>
<i>P. janthinellum</i>	0	10	10	0
<i>R. stolonifer</i>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	10–10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>
<i>T. harzianum</i>	0	0	0	10–10 <sup>3</sup>

**Заключение**

Агроэкологические условия являются ключевым фактором формирования микробных сообществ в агроценозах.

Проведённые исследования позволили установить существенное влияние почвенно-климатических условий право- и левобережья Саратовской области на формирование эпифитной и эндофитной микробиоты *S. melongena*.

Для растений из агроценозов правобережья характерно значительно большее таксономическое разнообразие и более высокая численность как бактериальных, так и грибных сообществ. Отмечены различия во встречаемости и количественных показателях некоторых микроорганизмов на исследуемых растениях.

Вместе с тем обнаружены виды, характерные для растений баклажана, произрастающих в разных районах области. К числу таких видов с высокими адаптационными возможностями можно отнести бактерии *B. pseudomycoides*, *B. coagulans*, *B. halodurans*, *B. simplex* и грибы *A. solani*, *A. niger*, *F. oxysporum*, *R. stolonifera*.

В составе как эпифитной, так и эндофитной микробиоты были выделены грибные фитопатогены, к которым относились *A. solani*, *F. oxysporum* и *R. stolonifer*.

Сравнительный анализ таксономического состава и функциональных особенностей микробиоты растений баклажана, произрастающих в различных агроклиматических зонах Саратовской области, представляет научный и практический интерес для аграриев. Полученные результаты позволяют выявить региональные особенности микробиома данной культуры и могут быть использованы для разработки научно обоснованных рекомендаций по применению микробиологических препаратов и методов биологической защиты, адаптированных к локальным условиям.

**Список литературы**

1. Болгов И. А., Матвеев Ш., Маштаков Д. А. Геоинформационная оценка климатических условий Саратовской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2024. Т. 73, № 1. С. 404–410. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-45>
2. Анализ рынка баклажанов в России // Гидмаркет: [сайт]. URL: <https://gidmark.ru/cat1/marketingovoe-issledovanie-rynka-baklazhanov> (дата обращения: 15.01.2024).
3. Мишина М. Н. Собственные защитные реакции растений на поражение фитопатогенами // Наука и образование. 2020. Т. 3, № 3. С. 23–26.



4. Болдырев В. А., Пискунов В. В. Полевые исследования морфологических признаков почв : учеб. пособие для студ. биол. и геогр. фак. / 2-е изд., перераб. и доп. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2006. 60 с.
5. Определитель бактерий Берджи : в 2 т. М. : Мир, 2006. Т. 1. 429 с. Т. 2. 799 с.
6. Sorescu I., Stoica C. Online advanced bacterial identification Software, an original tool for phenotypic bacterial identification // Rom Biotechnol. Lett. 2021. Vol. 26, № 6. P. 3047–3053.
7. Самтон Д., Фотергилл А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно патогенных грибов. М. : Мир, 2001. 486 с.
8. Благовещенская Е. Ю. Фитопатогенные микромицеты : учебный определитель. М. : ЛЕНАНД, 2015. 240 с.
9. Мاستицкий С. Э. Методическое пособие по использованию программы STATISTICA при обработке данных биологических исследований. Минск : РУП «Институт рыбного хозяйства», 2009. 76 с.
10. Sanchis V., Patino-Navarrete R. Evolutionary processes and environmental factors underlying the genetic diversity and lifestyles of *Bacillus cereus* // Research in Microbiology. 2017. Vol. 168, № 4. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2016.07.002>
11. Amersan N., Jayakumar V., Thajuddin N. Isolation and characterization of endophytic bacteria associated with chilli (*Capsicum annum* L.) grown in coastal agricultural ecosystem // Indian Journal of Biotechnology. 2014. Vol. 13. P. 247–255. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0321-7>
12. Gobindo K. P., Mahmud S., Dutta A. K., Sarkar S., Laboni A. A., Hossain M. S., Nagata A., Karmaker P., Razu M. H., Kazi T., Zaman S. Volatile compounds of *Bacillus pseudomycoloides* induce growth and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 121–130. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22354-2>
13. Penkhrue W., Jendrossek D., Khanongnuch C., Pathom-Aree W., Aizawa T. Response surface method for polyhydroxybutyrate (PHB) bioplastic accumulation in *Bacillus drentensis* BP17 using pineapple peel // PloS ONE. 2020. Vol. 15, № 3. P. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230443>
14. Badiee H., Sabermahani M., Tabandeh F., Javadi A. S. Application of an indigenous bacterium in comparison with *Sporosarcina pasteurii* for improvement of fine granular soil // International Journal of Environmental Science and Technology. 2019. Vol. 16, № 12. P. 8389–8400. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02292-9>
15. Bautista-Banos S., Bosquez-Molina E., Barrera-Necha L. L. *Rhizopus stolonifera*. Mexico : Academic Press, 2014. 44 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00001-6>
16. Ihsan F. H. Biodegradation of kerosene by *Aspergillus niger* and *Rhizopus stolonifer* // Journal of Applied & Environmental Microbiology. 2014. Vol. 2, № 1. P. 31–36. <https://doi.org/10.12691/jaem-2-1-7>
17. Трусевич А. В. Болезни и вредители баклажана // Профессиональные семена : [сайт]. URL: <https://gavrishprof.ru/info/publications/bolezni-i-vrediteli-baklazhana> (дата обращения: 22.03.2024).
18. Uthman O., Nneka V. Aetiology of fungal pathogens of garden egg (*Solanum melongena* L.) in Nsukka Area // International Journal of Applied and Natural Sciences. 2013. Vol. 2, № 4. P. 73–80.
19. Isman A., Qari S. H., Shaver R., Elshaer M. M., Desoky E. S., Youssef N. H., Hamad N. A., Abdelkhalek A., Elsamra I. A., Behiry S. I. The application of pomegranate, sugar apple, and eggplant peel extracts suppresses *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin B1 biosynthesis pathway // Horticulturae. 2021. Vol. 7, № 12. P. 558–562. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120558>
20. Anibarro-Ortega M., Dias M. I., Petrovic J., Nunez S., Calhella R. C., Costa E. M., Machado M., Pintado M., Sokovic M., Lopez V., Barros L., Pinela J. Valorization of *Solanum melongena* L. crop by-products: Phenolic composition and in vitro antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory, cytotoxic, and antimicrobial properties // Process Biochemistry. 2025. Vol. 153. P. 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.04.002>

## References

1. Bolgov I. A., Matveyev Sh., Mashtakov D. A. Geoinformation assessment of the climate conditions in the Saratov region. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.*, 2024, vol. 73, no. 1, pp. 404–410 (in Russian). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-45>
2. Analysis of the Eggplant Market in Russia. *Gidmarket*. Website (in Russian). Available at: <https://gidmark.ru/cat1/marketingovoe-issledovanie-rynka-baklazhanov> (accessed January 15, 2024).
3. Mishina M. N. Plant's own protective reactions to phytopathogen damage. *Science and Education*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 23–26 (in Russian).
4. Boldyrev V. A., Piskunov V. V. *Polevye issledovaniya morfologicheskikh priznakov pochv: ucheb. posobie dlya stud. biol. i geogr. fak.* [Field studies of morphological features of soils: Textbook for students. biol. and geographical facts. 2nd ed., revised and dop.]. Saratov, Saratov State University Publ., 2006. 60 p. (in Russian).
5. *Opredelitel' bakterii Bergey: v 2 t.* [Bergey's Manual of Determinative Bacteriology: in 2 vols]. Moscow, Mir, 2006. Vol. 1. 429 p. Vol. 2. 799 p. (in Russian).
6. Sorescu I., Stoica C. Online advanced bacterial identification software, an original tool for phenotypic bacterial identification. *Rom Biotechnol Lett.*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 3047–3053.
7. Sutton D., Fothergill A., Rinaldi M. *Opredelitel' patogennykh i uslovno patogennykh gribov* [Identification of Pathogenic and Opportunistic Fungi]. Moscow, Mir, 2001. 486 p. (in Russian).
8. Благовещенская Е. Ю. *Fitopatogennyye mikromitsety. Uchebnyy opredelitel* [Phytopathogenic micro-mycetes. Educational identifier]. Moscow, LENDAND, 2015. 240 p. (in Russian).



9. Mastitsky S. E. *Metodicheskoe posobie po ispol'zovaniyu programmy STATISTICA pri obrabotke dannykh biologicheskikh issledovaniy* [Guidelines for using the STATISTICA program in processing biological research data]. Minsk, RUE "Institute of Fisheries" Publ., 2009. 76 p. (in Russian).
10. Sanchis V., Patino-Navarrete R. Evolutionary processes and environmental factors underlying the genetic diversity and lifestyles of *Bacillus cereus*. *Research in Microbiology*, 2017, vol. 168, no. 4, pp. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2016.07.002>
11. Amersan N., Jayakumar V., Thajuddin N. Isolation and characterization of endophytic bacteria associated with chilli (*Capsicum annuum* L.) grown in coastal agricultural ecosystem. *Indian Journal of Biotechnology*, 2014, vol. 13, pp. 247–255. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0321-7>
12. Gobindo K. P., Mahmud S., Dutta A. K., Sarkar S., Laboni A. A., Hossain M. S., Nagata A., Karmaker P., Razu M. H., Kazi T., Zaman S. Volatile compounds of *Bacillus pseudomycoloides* induce growth and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, pp. 121–130. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22354-2>
13. Penkhrue W., Jendrossek D., Khanongnuch C., Pathom-Aree W., Aizawa T. Response surface method for polyhydroxybutyrate (PHB) bioplastic accumulation in *Bacillus drentensis* BP17 using pineapple peel. *PloS ONE*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230443>
14. Badiie H., Sabermahani M., Tabandeh F., Javadi A. S. Application of an indigenous bacterium in comparison with *Sporosarcina pasteurii* for improvement of fine granular soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, vol. 16, no. 12, pp. 8389–8400. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02292-9>
15. Bautista-Banos S., Bosquez-Molina E., Barrera-Necha L. L. *Rhizopus stolonifera*. Mexico, Academic Press, 2014. 44 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00001-6>
16. Ihsan F. H. Biodegradation of Kerosene by *Aspergillus niger* and *Rhizopus stolonifer*. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 31–36. <https://doi.org/10.12691/jaem-2-1-7>
17. Trusevich A. V. Diseases and Pests of Eggplant. *Professional Seeds*. Website. (in Russian). Available at: <https://gavrishprof.ru/info/publications/bolezni-i-vrediteli-baklazhana> (accessed March 22, 2024).
18. Uthman O., Nneka V. Aetiology of fungal pathogens of garden egg (*Solanum melongena* L.) in Nsukka Area. *International Journal of Applied and Natural Sciences*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 73–80.
19. Isman A., Qari S. H., Shower R., Elshaer M. M., Dessoky E. S., Youssef N. H., Hamad N. A., Abdelkhalik A., Elsamra I. A., Behiry S. I. The application of pomegranate, sugar apple, and eggplant peel extracts suppresses *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin B1 biosynthesis pathway. *Horticulturae*, 2021, vol. 7, no. 12, pp. 558–562. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120558>
20. Anibarro-Ortega M., Dias M. I., Petrovic J., Nunez S., Calhelha R. C., Costa E. M., Machado M., Pintado M., Sokovic M., Lopez V., Barros L., Pinela J. Valorization of *Solanum melongena* L. crop by-products: Phenolic composition and in vitro antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory, cytotoxic, and antimicrobial properties. *Process Biochemistry*, 2025, vol. 153, pp. 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.04.002>

Поступила в редакцию 18.11.2025; одобрена после рецензирования 20.11.2025; принята к публикации 25.11.2025  
The article was submitted 18.11.2025; approved after reviewing 20.11.2025; accepted for publication 25.11.2025



Научная статья

УДК 577.344.3.57.033

## Фотодинамическое воздействие с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения для лечения моделированных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных



А. Г. Мусаелян<sup>1,2</sup>, В. В. Алипов<sup>2</sup>, Е. С. Ефимова<sup>1</sup>, У. О. Грицай<sup>2</sup>,  
Т. В. Шарабарина<sup>1</sup>, В. В. Тучин<sup>1</sup>, Е. С. Тучина<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского Минздрава РФ, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Мусаелян Ара Гагикович, <sup>1</sup>младший научный сотрудник кафедры биохимии и биофизики; <sup>2</sup>ассистент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии, [musaelyan.gagik@mail.ru](mailto:musaelyan.gagik@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9849-7304>

Алипов Владимир Владимирович, доктор медицинских наук, академик РАЕ, профессор кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии, [vladimiralipov@yandex.ru](mailto:vladimiralipov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1859-0825>

Ефимова Екатерина Сергеевна, студент биологического факультета, [kkkatyefimova@mail.ru](mailto:kkkatyefimova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Грицай Ульяна Олеговна, студент Клинического института детского здоровья, [ulanagricaj3@gmail.com](mailto:ulanagricaj3@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-9932-7602>

Шарабарина Татьяна Валерьевна, инженер кафедры биохимии и биофизики, [tanuha290902@gmail.com](mailto:tanuha290902@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Тучин Валерий Викторович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, профессор кафедры оптики и биофотоники, [tuchinvv@mail.ru](mailto:tuchinvv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7479-2694>

Тучина Елена Святославна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биофизики, [kliany@rambler.ru](mailto:kliany@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

**Аннотация.** Проведено исследование эффективности антимикробной фотодинамической терапии (АФДТ) при лечении моделированных гнойных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных. В ходе эксперимента тестировали две схемы «излучение + фотосенсибилизатор»: первая – с использованием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего, вторая – с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианинового зеленого. Проведенные на первом этапе исследования *in vitro* позволили определить оптимальное время проведения АФДТ (не менее 15 мин), тип растворителя для каждого из фотосенсибилизаторов (0,24% раствор интралипида для метиленового синего и 0,44% раствор альбумина для индоцианинового зеленого). Установлено, что 15-минутные сеансы АФДТ на протяжении 15 дней приводят к уничтожению микроорганизмов в полости абсцесса, облитерации полости, нормализации физиологических и биохимических показателей крови. Для сравнения двух схем АФДТ были использованы коэффициенты эффективности, анализ значений которых показал, что лазерное инфракрасное (808 нм) излучение в сочетании с индоцианином зеленым, растворенным в 0,44% альбумине, оказывает более выраженный (в среднем на 5–6%) терапевтический эффект. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования клинической практики лечения внутрибрюшинных абсцессов бактериальной этиологии.

**Ключевые слова:** антибактериальная фотодинамическая терапия, красное светодиодное излучение, 660 нм, лазерное инфракрасное излучение, 808 нм, метиленовый синий, индоцианиновый зеленый, гнойный абсцесс

**Благодарности.** Авторы выражают признательность сотрудникам ветеринарного госпиталя Вавиловского университета и лично директору, доктору ветеринарных наук А. С. Рыхлову, сотрудникам вивария СГМУ им. В. И. Разумовского и лично заведующей виварием Н. А. Шушуновой, сотрудникам кафедры оптики и биофотоники, а также сотрудникам кафедры биохимии и биофизики СГУ им. Н. Г. Чернышевского за содействие при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-24-00370 от 28.12.2024 г.).



**Для цитирования:** Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Ефимова Е. С., Грицай У. О., Шарабарина Т. В., Тучин В. В., Тучина Е. С. Фотодинамическое воздействие с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения для лечения моделированных абсцессов брюшной полости у лабораторных животных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 63–75. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-63-75>, EDN: MVUWJI

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Photodynamic treatment using led red (660 nm) and laser infrared (808 nm) radiation for the treatment of simulated abdominal abscesses in laboratory animals

A. G. Musaelyan<sup>1,2</sup>, V. V. Alipov<sup>2</sup>, E. S. Efimova<sup>1</sup>, U. O. Gritsai<sup>2</sup>, T. V. Sharabarina<sup>1</sup>, V. V. Tuchin<sup>1</sup>, E. S. Tuchina<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachiya St., Saratov 410012, Russia

Ara G. Musaelyan, [musaelyan.gagik@mail.ru](mailto:musaelyan.gagik@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9849-7304>

Vladimir V. Alipov, [vladimiralipov@yandex.ru](mailto:vladimiralipov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1859-0825>

Ekaterina S. Efimova, [kkkatyefimova@mail.ru](mailto:kkkatyefimova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Ulyana O. Gritsai, [ulanagricaj3@gmail.com](mailto:ulanagricaj3@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-9932-7602>

Tatiana V. Sharabarina, [tanuha290902@gmail.com](mailto:tanuha290902@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-2422-3678>

Valery V. Tuchin, [tuchinv@mail.ru](mailto:tuchinv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7479-2694>

Elena S. Tuchina, [kliany@rambler.ru](mailto:kliany@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>

**Abstract.** This study examined the effectiveness of antimicrobial photodynamic therapy (APDT) in the treatment of simulated purulent abdominal abscesses in laboratory animals. Two "radiation + photosensitizer" regimens were tested: 1) using red LED (660 nm) radiation and methylene blue, 2) using laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green. *In vitro* studies conducted in the first phase determined the optimal APDT duration (at least 15 minutes) and the solvent type for each photosensitizer (0.24% Intralipid solution for methylene blue and 0.44% albumin solution for indocyanine green). It was found that 15-minute APDT sessions over 15 days resulted in the destruction of microorganisms in the abscess cavity, obliteration of the cavity, and normalization of physiological and biochemical blood parameters. To compare the two regimens, efficacy coefficients were used. Analysis of these values revealed that laser infrared (808 nm) radiation combined with indocyanine green dissolved in 0.44% albumin produced a more pronounced therapeutic effect (on average, 5–6%). These results can be used to improve clinical practice in the treatment of bacterial intraperitoneal abscesses.

**Keywords:** antibacterial photodynamic therapy, red LED radiation, 660 nm, laser infrared radiation, 808 nm, methylene blue, indocyanine green, purulent abscess

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to the staff of the Vavilov University Veterinary Hospital, including its director Doctor of Veterinary Sciences Andrey S. Rykhlov; the staff of the vivarium at the Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, including its head Natalya A. Shushunova; the staff of the Department of Optics and Biophotonics, and the staff of the Department of Biochemistry and Biophysics at Saratov State University for their assistance with the experiments.

The research has been carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 25-24-00370, 28.12.2024).

**For citation:** Musaelyan A. G., Alipov V. V., Efimova E. S., Gritsai U. O., Sharabarina T. V., Tuchin V. V., Tuchina E. S. Photodynamic treatment using led red (660 nm) and laser infrared (808 nm) radiation for the treatment of simulated abdominal abscesses in laboratory animals. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 63–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-63-75>, EDN: MVUWJI

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

В хирургической практике, как в медицине, так и в ветеринарии, актуальной проблемой по-прежнему является оперативное лечение гнойных абсцессов мягких тканей, в частности – абсцессов брюшной полости [1–3]. При традиционном лечении с применением чрескожного дренирования и антибиотикотерапии эффективность зависит от локализации, размера и структуры абсцесса, степени чувствительности

микроорганизма-возбудителя к антибиотическим препаратам. При этом любое оперативное вмешательство несет риск развития вторичных инфекций, дополнительной травматизации тканей, образования грубых рубцов [3–5].

Антимикробная фотодинамическая терапия (АФДТ) является одним из перспективных малоинвазивных методов для лечения внутрибрюшинных абсцессов бактериальной этиологии [5–8]. АФДТ основывается на действии трех компонентов – оптического излучения



с определенной длиной волны, фотосенсибилизатора (ФС) и молекулярного кислорода в микрокапиллярах и тканях. Образование активных форм кислорода в ходе воздействия вызывает необратимое повреждение жизненно важных структур бактериальной клетки – мембран, ферментов, нуклеиновых кислот, чем провоцирует ее гибель [6–8]. Благодаря этому клетки микроорганизмов не способны приобрести резистентности к АФДТ даже в течение 5–10 сеансов терапии.

Применение оптического излучения красного (630–660 нм) и инфракрасного (780–810 нм) диапазонов наиболее оправдано при АФДТ абсцессов брюшной полости, поскольку именно эти длины волн обладают достаточной проникающей способностью, позволяющей активировать молекулы ФС в глубине биологических тканей. Кроме того, излучение данных длин волн обладает физиотерапевтическим и иммуностимулирующим действием, что способствует более быстрой и безболезненной регенерации поврежденных тканей [9, 10]. Хорошо зарекомендовавшими себя фотосенсибилизаторами для данных длин волн являются метиленовый синий и индоцианиновый зеленый, которые широко применяют как в противоопухолевой, так и в антимикробной фототерапии [5, 7, 10].

Таким образом, целью настоящего исследования стал комплексный анализ изменений, происходящих в организме лабораторных животных с моделированным гнойным абсцессом, при проведении АФДТ с использованием светодиодного красного (660 нм) и лазерного инфракрасного (808 нм) излучения в сочетании с фотосенсибилизаторами.

## Материалы и методы

### *Бактериальная культура*

Объектом исследования служил стандартный штамм *Staphylococcus aureus* 209 P (ГИСК им. Л. А. Тарасевича, Москва, Россия). Микроорганизмы выращивали при температуре 37°C на универсальных питательных средах. Для проведения экспериментов по чувствительности к излучению использовали суспензии *S. aureus* 209 P после 8 ч (экспоненциальная фаза) и 14 ч (стационарная фаза) культивирования.

### *Источник и параметры оптического излучения*

В качестве источников излучения использовали: 1) светодиод с максимумом испускания на

длине волны 660 нм и интегральной плотностью мощности 30 мВт/см<sup>2</sup>, 2) лазер с максимумом испускания на длине волны 808 нм и интегральной плотностью мощности 100 мВт/см<sup>2</sup>.

Во всех экспериментах режим излучения был непрерывным. Время облучения в экспериментах *in vitro* составляло 5, 10, 15 мин, в экспериментах *in vivo* – 15 мин.

### *Фотосенсибилизаторы и растворители*

В качестве фотосенсибилизаторов использовали: 1) метиленовый синий (МВ) с максимумом поглощения 660 нм в концентрациях 0,0001, 0,001, 0,01 и 0,1%; 2) индоцианиновый зеленый (ИЗ) с максимумом поглощения 787 нм в концентрациях 0,01, 0,05, 0,1, 0,5%.

Тестировали эффективность работы ФС в таких растворителях, как: физраствор (SS), смесь глицерина, этанола и воды (в соотношении 25:25:50, GEt), суспензия 0,24% интралипида в физрастворе (IL), 0,44% альбумин в физрастворе (BSA).

### *Постановка экспериментов in vitro*

Бактериальную взвесь готовили в стерильном физиологическом растворе методом последовательных десятикратных разведений. Контрольные образцы взвеси инкубировали в течение 15 мин без доступа света. Для создания асептических условий в ходе эксперимента использовали стерильный полистирольный планшет. Бактериальную взвесь из конечного разведения вносили в ячейки планшета в объеме 0,1 мл.

Источник излучения располагали над ячейками планшета. По истечении времени воздействия источник излучения отключали, взвеси бактерий из данных ячеек переносили в соответствующие ячейки плоскодонного планшета с 0,5% пептоном.

При тестировании фотосенсибилизаторов и растворителей для них бактериальные культуры помещали в растворы ФС, инкубировали в течение 30 мин. Затем отмывали бактериальные клетки центрифугированием, ресуспендировали в чистом физиологическом растворе, взвеси бактерий переносили в соответствующие ячейки плоскодонного планшета с 0,5% пептоном.

Учет результатов осуществляли путем измерения оптической плотности бактериальных суспензий на планшетном фотометре iMark (Bio Rad, США) на длине волны 660 нм через 24 ч после инкубации при 37°C. Для контроля чистоты культуры и динамики изменения численности проводили параллельный высеив из



лунок планшета на чашки Петри с ГРМ-агаром и последующим подсчетом числа КОЕ. Численность микроорганизмов выражали либо в виде десятичного логарифма (lgКОЕ/мл), либо в виде отношения к контролю в % (КОЕ, %).

#### Постановка экспериментов *in vivo*

Исследования проводились на 32 крысах-самках породы «стандарт» массой  $200 \pm 50$  г с моделированными абсцессами. Лабораторные животные содержались в регламентированных условиях вивария при соблюдении всех правил содержания лабораторных животных. На проведение экспериментов получено разрешение локального этического комитета (ЛЭК) Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол ЛЭК № 2 от 16.09.2022). Уход за животными и проведение экспериментов осуществлялись согласно основным морально-этическим принципам проведения биомедицинских экспериментов на животных, сформулированных в следующих документах: «Правила лабораторной практики в РФ» (Good Laboratory Practice), утвержденные приказом Министерства здравоохранения и социального развития от 23.08.2010 №708н, и «Международные рекомендации по проведению биомедицинских исследований с использованием животных», принятые Международным советом медицинских научных обществ (CIOMS) в 1985 г.

Моделирование гнойного абсцесса (ГА) проводили в соответствии с методикой, разработанной ранее [11]. Транскутанно вводили модифицированный катетер Фоллея, укороченный до 3 см, с баллоном из силиконовой резины на дистальном конце. После заполнения баллона 2 мл физиологического раствора (NaCl 0,9%), производили перевязку катетера проксимальнее баллона и фиксацию дистальной части его при помощи кожной дупликации.

Для гарантированного формирования острого ГА наносили культуру возбудителя патологического процесса *S. aureus* 209 P непосредственно на поверхность дистального отдела катетера. На 5-е сутки опорожняли баллон, удаляли катетер. Кровь для общего и биохимического анализа брали из хвостовой вены.

Проводили две независимые серии экспериментов. В первой серии опытов использовали светодиодное красное излучение и метиленовый синий (МС) в растворе интралипида, во второй серии опытов – лазерное инфракрасное излучение и индоцианинового зеленого (ИЗ) в 0,44% растворе альбумина.

Как в первой серии, так и во второй животных делили на 4 группы (по 4 крысы в каждой), из которых первая группа была контрольной, остальные опытными.

В контрольной (1-я группа) группе лечения не производилось; во второй (2-я группа) группе полость ГА обрабатывали раствором фотосенсибилизатора 1 раз в 3 дня на протяжении 10 дней; в третьей (3-я группа) группе осуществляли воздействие с помощью излучения в течение 15 мин на протяжении 10 дней; в четвертой (4-я группа) группе проводили обработку полости ГА раствором фотосенсибилизатора и излучением в течение 15 мин на протяжении 10 дней.

Общий и биохимический анализы крови проводили за день до формирования ГА (1-й день), в день начала фотодинамического воздействия (5-й день), на 10-й и 15-й день. УЗИ-контроль объема полости ГА осуществляли в те же дни эксперимента. В те же дни проводили высеивание 0,1 мл содержимого полости гнойного абсцесса на питательную среду (ГРМ-агар) для определения концентрации бактериальных клеток в экссудате.

Схема эксперимента (рис. 1) включала основные этапы работы: 1) получение контрольных данных общего и биохимического анали-

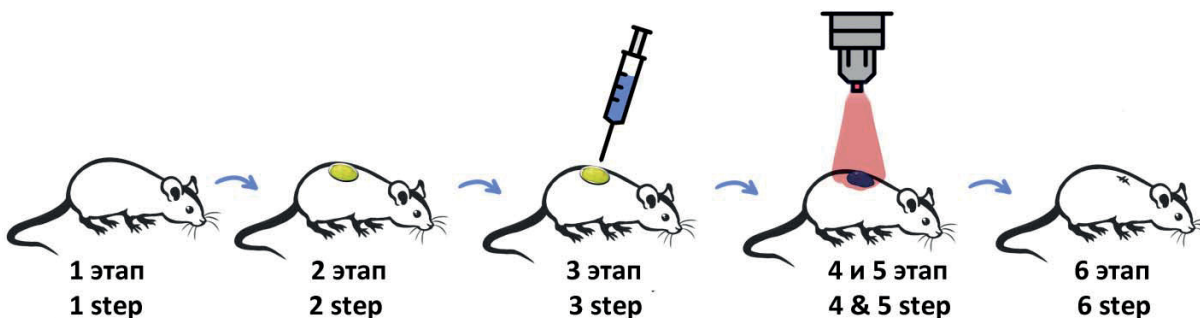


Рис. 1. Схема проведения эксперимента  
Fig. 1. Experimental scheme



зов крови, формирование ГА хирургическим методом; 2) на 5-й день при сформированном ГА – получение данных общего и биохимического анализов крови, уровня микробной обсемененности, данных УЗИ полости ГА; 3) на 5-й день – введение фотосенсибилизатора; 4) на 5-й день – облучение места над полостью ГА светодиодным излучением; 5) повторные сеансы проведения ФДТ; 6) на 15-й день завершение ФДТ и оценка результатов.

При работе со светодиодным излучением руководствовались ГОСТом 31581-2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий» и Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров № 5804-91.

*Расчет коэффициентов эффективности АФДТ*

Для сравнения эффективности двух комбинаций для АФДТ использовали оригинальный способ [12]. Для этого определяли ряд параметров крови: общее число лейкоцитов и тромбоцитов, концентрации креатинина и гемоглобина, среднее значение нормы общего числа лейкоцитов, тромбоцитов, содержание креатинина и гемоглобина. Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяют из следующих соотношений параметров, полученных в эксперименте:

$$K_1 = \frac{L_{ex}/L_n}{T_{ex}/T_n}, \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{C_{ex}/C_n}{H_{ex}/H_n}, \quad (2)$$

где  $L_{ex}$  – значение общего числа лейкоцитов;  $L_n$  – среднее значение нормы общего числа лейкоцитов;  $T_{ex}$  – значение общего числа тромбоцитов;  $T_n$  – среднее значение нормы общего числа тромбоцитов;  $C_{ex}$  – значение содержания креатинина в крови;  $C_n$  – среднее значение нормы содержания креатинина;  $H_{ex}$  – значение содержания гемоглобина в крови;  $H_n$  – среднее значение нормы содержания гемоглобина.

На основании этих данных при значении коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  более единицы делали вывод об отсутствии эффективности АФДТ, при значении коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  менее или равно единице – о наличии эффективности АФДТ.

Дополнительно рассчитывали значение скорости редукции абсцесса (3) из соотношения:

$$v_r = V_a / \text{сут}, \quad (3)$$

где  $V_a$  – объем полости гнойного абсцесса, см<sup>3</sup>;  $v_r$  – скорость редукции полости гнойного абсцесса, см<sup>3</sup>/сут; сут – время наблюдения.

### Статистическая обработка данных

Измерения для каждого экспериментального образца проводились в пятикратной повторности, данные обрабатывали с помощью пакета программ Statistica base (StatSoft, США). Достоверность отличий определяли с использованием критерия Стьюдента. Выборки считались достоверно отличными при  $p < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

#### *Определение оптимальных параметров фотодинамического воздействия in vitro*

Воздействие красного светодиодного излучения с длиной волны 660 нм на бактериальные клетки, находящиеся в фазе экспоненциального роста, в течение 5 мин приводило к снижению их численности на 19%, в течение 15 мин – на 23%, в течение 30 мин – на 36% (рис. 2, а). Наличие достоверных различий по отношению к контролю (0 мин) – при уровне значимости  $p < 0,05$ . При воздействии на культуру, находящуюся в стационарной фазе, отмечено общее повышение устойчивости клеток к излучению на 10–15%.

Обработка бактериальных клеток в фазе экспоненциального роста инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 808 нм вызывала снижение численности на 25% после 5 мин воздействия, на 27% – после 15 мин и на 37% – после 30 мин (см. рис. 2, б). В данном случае сохранялась тенденция большей (на 7–12%) устойчивости клеток, перешедших в стационарную фазу роста, к оказываемому воздействию.

Показано, что концентрация метиленового синего 0,0001% не вызывает снижения численности исследуемых микроорганизмов. Заметное сокращение выживаемости (на 16%) отмечено при использовании концентрации МС 0,01%. Выраженное сокращение численности регистрировалось при использовании концентраций 0,05 и 0,25% – на 35–40%. Для дальнейшей работы была выбрана концентрация 0,0001%, не вызывавшая гибели бактериальных клеток, чтобы исключить токсическое действие ФС на клетки нормальной микрофлоры и клетки тканей макроорганизма в эксперименте *in vivo*.

Анализ чувствительности клеток к инкубации в растворе индоцианинового зеленого показал, что *S. aureus* 209 P устойчивы к действию данного красителя как в концентрации

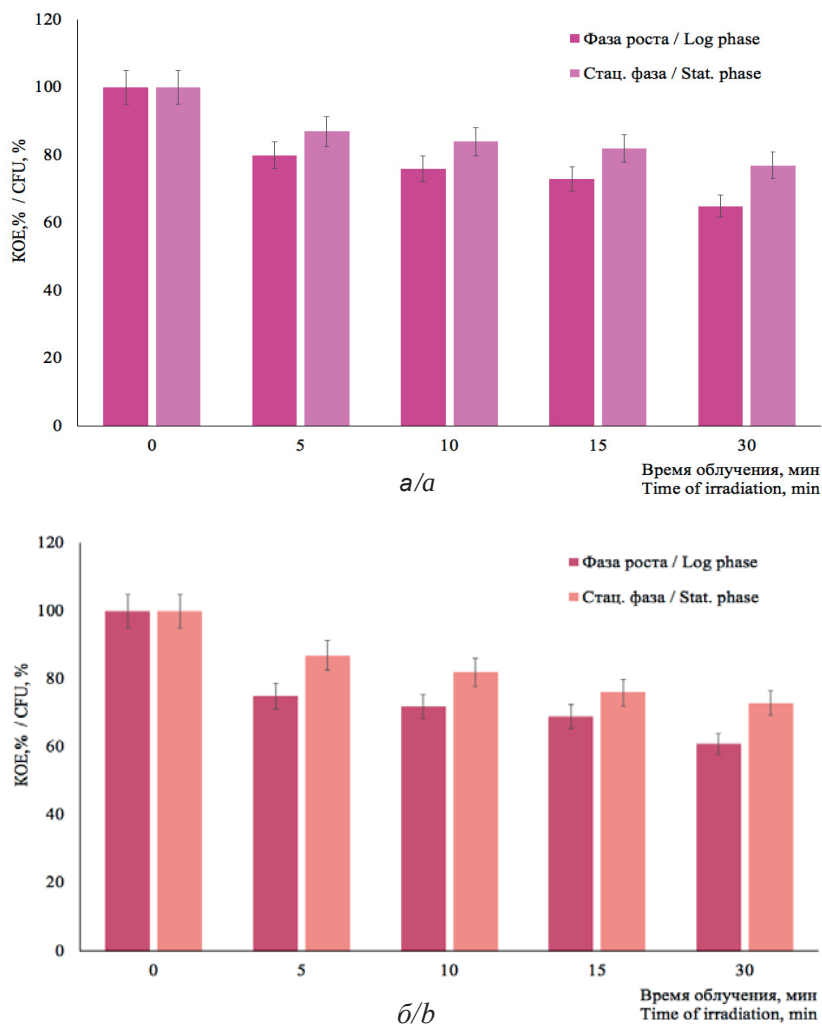


Рис. 2. Изменение численности *S. aureus* 209 P при воздействии излучения: *a* – светодиодного красного (660 нм), *б* – лазерного инфракрасного (808 нм)  
Fig. 2. Change in the number of *S. aureus* 209 P during exposure of radiation: *a* – LED red (660 nm), *b* – laser infrared (808 nm)

0,05%, так и к превышающей ее в 10 раз: снижение числа КОЕ отмечено на 10–15%. Таким образом, для дальнейших исследований была выбрана концентрация ИЗ равная 0,1%.

Представляло интерес оценить изменение численности бактерий при использовании различных растворителей для ФС в сочетании с действием излучения.

Снижение численности *S. aureus* 209 P при использовании комбинации МС+ФР, а также комбинации МС и альбумин составило 55–65% после 5 мин действия светодиодного красного (660 нм) излучения и не изменялось до 15 мин, данная комбинация обеспечивала уменьшение числа КОЕ на 68–75% после 30 мин воздействия. Глицерин-спиртовая смесь, как показано в эксперименте, обеспе-

чивала выраженное усиление фотодинамического действия МС после 15 мин облучения, отмечено снижение численности на 63%, к 30-минутной экспозиции снижение численности составило 83%. Использование интралипида вызывало видимое усиление фотодинамического эффекта МС после 15 мин облучения (сокращение КОЕ на 75%) и к 30 мин облучения обеспечивало гибель 88% бактериальной популяции (рис. 3, *a*). Наличие достоверных различий по отношению к контролю (0 мин) при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Подавляющее действие лазерного инфракрасного (808 нм) излучения на клетки *S. aureus* 209 P при использовании в качестве ФС индоцианинового зеленого существенно возрастало. ИЗ, растворенный в физиологи-

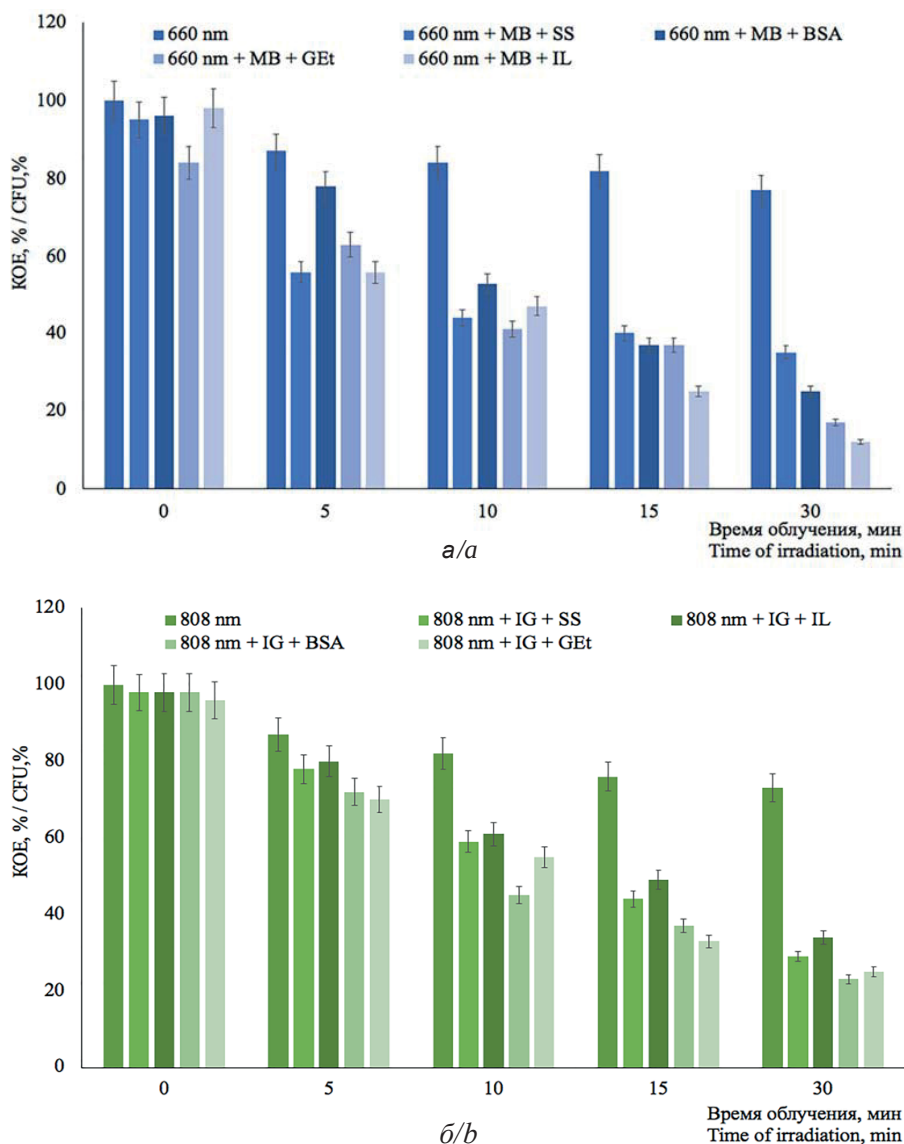


Рис. 3. Изменение численности (КОЕ, %) *S. aureus* 209 P в ходе фотодинамического воздействия при использовании различных растворителей для фотосенсибилизаторов: а – при длине волны 660 нм в присутствии метиленового синего; б – при длине волны 808 нм в присутствии индоцианинового зеленого

Fig. 3. Change in the number (CFU, %) of *S. aureus* 209 P during photodynamic exposure using different solvents for photosensitizers: a – at a wavelength of 660 nm in the presence of methylene blue; b – at a wavelength of 808 nm in the presence of indocyanine green

ческом растворе, приводил к снижению численности на 54% после 15 мин облучения и на 71% – после 30 мин воздействия. Использование в качестве растворителей глицерин-спиртовой смеси или альбумина усиливало фотодинамический эффект излучения, сокращение числа КОЕ после 15 мин воздействия наблюдалось на 63–67%, после 30 мин – на 75–77%. Использование интралипида не вызывало усиления фотодинамического эффекта по сравнению с физиологическим раствором (см. рис. 3, б).

При анализе результатов в качестве растворителя для метиленового синего – суспензия 0,24% интралипида в физрастворе, для индоцианинового зеленого – 0,44% альбумин в физрастворе.

*Использование светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего для лечения гнойных абсцессов in vivo*

Установлено, что использование красного светодиодного излучения для чрескожной обработки области абсцесса снижает обсеменен-



ность инфильтрата на 1 lgKOE/мл после первого сеанса облучения, на 1,5 lgKOE/мл – после 5-го сеанса, на 2,8 lgKOE/мл – после 10-го сеанса и на 4,7 lgKOE/мл – после 15-го сеанса (табл. 1). Использование излучения в сочетании с метиленовым синим ускоряет снижение бактериальной нагрузки уже после 5-го сеанса воздействия (на 3,7 lgKOE/мл). Лучшие по-

казатели – скорость снижения бактериальной нагрузки, редукция абсцесса, восстановление нормальных значений показателей крови – отмечены к 10-му дню эксперимента для 4-й группы животных. У групп 1 и 4 все показатели достигали нормы к 15-му дню, в то время как для группы 2 восстановление произошло на 17-е сутки, а для группы 3 – на 20-е.

Таблица 1 / Table 1

**Изменение численности *S. aureus* 209 P в области гнойного абсцесса под действием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего**  
**Change in the number of *S. aureus* 209 P in the area of a purulent abscess under the action of LED red (660 nm) radiation and methylene blue**

Сутки / Day	lgKOE/мл / lgCFU/ml			
	1-я группа / 1 group	2-я группа / 2 group	3-я группа / 3 group	4-я группа / 4 group
1-й день (формирование абсцесса) / Day 1(abscess formation)	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35
5-й день (начало лечения) / Day 5 (beginning of treatment)	6,5±0,32	6,3±0,31	6,0±0,30*	5,6±0,28*
10-й день (5-й день лечения) / Day 10 (5th day of treatment)	5,7±0,29*	6,1±0,31*	5,5±0,27*	3,3±0,16*
15-й день (10-й день лечения) / Day 15 (10th day of treatment)	3,4±0,17*	5,0±0,25*	4,2±0,21*	1,1±0,05*
20-й день (завершение лечения) / Day 20 (completion of treatment)	2,8±0,14*	3,2±0,16*	2,3±0,11*	0,9±0,03*

Примечание. \*Наличие достоверных различий по отношению к контролю (1-й день) при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Note. \*Presence of significant differences in relation to the control (1 day) at a significance level of  $p < 0,05$ .

При анализе таких параметров, как лейкоцитарная формула, СОЭ и содержание в крови С-реактивного белка было показано, что используемый метод обеспечивал снижение уровня воспалительного процесса. Показано, что на 5-й день эксперимента изменяется процентное соотношение клеток крови по сравнению с физиологической нормой. Существенно увеличивается число лейкоцитов, число тромбоцитов, напротив, снижается (табл. 2).

Ежедневное облучение способствовало восстановлению средней концентрации гемоглобина в эритроците, а также восстановлению нарушения функциональной активности тромбоцитов. Кроме того, было подтверждено, что применение АФДТ с использованием красного (660 нм) малой мощности эффективно корректирует длительные нарушения в процессе гемостаза, предупреждая нарушения в системе свертывания крови и фибринолизе.

УЗИ на 5-й день после формирования гнойного абсцесса у всех животных лоцировалось анэхогенное образование в брюшной полости, отмечено значительное повышение эхогенности окружающих тканей. На 15-й день эксперимента, после десятидневного проведения антимикробного фотодинамического воздействия с использованием красного (660 нм) излучения и 0,0001% метиленового синего в 0,24% растворе интралипида имеет место следующая картина: в области абсцесса лоцируются гипозоногенные ткани, умеренно однородные, полостей и образований не обнаружено, подкожно-жировая клетчатка повышенной эхогенности.

*Использование лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцинина для лечения гнойных абсцессов in vivo*

При высевах содержимого гнойного абсцесса на питательную среду установлено, что в ходе АФДТ с использованием инфракрасного



Таблица 2 / Table 2

**Динамика некоторых показателей крови лабораторных крыс в ходе АФДТ с использованием светодиодного красного (660 нм) излучения и метиленового синего**  
**Dynamics of some blood parameters in laboratory rats during APDT using red LED (660 nm) radiation and methylene blue**

День исследования / Day of experiment	1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15				Норма / Normal
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Группа животных / Group of animals													
Лейкоциты $\times 10^9$ кл/л / Leukocytes $\times 10^9$ cells/l	8,6	9,1	8,7	9	26,8	28,5	28,2	26	15,6	9,7	9,5	8,4	12,5
Эритроциты $\times 10^{12}$ кл/л / RBC, $\times 10^{12}$ cells/l	9,1	8,8	8,5	8,2	7	7,2	7,4	7,4	7,2	7,6	8,6	7,1	8,4
Гематокрит, % / Hematocrit, %	45,5	42,9	46,1	43,9	38,1	36,8	37,2	38,1	38,2	37,8	39,6	37,6	43
Тромбоциты, $\times 10^8$ кл/л / Plates, $\times 10^8$ cells/l	869	884	902	875	761	731	683	598	819	919	900	923	1000
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	171	173	157	160	138	131	147	149	145	181	179	188	155
Креатинин, мкмоль/л Creatinine, $\mu\text{mol/l}$	69	72	78	82	117	110	122	111	106	72	75	74	86
С-реактивный белок, нг/мл / C-react. prot. ng/ml	409	429	419	429	481	488	471	481	412	410	432	410	427
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	2	3	2	3	5	5	4	6	2	2	2	3	3

излучения и индоцианинового зеленого происходит сокращение численности бактерий. В группах 1 и 2 концентрация микробных клеток на 20-й день эксперимента составляла 2,7–2,8 lgКОЕ/мл. Сокращение численности стафилококков в образцах, полученных от контрольной группы, вероятнее всего, связано с действием иммунной системы и общим физиологическим процессом заживления. При этом очевидны различия в обсемененности области ГА у крыс, подвергавшихся АФДТ. Так, с 15-го по 20-й день происходит полное уничтожение бактерий в группе 4, что говорит об успешном проведении лечения (табл. 3).

При анализе таких параметров, как лейкоцитарная формула, СОЭ и содержание в крови С-реактивного белка было показано, что используемый метод обеспечивал снижение уровня воспалительного процесса.

Показано, что на 5-й день эксперимента изменяется процентное соотношение клеток крови по сравнению с физиологической нормой. Существенно увеличивается число лейкоцитов, число тромбоцитов и эритроцитов, напротив,

снижается. Ежедневное облучение способствовало восстановлению средней концентрации креатинина, а также восстановлению нарушения функциональной активности тромбоцитов (табл. 4).

При формировании гнойного абсцесса на 5-й день лоцируется кистоподобная анаэробная округлая структура с тонкими стенками, ровными, четкими контурами, однородным жидкостным содержимым. В момент завершения эксперимента лоцируется кистоподобная анаэробная каплевидная структура с тонкими стенками, ровными, четкими контурами, однородным жидкостным содержимым, имеются признаки облитерирующейся анаэробной полости.

*Сравнительная оценка эффективности двух комбинаций «излучение + фотосенсибилизатор» для фотодинамической терапии гнойных абсцессов*

Показатель  $K_1$  находится в пределах 1 у здоровых и выздоравливающих животных. При сформированном гнойном абсцессе значения  $K_1$  возрастали в 2–3 раза (табл. 5). В ходе



Таблица 3 / Table 3

**Изменение численности *S. aureus* 209 P в области гнойного абсцесса под действием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианина зеленого**  
**Changes in the number of *S. aureus* 209 P in the area of a purulent abscess under the action of laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green**

Сутки / Day	lgКОЕ/мл / lgCFU/ml			
	1-я группа / 1 group	2-я группа / 2 group	3-я группа / 3 group	4-я группа / 4 group
1-й день (формирование абсцесса) / Day 1(abscess formation)	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35	7,0±0,35
5-й день (начало лечения) / Day 5 (beginning of treatment)	6,4±0,32	5,6±0,25*	5,6±0,26*	4,9±0,19*
10-й день (5-й день лечения) / Day 10 (5th day of treatment)	5,6±0,28*	5,4±0,24*	5,1±0,24*	2,9±0,11*
15-й день (10-й день лечения) / Day 15 (10th day of treatment)	3,3±0,17*	4,5±0,20*	3,9±0,18*	1,0±0,04*
20-й день (завершение лечения) / Day 20 (completion of treatment)	2,7±0,14*	2,8±0,13*	2,1±0,10*	0,3±0,02*

Примечание. \*Наличие достоверных различий по отношению к контролю (1-й день) при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Note. \*Presence of significant differences in relation to the control (1 day) at a significance level of  $p < 0,05$ .

Таблица 4 / Table 4

**Динамика некоторых показателей крови лабораторных крыс в ходе АФДТ с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения и индоцианинового зеленого**  
**Dynamics of some blood parameters in laboratory rats during APDT using laser infrared (808 nm) radiation and indocyanine green**

День исследования / Day of experiment	1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15				Норма / Normal
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Группа животных / Group of animals	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Лейкоциты $\times 10^9$ кл/л / Leukocytes $\times 10^9$ cells/l	10,1	10,5	10,3	9,9	26,1	28,8	29,3	25,6	21,5	13,6	9,3	8,5	12,5
Эритроциты $\times 10^{12}$ кл/л / RBC, $\times 10^{12}$ cells/l	8,9	8,6	8,2	8,4	7,1	7,3	6,9	7,2	7,8	8,2	8,1	8,5	8,4
Гематокрит, % / Hematocrit, %	8,9	42,3	45,5	43,3	37,6	36,3	36,7	37,6	37,7	38,5	39,6	42,3	43
Тромбоциты, $\times 10^8$ кл/л / Plates, $\times 10^8$ cells/l	999	984	1010	1001	932	905	874	789	949	920	1001	995	1000
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	157	152	155	161	123	112	117	128	139	150	168	173	155
Креатинин, мкмоль/л / Creatinine, $\mu\text{mol/l}$	83	80	76	81	109	97	113	118	95	97	89	86	86
С-реактивный белок, нг/мл / C-react. prot. ng/ml	366	384	375	384	461	459	482	475	369	376	387	343	427
СОЭ, мм/ч / ESR, mm/h	3	3	3	3	6	5	5	5	4	3	2	3	3

**Изменение коэффициентов эффективности АФДТ в зависимости от длительности эксперимента  
Change in the efficiency coefficients of APDT depending on the duration of the experiment**

День опыта / Day of action		1-й день / Day 1				5-й день / Day 5				15-й день / Day 15			
Группа животных / Group of animals		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
660 nm	$K_1$	0,79	0,82	0,77	0,82	2,82	3,12	3,32	3,49	1,52	0,84	0,86	0,72
	$K_2$	0,90	0,82	0,84	0,78	1,50	1,79	1,26	1,63	1,29	0,72	0,70	0,69
808 nm	$K_1$	0,80	0,84	0,81	0,79	2,25	2,57	2,68	2,60	1,83	1,18	0,72	0,68
	$K_2$	0,95	0,95	0,88	0,91	1,60	1,56	1,74	1,66	1,23	1,17	0,95	0,90

лечения происходило изменение концентрации основных биохимических показателей крови. Отмечено увеличение СОЭ в 2 раза, что свидетельствовало об активном протекании воспалительного процесса у больных животных. Показатель  $K_2$  у здоровых и выздоравливающих животных не превышал 1, при сформированном гнойном абсцессе его значение возрастало в 1,5 раза (см. табл. 5).

У животных в контрольных группах снижение коэффициентов происходило крайне медленно: к 15-му дню эксперимента значения превышали 1, нормализация биохимических показателей крови и значений коэффициентов отмечены лишь к 20-му дню.

Скорость сокращения объема  $v_r$  полости гнойного абсцесса для контрольных групп животных составляла 0,06–0,09 см<sup>3</sup>/сут, для групп 3 – не более 0,04 см<sup>3</sup>/сут, для групп 4, получавших АФДТ, 0,1–0,12 см<sup>3</sup>/сут.

Исходя из значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  и скорости редукции объемов полости гнойного абсцесса можно судить о том, что необходимый терапевтический эффект достигается к 10-м суткам (15-й день опыта) проведения АФДТ. Из табл. 3 видно, что динамика изменения значений коэффициентов схожа для двух используемых схем фотодинамического воздействия. В обоих случаях к 10-му дню обработки происходило снижение  $K_1$  до 0,68–0,86 и  $K_2$  до 0,69–0,90 для 4-й экспериментальной группы.

Однако, судя по значениям коэффициентов, метод антимикробной фотодинамической терапии с использованием лазерного инфракрасного (808 нм) излучения показывает лучший терапевтический эффект, регистрируемый как по убыли численности микроорганизмов в

области абсцесса, так и по УЗИ-исследованиям и по данным биохимического анализа крови экспериментальных животных.

**Заключение**

Существенным ограничением для эффективного использования АФДТ при лечении гнойно-воспалительных заболеваний мягких тканей является проникающая способность излучения [13–15]. Использование света красного и инфракрасного диапазонов открывает возможности для более качественной доставки световой энергии к целевым структурам, расположенным на значительной глубине, что особенно актуально при лечении глубоких абсцессов и гнойных образований.

Проведенные исследования с двумя комбинациями «излучение + фотосенсибилизатор» показали высокую эффективность обеих сочетаний. Применение маломощного светодиодного красного (660 нм) излучения в сочетании с метиленовым синим в ультранизкой концентрации (0,0001%) обеспечивало после 10 сеансов снижение микробной обсемененности полости моделированного абсцесса, способствовало редукции объема абсцесса на 60%, нормализации биохимических показателей крови.

У комбинации «инфракрасное излучение + индоцианиновый зеленый» при доказанной аналогичной эффективности есть пара существенных преимуществ. Инфракрасное излучение обладает большей проникающей способностью в биологические ткани, поскольку минимально поглощается водой и гемоглобином крови, а также известно иммуномодулирующими свойствами [12]. Индоцианиновый зеленый является хорошо зарекомендовавшим себя фотосенси-



билизатором при противоопухолевой фотодинамической терапии и часто используется в модификациях с наночастицами различной формы и состава [2, 5, 7, 13–15].

В ходе данного исследования определены оптимальные параметры проведения АФДТ: продолжительность сеанса не менее 15 мин, число сеансов – не менее 10. Рекомендовано использовать для растворения фотосенсибилизаторов не чистый физиологический раствор, а добавлять биологически активные вещества, повышающие фотодинамический эффект (интралипид – в случае метиленового синего и альбумин – в случае индоцианинового зеленого).

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует высокую терапевтическую эффективность фотодинамической терапии в лечении экспериментальных абсцессов и открывает новые перспективы в разработке малотравматичных методов лечения гнойных осложнений.

#### Список литературы

1. Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Тучина Е. С., Гаспарян Б. Т. Фотодинамическая терапия при хирургическом лечении моделированного местного ограниченного перитонита // Оренбургский медицинский вестник. 2025. Т. 13, № S2 (50). С. 232–233.
2. Мусаелян А. Г., Алипов В. В., Тучина Е. С., Рыжов А. С., Алипов А. И., Грицай У. О., Гаджиева Э. Э., Гаспарян Б. Т., Мельников А. М. Способ фотодинамического воздействия при хирургическом лечении местного ограниченного перитонита в эксперименте // Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). 2025. Т. 9, № 2-2. С. 77–86. <https://doi.org/10.17116/operhirurg2025902277>
3. Файзулина Р. Р., Соболев Ю. А., Нузова О. Б. Абсцессы брюшной полости: современное лечение // Здоровье и образование в XXI веке. 2019. № 7. С. 20–25. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2019-21-7-2Q-25>
4. Haidaris C. G., Foster T. H., Waldman D. L., Mathes E. J., McNamara J., Curran T. Effective photodynamic therapy against microbial populations in human deep tissue abscess aspirates // *Lasers Surg.* 2013. Vol. 45, № 8. P. 509–516. <https://doi.org/10.1002/lsm.22171>
5. Baran T. M., Sharma A. K. Photodynamic therapy of an abdominal abscess at the time of percutaneous drainage // *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2023. Vol. 46. P. 1292–1294. <https://doi.org/10.1007/s00270-023-03504-z>
6. Baran T. M., Hannan N., Christensen L., Longbine E., Foster T. H., Sharma A. K. Methylene blue photodynamic therapy of deep tissue abscesses: Phase 1 clinical trial and optical spectroscopy results // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy.* 2024. Vol. 46. EN 104150. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104150>
7. Alam S. Antimicrobial photodynamic therapy (APDT), an approach to fightback against antibiotic resistance: A short review // *Stamford Journal of Microbiology.* 2023. Vol. 13. P. 30–37. <https://doi.org/10.3329/sjm.v13i1.70412>
8. Sun Y., Ogawa R., Xiao B. H., Feng Y. X., Wu Y., Chen L. H., Gao X. H., Chen H. D. Antimicrobial photodynamic therapy in skin wound healing: A systematic review of animal studies // *Int. Wound J.* 2017. Vol. 17. P. 285–99. <https://doi.org/10.1111/iwj.13269>
9. Salehpour F., Cassano P., Rouhi N., Hamblin M. R., De Taboada L., Farajdokht F., Mahmoudi J. Penetration profiles of visible and near-infrared lasers and light-emitting diode light through the head tissues in animal and human species: A review of literature // *Photobiomodul. Photomed. Laser Surg.* 2019. Vol. 37. P. 581–595. <https://doi.org/10.1089/photob.2019.4676>
10. Ko Y.-S., Gi E.-J., Lee S., Cho H.-H. Dual red and near-infrared light-emitting diode irradiation ameliorates LPS-induced otitis media in a rat model // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2023. Vol. 11. EN 1099574. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1099574>
11. Пат. 2601378 C1 RU. Способ моделирования абсцесса мягких тканей / В. В. Алипов, А. И. Урусова, Д. А. Андреев, Н. Х. Кулиев. Заявл. 10.11.2016, № 2015120118/14 от 27.05.2015.
12. Пат. 2819366 C1 RU. Способ оценки эффективности фотодинамической терапии гнойных абсцессов / Е. С. Тучина, М. В. Каневский, В. В. Алипов, А. Г. Мусаелян, М. А. Полиданов, Е. С. Ефимова, У. О. Грицай, Э. К. Гаджиева, М. В. Корченова. Заявл. 08.06.2023, № 2023115100 от 17.05.2024.
13. Chan H., Pavelka M. S. Jr., Baran T. M. Methylene blue photodynamic therapy of bacterial species found in human abscesses: Planktonic, biofilm, and 3D silicone models // *Proc. SPIE.* 2023. Vol. 12358. P. 1235805–25. <https://doi.org/10.1117/12.2648350>
14. Kassab G., Cheburkanov V., Willis J., Moule M.G., Karachi C., Yakovlev V., Cirillo J. D., Bagnato S. V. Safety and delivery efficiency of a photodynamic treatment of the lungs using indocyanine green and extracorporeal near infrared illumination // *J. Biophotonics.* 2020. Vol. 13, № 10. EN 202000176. <https://doi.org/10.1002/jbio.202000176>
15. Tuchin V. V., Genina E. A., Tuchina E. S., Svetlakov A. V., Svenskaya Y. I. Optical clearing of tissues: Issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery // *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2022. Vol. 180. EN 114037. P. 1–122. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114037>

#### References

1. Musaelyan A. G., Alipov V. V., Tuchina E. S., Gasparyan B. T. Photodynamic therapy in surgical treat-



- ment of simulated local limited peritonitis. *Orenburg Medical Bulletin*, 2025, vol. 13, no. S2 (50), pp. 232–233 (in Russian).
2. Musaelyan A. G., Alipov V. V., Tuchina E. S., Rykhlov A. S., Alipov A. I., Gritsay U. O., Gadzhieva E. E., Gasparyan B. T., Mylnikov A. M. Method of photodynamic action in surgical treatment of local limited peritonitis in experiment. *Russian Journal of Operative Surgery and Clinical Anatomy*, 2025, vol. 9, no. 2-2, pp. 77–86 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/oper-hirurg2025902277>
  3. Fayzulina R. R., Sobolev Yu. A., Nuzova O. B. Abscesses of abdominal cavity: Contemporary treatment. *Health and Education in XXI century*, 2019, no. 7, pp. 20–25 (in Russian). <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2019-21-7-2Q-25>
  4. Haidaris C. G., Foster T. H., Waldman D. L., Mathes E. J., McNamara J., Curran T. Effective photodynamic therapy against microbial populations in human deep tissue abscess aspirates. *Lasers Surg.*, 2013, vol. 45, no. 8, pp. 509–516. <https://doi.org/10.1002/lsm.22171>.
  5. Baran T. M., Sharma A. K. Photodynamic therapy of an abdominal abscess at the time of percutaneous drainage. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*, 2023, vol. 46, pp. 1292–1294. <https://doi.org/10.1007/s00270-023-03504-z>
  6. Baran T. M., Hannan N., Christensen L., Longbine E., Foster T. H., Sharma A. K. Methylene blue photodynamic therapy of deep tissue abscesses: Phase 1 clinical trial and optical spectroscopy results. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2024, vol. 46, EN 104150. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104150>
  7. Alam S. Antimicrobial photodynamic therapy (APDT), an approach to fightback against antibiotic resistance: A short review. *Stamford Journal of Microbiology*, 2023, vol. 13, pp. 30–37. <https://doi.org/10.3329/sjm.v13i1.70412>
  8. Sun Y., Ogawa R., Xiao B. H., Feng Y. X., Wu Y., Chen L. H., Gao X. H., Chen H. D. Antimicrobial photodynamic therapy in skin wound healing: A systematic review of animal studies. *Int. Wound J.*, 2020, vol. 17, pp. 285–299. <https://doi.org/10.1111/iwj.13269>
  9. Salehpour F., Cassano P., Rouhi N., Hamblin M.R., De Taboada L., Farajdokht F., Mahmoudi J. Penetration profiles of visible and near-infrared lasers and light-emitting diode light through the head tissues in animal and human species: A Review of literature. *Photobiomodul. Photomed. Laser Surg.*, 2019, vol. 37, pp. 581–595. <https://doi.org/10.1089/photob.2019.4676>
  10. Ko Y.-S., Gi E.-J., Lee S., Cho H.-H. Dual red and near-infrared light-emitting diode irradiation ameliorates LPS-induced otitis media in a rat model. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2023, vol. 11, EN 1099574. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1099574>
  11. Pat. 2601378 C1 RU. *Sposob modelirovaniya abstsessa myagkikh tkaney* [Method for modeling a soft tissue abscess]. V. V. Alipov, A. I. Urusova, D. A. Andreev, N. Kh. Kuliev. Filed May 27, 2015, No. 2015120118/14 (in Russian).
  12. Pat. 2819366 C1 RU. *Sposob otsenki effektivnosti fotodinamicheskoy terapii gnoynnykh abstsessov* [Method for assessing the effectiveness of photodynamic therapy for purulent abscesses]. E. S. Tuchina, M. V. Kanevskiy, V. V. Alipov, A. G. Musaelyan, M. A. Polidanov, E. S. Efimova, U. O. Gritsay, E. K. Gadzhieva, M. V. Korchenova. Filed June 8, 2023, No. 2023115100 (in Russian).
  13. Chan H., Pavelka M. S. Jr., Baran T. M. Methylene blue photodynamic therapy of bacterial species found in human abscesses: Planktonic, biofilm, and 3D silicone models. *Proc. SPIE*, 2023, vol. 12358, pp. 1235805–25. <https://doi.org/10.1117/12.2648350>
  14. Kassab G., Cheburkanov V., Willis J., Moule M.G., Kurachi C., Yakovlev V., Cirillo J. D., Bagnato S. V. Safety and delivery efficiency of a photodynamic treatment of the lungs using indocyanine green and extracorporeal near infrared illumination. *J. Biophotonics*, 2020, vol. 13, no. 10, EN 202000176. <https://doi.org/10.1002/jbio.202000176>
  15. Tuchin V. V., Genina E. A., Tuchina E. S., Svetlakova A. V., Svenskaya Y. I. Optical clearing of tissues: Issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2022, vol. 180, EN 114037, pp. 1–122. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114037>

Поступила в редакцию 18.11.2025; одобрена после рецензирования 20.11.2025; принята к публикации 25.11.2025  
 The article was submitted 18.11.2025; approved after reviewing 20.11.2025; accepted for publication 25.11.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 76–86

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 76–86

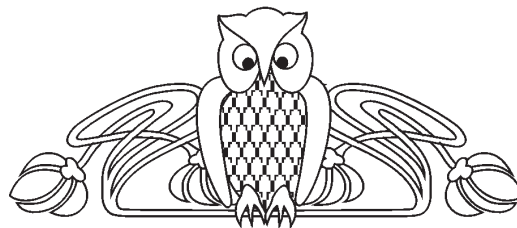
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-76-86>, EDN: NXBBVJ

Научная статья

УДК 664.64.014

## Функциональные свойства линии фиолетовозёрной пшеницы hei730/C68//Эритроспермум223 саратовской селекции



М. К. Садыгова<sup>1</sup>, Ж. А.-А. Конысбаева<sup>1</sup>, Г. М. Шакенова<sup>1</sup>, М. В. Каневский<sup>2</sup>,  
В. С. Гринёв<sup>2</sup>, С. Н. Сибикеев<sup>4</sup>, Л. В. Андреева<sup>4</sup>, З. Е. Фитилева<sup>4</sup>, А. А. Широков<sup>3</sup> ✉

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Россия, 410012, г. Саратов, просп. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>3</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Россия, 410049, г. Саратов, просп. Энтузиастов, д. 13

<sup>4</sup>ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока», Россия, 410010, г. Саратов, ул. Тулайкова, д. 7

Садыгова Мадина Карипулловна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продуктов питания», [sadigova.madina@yandex.ru](mailto:sadigova.madina@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9918-852X>

Конысбаева Жадыра Абдул-Ахметовна, магистрант Института биотехнологии, [sibikeev\\_sergey@mail.ru](mailto:sibikeev_sergey@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-8206-8356>

Шакенова Гульзат Маратовна, магистрант Института биотехнологии, [gulzik\\_88@mail.ru](mailto:gulzik_88@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-2167-0374>

Каневский Матвей Владимирович, кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биофизики, [matvejkanev@mail.ru](mailto:matvejkanev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5932-6748>

Гринёв Вячеслав Сергеевич, доктор химических наук, доцент кафедры органической и биоорганической химии, [grinev@ibppm.ru](mailto:grinev@ibppm.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0627-6804>

Сибикеев Сергей Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории генетики и цитологии, [sibikeev\\_sergey@mail.ru](mailto:sibikeev_sergey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8324-976X>

Андреева Любовь Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории качества зерна, [l.v.andreeva\\_75@mail.ru](mailto:l.v.andreeva_75@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3631-1084>

Фитилева Зульфия Ернazarовна, младший научный сотрудник лаборатории генетики и цитологии, [sibikeev\\_sergey@mail.ru](mailto:sibikeev_sergey@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6751-3789>

Широков Александр Александрович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории иммунохимии, [shirokov\\_a@ibppm.ru](mailto:shirokov_a@ibppm.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4321-735X>

**Аннотация.** В условиях влияния негативных экологических и социальных факторов актуальной задачей становится продление активной жизни человека и сдерживание возрастных изменений. Одним из путей решения этих проблем является употребление в пищу продуктов, богатых антиоксидантами, такими как витамин Е, полифенолы, танины, антоцианы, каротиноиды. Селекционеры работают над расширением ресурсного потенциала сырья с функциональными свойствами. Одним из таких мировых трендов является выведение сортов пшеницы с фиолетовым зерном, которые богаты антиоксидантами. Обоснована перспективность линии фиолетовозерной пшеницы саратовской селекции для производства функциональных продуктов на основе оценки химического состава муки. Объект исследования – линия фиолетовозёрной пшеницы hei730/C68//Эритроспермум223 селекции лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока. Установлено, что содержание железа в фиолетовозёрной пшенице саратовской селекции больше на 21,9% по сравнению с краснозёрной пшеницей, при этом количество цинка меньше на 60%. По содержанию витаминов В1, В2, В6, В9 мука исследуемого сорта пшеницы не отличается от краснозёрной пшеницы, в то время как количество витамина Е почти в 4 раза меньше. Содержание фенольных соединений в спиртовом экстракте муки составило 84,6±5,2 мг/100 г муки. Методом ВЭЖХ установлено, что в составе экстракта муки из зерновок присутствуют две группы фенольных компонентов – гидрофильные и гидрофобные, последние преобладали в экстракте. Анализ антиоксидантной активности показал, что  $IC_{50}$  для спектра соединений, содержащихся в экстракте муки фиолетовозерной пшеницы hei730/C68//Эритроспермум223, составляет 19,7±0,9 мг/мл. Таким образом, новая линия фиолетовозёрной пшеницы саратовской селекции расширяет ассортимент сырья с функциональными свойствами.

**Ключевые слова:** фиолетовозёрная пшеница, антиоксиданты, фенольные соединения, антоцианы, функциональный ингредиент, биофортификация, антиоксидантная активность



**Для цитирования:** Садыгова М. К., Коньсбаева Ж. А.-А., Шакенова Г. М., Каневский М. В., Гринёв В. С., Сибикеев С. Н., Андреева Л. В., Фитилева З. Е., Широков А. А. Функциональные свойства линии фиолетовозёрной пшеницы hei730/C68//Эритроспермум223 саратовской селекции // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 76–86. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-76-86>, EDN: NXBBYJ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Functional traits of the Saratov-bred purple-grain wheat line hei730/c68//Erythrosperrum 223

M. K. Sadigova<sup>1</sup>, Zh. A.-A. Konysbaeva<sup>1</sup>, G. M. Shakenova<sup>1</sup>, M. V. Kanevsky<sup>2</sup>,  
V. S. Grinev<sup>2</sup>, S. N. Sibikeev<sup>4</sup>, L. V. Andreeva<sup>4</sup>, Z. E. Fitileva<sup>4</sup>, A. A. Shirokov<sup>3</sup>✉

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, 3 bild, 4 Petr Stolypin Ave., Saratov 410012, Russia

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>3</sup>Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia

<sup>4</sup>Federal Agricultural Research Center of the Southeast, 7 Tulaykova St., Saratov 410010, Russia

Madina K. Sadigova, sadigova.madina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9918-852X>

Zhadyra A. Konysbaeva, sibikeev\_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8206-8356>

Gulzat M. Shakenova, gulzik\_88\_88@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2167-0374>

Matvey V. Kanevsky, matvejkaney@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5932-6748>

Vyacheslav S. Grinev, grinev@ibppm.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0627-6804>

Sergey N. Sibikeev, sibikeev\_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8324-976X>

Lyubov V. Andreeva, l.v.andreeva\_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3631-1084>

Zulfiya E. Fitileva, sibikeev\_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6751-3789>

Alexander A. Shirokov, shirokov\_a@ibppm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4321-735X>

**Abstract.** In the context of the influence of negative environmental and social factors, prolonging human active life and curbing age-related changes have become an urgent task. One way to solve these problems is to eat foods rich in antioxidants, such as vitamin E, polyphenols, tannins, anthocyanins, carotenoids. Breeders work on expanding the resource potential of products with functional properties. One global trend is the development of wheat varieties rich in purple grain antioxidants. The article substantiates the prospects of the Saratov-bred purple-grained wheat line for production of functional products based on an assessment of the chemical composition of flour. The object of the study is the line of purple-grained wheat hei730/C68// Erythrosperrum223 selected by the laboratory of genetics and cytology of the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region. The iron content in purple wheat bred in Saratov is significantly higher by 21,9% compared to red wheat, while zinc is significantly lower by 60%. In terms of vitamin B1, B2, B6, B9 content, the flour of the studied wheat variety does not differ from red wheat, while the amount of vitamin E is 2 times less. The content of phenolic compounds in the alcoholic extract of flour was 84,6±5,2 mg/100 g of flour. The HPLC method established that the flour extract from grains contains two groups of phenolic components – hydrophilic and hydrophobic, the latter prevailing in the extract. Analysis of antioxidant activity by the DPPH method showed that the IC<sub>50</sub> for the compounds contained in the flour extract of purple wheat is 19,7±0,9 mg/ml. Thus, the new line of purple-grained wheat of Saratov selection expands the range of products with functional properties.

**Keywords:** purple wheat, antioxidants, phenolic compounds, anthocyanins, functional ingredient, biofortification, antioxidant activity

**For citation:** Sadigova M. K., Konysbaeva Zh. A.-A., Shakenova G. M., Kanevsky M. V., Grinev V. S., Sibikeev S. N., Andreeva L. V., Fitileva Z. E., Shirokov A. A. Functional traits of the Saratov-bred purple-grain wheat line hei730/c68//Erythrosperrum 223. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 76–86 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-76-86>, EDN: NXBBYJ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Улучшение качества жизни населения и его поддержание – основа национальной идеи здоровья и здорового образа жизни [1]. Основное сырье в технологии мучных изделий – пшеничная мука. В настоящее время мировым трендом в селекции злаков является создание сортов с

окрашенным зерном, с повышенным содержанием антоцианов и других биологически активных компонентов [2–4].

Получены сорта с окрашенным зерном (красным, фиолетовым, голубым, чёрным) риса, сорго, кукурузы, пшеницы. Несмотря на широкое использование злаков с окрашенным зерном для производства продуктов функцио-



нального питания в странах Юго-Восточной Азии, в Европе и Северной Америке, в России это направление находится в начальной стадии развития. Стоит отметить, что успешная работа с фиолетовозёрными сортообразцами яровой пшеницы проводится в Омском ГАУ, Институте цитологии и генетики СО РАН, Татарском НИИСХ, ФИЦ КазНЦ РАН, ФНЦ зернобобовых и крупяных культур, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, в Отделе отдаленной гибридизации ГБС РАН [5].

Фиолетовый оттенок зерна у пшеницы обусловлен присутствием цианидин-3-глюкозида. Это вещество является основным антоцианом в пшенице, главным образом сосредоточенным в перикарпии зерновки [6].

Согласно исследованию ученых РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева и ФНЦ зернобобовых и крупяных культур, сорта яровой пшеницы с фиолетовыми зернами способны в условиях Нечернозёмной зоны формировать зерно, подходящее для хлебопечения. Однако отмечается, что качество зерна зависит от метеорологических условий вегетационного периода [7].

В НИИСХ – ОСП ФИЦ «Казанский НЦ РАН» ученые разработали новый сорт яровой мягкой пшеницы Надира. Этот сорт, отличающийся фиолетовым оттенком зерна, стал первым в Средневолжском регионе, обладающим повышенной антиоксидантной активностью спиртовых экстрактов зерна. Кроме того, сорт Надира демонстрирует высокий потенциал урожайности, достигающий 5,5 тонн с гектара. Для сорта Надира такие показатели, как среднее содержание белка в зерне, уровень сырой клейковины, разжижение теста, а также валориметрическая и общая хлебопекарная оценки отвечают стандартам, предъявляемым к высококачественным сортам [6].

В Омском аграрном университете выведены сорта пшеницы с фиолетовым цветом зерновок, предназначенные для применения в органическом земледелии. Эксперименты на мышах выявили, что включение зерновок фиолетовой пшеницы в рацион животных способствовало повышению когнитивных функций. Кроме того, были зафиксированы признаки восстановления нейронов, что подтвердилось анализом биохимических процессов в головном мозге [8]. В исследованиях многих ученых сообщается о пользе антоцианов для здоровья, включая противовоспалительное, противоопухолевое, противодиабетическое,

антивозрастное, нейропротекторное действие. Также их используют для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний [3, 8–10].

В зерне пшеницы имеются и такие минорные компоненты, как фенольные соединения (ФС), содержание которых обычно не превышает 0,5%, при этом употребление пищи, содержащей ФС, такой как цельное зерно злаков, способствует профилактике сердечно-сосудистых, метаболических и онкологических заболеваний [11]. Как известно, окраска зерна зависит от присутствия в оболочках плодов проантоцианидинов и антоцианов (АЦ), в случае фиолетовозёрных сортов окраску зерну придают АЦ, локализованные в перикарпии [2]. АЦ обладают высокой антиоксидантной активностью (АОА), поэтому фиолетовозёрные сорта пшеницы используются как дешевый источник антиоксидантов для производства функциональных продуктов питания из цельного зерна [12].

*Цель данной работы:* обоснование перспективности линии фиолетовозёрной пшеницы селекции ФАНЦ Юго-Востока для производства функциональных продуктов на основе оценки его химического состава.

## Материалы и методы

Объект исследования – линия фиолетовозёрной пшеницы hei730/C68// Эритроспермум223 селекции лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока, урожая 2023 г.

Исследования химического состава сырья были проведены в Центре коллективного пользования научным оборудованием в области физико-химической биологии и нанобиотехнологии «Симбиоз» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов Российской академии наук (ИБФРМ РАН, г. Саратов).

Определение содержания железа, магния, цинка и калия проводили по ГОСТ 32343-2013 (ISO 6869:2000) [13].

Для выделения водорастворимых витаминов (В1, В2, В6, В9) 250 мг ( $\pm 0,1$  мг) образца помещали в коническую стеклянную колбу с притёртой крышкой на 50 мл. К образцам добавляли 5 мл 0,01 н HCl и выдерживали при 35–37°C в течение 30 мин с периодическим перемешиванием. Образцы центрифугировали 5 мин при 10000 об/мин. Отбирали 1 мл супернатанта и проводили дальнейший анализ методом ВЭЖХ [14].



Для выделения жирорастворимого витамина Е использовали методику, предложенную в ГОСТ 32043-2012. Для этого 250 мг ( $\pm 0,1$  мг) образца помещали в коническую стеклянную колбу с притёртой крышкой на 50 мл. К образцам добавляли 5 мл смеси вода:изопропиловый спирт в соотношении 3:97 и выдерживали при 70°C в течение 30 мин с периодическим перемешиванием. Образцы центрифугировали 5 мин при 10000 об/мин. Отбирали 1 мл супернатанта и проводили дальнейший анализ методом ВЭЖХ [15].

Анализ проводили методом обращеннофазовой ВЭЖХ на хроматографе Dionex Ultimate 3000 («Thermo Scientific», США) с использованием колонки Luna 5u C18(2) 100A, 5 мкм 4,6 мм  $\times$  150 мм («Phenomenex», США), серийный номер 125617-12. Время анализа 15 мин. Экстракты хроматографировали в условиях изократического элюирования (растворитель А – метанол, квалификации (Ultra) gradient HPLC grade («J.T.Baker», Голландия), растворитель В – ацетонитрил квалификации HPLC grade («Panreac», Испания) в соотношении 80:20. Скорость протока 1 мл/мин. Объем вводимого образца 20 мкл. Управление хроматографом и анализ данных выполнялся программой Chromeleon версии 7.1.2.1478 («Thermo Scientific», «Dionex», США). Детектирование осуществлялось при следующих длинах волн: В1, В9 – 250 нм, В6 – 400 нм, В2 – 495 нм, Е – 265 нм. Количественный расчет содержания витаминов проводили по соотношению площадей пиков стандарта и образца.

Для определения содержания общих фенольных соединений в сырье использовали метод Фолина–Чиокальтеу [16]. Первоначально муку обрабатывали 70% этиловым спиртом и подвергали ультразвуковому воздействию в течение 15 мин для экстракции фенолов. Для отделения нерастворимых частиц смесь подвергали центрифугированию в течение 10 мин при  $10.000 \times g$ . Выделенные фенольные соединения смешивали с равным объемом реактива Фолина–Чиокальтеу, предварительно разведённым в 10 раз и выдерживали в течение 10 мин. После добавления трехкратного объема 20% раствора кальцинированной соды смесь выдерживали 2 ч при комнатной температуре и измеряли оптическую плотность проб при длине волны 765 нм. В качестве стандартного образца для построения калибровочной кривой применяли галловую кислоту.

Качественный анализ экстрактов проводили методом обращеннофазовой ВЭЖХ на хроматографе Dionex Ultimate 3000 («Thermo Scientific», США) с использованием колонки Nucleodur НТес С18 («Macherey-Nagel», Германия), средний диаметр частиц 5 мкм с порами 100 Å, геометрия 150  $\times$  3,0 мм. Время анализа 25 мин.

Экстракты хроматографировали в условиях градиентного элюирования (растворитель А – ацетонитрил квалификации HPLC grade («Panreac», Испания), растворитель В – 0,1% раствор фосфорной кислоты (рН 2,5)): состав подвижной фазы изменялся следующим образом: 0–10 мин – 15% А, 85% В; 10–19 мин – 15  $\rightarrow$  70% А, 85  $\rightarrow$  30% В; 19–20 мин – 70% А, 30% В; 20–22 мин – 70  $\rightarrow$  15% А, 30  $\rightarrow$  85% В; 22–25 мин – 15% А, 85% В. Скорость потока элюента 1 мл/мин. Объем вводимого образца 5 мкл. Детектирование осуществлялось при длинах волн 226, 250, 320, 342, 360 нм, интегрирование – на длине волны 250 нм. Дополнительно для выявления компонентов антоциановой природы хроматограмму интегрировали при 510 и 657 нм. Управление хроматографом и анализ данных выполнялся программой Chromeleon версии 7.1.2.1478 («Thermo Scientific», «Dionex», США) [17].

Антиоксидантная активность тестируемого продукта определялась в соответствии с методом на основе DPPH (diphenyl picrylhydrazil radical) [18] в небольшой модификации. Для анализа использовали 96-луночные плоскодонные полистирольные планшеты. Экстракты для анализа методом DPPH были подготовлены аналогично тому, как была проведена подготовка образцов для анализа методом ВЭЖХ. К 100  $\mu$ L исследуемых образцов добавляли по 100  $\mu$ L раствора DPPH в метаноле ( $C = 2 \times 10^{-4}$  моль/л). Смесь перемешивали, выдерживали в темноте в течение 30 мин при комнатной температуре. Далее измеряли оптическую плотность при 517 нм. Тесты проводили в трех биологических повторностях. Антиоксидантная активность рассчитывалась по формуле:

$$AOA = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%,$$

где  $A_0$  – оптическая плотность DPPH раствора (контроль);  $A_1$  – оптическая плотность исследуемого раствора с DPPH раствором [18].

Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием пакета MS Office Excel.



## Результаты и их обсуждение

В научно-технической литературе мало информации по содержанию отдельных химических веществ в фиолетовозёрной пшенице, поэтому ниже приведено сравнение получен-

ных результатов со справочными данными по краснозёрной пшенице [3, 19] (табл. 1).

Как видно, из данных табл. 1 содержание железа в фиолетовозёрной пшенице больше на 21,9% по сравнению с краснозёрной пшеницей, при этом количество цинка меньше на 60%.

Таблица 1 / Table 1

**Содержание минеральных веществ и витаминов в зерне пшеницы**  
**Content of minerals and vitamins in wheat grain**

Показатель / Figure	Значения, характеристики, мг/100 г муки / Values, characteristics, mg/100 g flour	
	Фиолетовозёрная пшеница селекции ФАНЦ Ю-В / Purple-grain wheat bred in Federal Agricultural Research Center of the Southeast	Краснозёрная пшеница [19–21] / Red wheat [19–21]
Суммарное содержание железа / Total iron content	5,0± 0,1*	4,1±0,1
Суммарное содержание магния / Total magnesium content	131,1±10,0	166,0±0,4
Суммарное содержание цинка / Total zinc content	2,0±0,1*	3,3±0,1
Суммарное содержание калия / Total potassium content	338,0±27,0	407,0±2,3
В <sub>1</sub> (тиамин) (thiamine)	0,32±0,06	0,19
В <sub>2</sub> (рибофлавин) (riboflavin)	0,11±0,02	0,06
В <sub>6</sub> (пиридоксин) (pyridoxine)	0,17±0,03	0,09
В <sub>9</sub> (фолиевая кислота) (folic acid)	0,04±0,01	0,04
Е (ацетат α-токоферола) (α-tocopherol acetate)	0,5±0,05*	1,9±0,3

Примечание. \*Различия между экспериментальными и литературными данными достоверны для  $p \leq 0,05$ .  
Note. \*Differences between experimental and literary data are significant for  $p \leq 0,05$ .

P. Shi с соавторами изучали влияние поглощения железа растением на концентрацию антоцианов в ягодах винограда. Они установили, что содержание антоцианов и интенсивность транскрипции генов, участвующих в биосинтезе антоцианов, находились в прямой корреляции с количеством поступающего железа [22].

Биофортификация пшеницы была начата в середине 2000-х гг. международным консорциумом Harvest Plus, который поставил задачу создать сорта с содержанием цинка в зерне в пределах 50 мг на килограмм. Селекционерами ОмГАУ такая задача решена – в зерне сорта яровой мягкой фиолетовозерной пшеницы Элемент 22 содержание цинка более 50 мг на

кг [23]. Ученые Омского АУ утверждают, что одной из важных функций антоцианов является их участие в качестве посредников в процессах поглощения цинка клетками организма. С дефицитом цинка в рационе человека связывают различные патологии: нарушение функций иммунной, нервной и репродуктивной систем, а также ухудшение зрения. При отсутствии в потребляемой пище антоцианов цинк усваивается организмом на 25%, а при включении в рацион пищи, богатой антоцианами, его усвоение возрастает более чем в 2 раза [24].

Согласно нормам физиологических потребностей в пищевых веществах, указанных в методических рекомендациях [25], суточная



потребность организма человека в цинке составляет 12 мг (100%). Содержание цинка в фиолетовозёрной пшенице саратовской селекции составляет 2,0 мг/100 г, следовательно, степень удовлетворения суточной потребности – 16,6%. В соответствии с ГОСТ Р 55577-2013 [26] содержание каждого пищевого или биологически активного вещества в 100 г, или разовой порции пищевого продукта, должно составлять не менее 15% от уровня рекомендуемого суточного

потребления. Таким образом, по содержанию цинка исследуемое в ходе работы сырье можно отнести к функциональным.

Содержание фенольных соединений в пересчете на галловую кислоту составило  $84,6 \pm 5,2$  мг/100 г муки.

Для оценки качественного состава фенольных соединений экстракта его подвергли ВЭЖХ-анализу, который выявил 11 компонентов в составе смеси (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Результаты ВЭЖХ-анализа экстрактов сырья**  
**Results of HPLC analysis of raw material extracts**

Компонент / Component	Время удерживания, мин / Retention time, min	Относительная площадь пика, mAU/min / Relative peak area, mAU/min	Максимумы поглощения (в диапазоне 200–700 нм), нм / Absorption maxima (in the range of 200–700 nm), nm
1	2,685	0,14	234, 242, 268
2	3,247	6,71	258, 372, 388
3	3,958	7,07	268
4	4,388	9,83	217, 280, 368, 454, 530
5	4,827	5,65	213, 268, 301, 522, 610
6	20,16	9,92	279, 323, 369
7	20,657	20,27	277, 324
8	20,963	14,59	278
9	21,332	11,42	279, 323
10	21,778	4,39	281, 325
11	22,757	10,01	286, 322, 326

Экстракция этанолом обеспечивает эффективное выделение фенольных соединений различной полярности, причём ключевую роль играет концентрация спирта в экстрагенте. Согласно литературным данным [27], водно-спиртовые смеси с содержанием этанола 50–60% предпочтительны для извлечения гидрофильных соединений, тогда как повышение концентрации спирта способствует более полной экстракции гидрофобных компонентов.

В рамках текущего исследования в качестве экстрагента была выбрана смесь, содержащая 70% этилового спирта и 1% хлористоводородной кислоты. Такой состав позволяет извлекать как полярные, так и неполярные соединения; при этом подкисление соляной кислотой способствует облегчению экстракции антоцианов [28].

В ходе анализа было обнаружено, что в составе экстракта присутствуют две группы компонентов – гидрофильные, удерживаемые при 2,5–5,0 мин, и гидрофобные в диапазоне времени удерживания 19,0–24,0 мин (см. табл. 2). Основываясь на показателях площадей пиков, следует отметить преобладание в экстракте гидрофобных компонентов. Полученные результаты хорошо соотносятся с данными литературы о том, что высокая концентрация спирта в экстрагирующей смеси обеспечивает более полную экстракцию малополярных соединений [27]. Компонент 4 с временем удерживания 4,388 мин проявляет слабоинтенсивное поглощение с максимумами 454 и 530 нм, а компонент 5 с временем удерживания 4,827 мин поглощает в длинноволновой области с максимумами 522 и 610 нм (см. табл. 2). Погло-



щение в этом диапазоне длин волн характерно для окрашенных соединений. В частности, поглощение в диапазоне 530–545 нм типично для такого представителя группы антоцианов, как цианидин-3-О-глюкозид, который является стандартом для спектрофотометрического определения антоцианов в экстракте [29]. Это позволяет предположить, что вещества (компонент 4 и компонент 5) относятся к группе антоцианов [30]. А, исходя из времени их удерживания, при используемых условиях элюирования, можно также заключить, что компонент 4 является гликозидной, а компонент 5 – агликоновой формой антоцианов.

Улавливание свободных радикалов является одним из механизмов действия антиоксидантов, ингибирующего окисление липидов. Модель удаления стабильных свободных радикалов 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH) может быть использована для экспресс-оценки антиоксидантной активности. Антирадикальную активность экстрактов рассчитывали, оценивая связывание DPPH с антиоксидантами, содержащимися в экстрактах. В качестве положительного контроля использовались аскорбиновая кислота, а также хорошо изученные флавоноиды – нарингенин, рутин и кверцетин в концентрациях 0,006–60,0 мг/мл. Для исследуемых образцов был рассчитан параметр полуэффективной концентрации ( $IC_{50}$ ). Значения  $IC_{50}$  были определены с использованием линейной интерполяции между точками, наиболее приближенными к 50% антиоксидантной активности. Для экстрактов пшеницы  $IC_{50}$  составил  $19,7 \pm 0,9$  мг/мл, а для аскорбиновой кислоты, рутина, кверцетина и нарингенина –  $0,051 \pm 0,003$ ;  $21,23 \pm 6,37$ ;  $2,40 \pm 0,46$  и  $50,71 \pm 5,74$  мг/мл соответственно. Исходя из полученных результатов, можно построить следующий ряд активности образцов (по убыванию антиоксидантной активности: аскорбиновая кислота >> кверцетин >> экстракт фенольных соединений из муки пшеничной (hei730/C68//Эритроспермум223) >> рутин >> нарингенин).

Анализ состава ФС фиолетовозёрных сортов выявил присутствие антоцианов, демонстрирующих более высокую АОА по сравнению с остальными фенольными соединениями [31]. Это объясняет наблюдаемое превышение АОА этанольных экстрактов фиолетовозёрной пшеницы над уровнем АОА флавоноида нарингенина.

Результаты исследований ученых из Казанского института биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН продемонстрировали, что засушливые условия приводили к снижению содержания ФС в зерне линии 163, но увеличение в линии 193, что коррелировало со снижением или увеличением АОА. Изученные фиолетовозёрные линии имели разную устойчивость к засухе: линия 193 имеет большую устойчивость к засухе и высоким температурам по сравнению с линией 163 [31]. Аналогичное влияние засухи на содержание ФС в зерне пшеницы было обнаружено и другими исследователями [31–33]. Зона Поволжья – это зона засушливого земледелия. Следовательно, повышение засухоустойчивости выводимых сортов фиолетовозёрной пшеницы с более высоким содержанием ФС и АОА – важная задача селекционеров.

### Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод: новая линия фиолетовозёрной пшеницы саратовской селекции расширит ассортимент сырья с функциональными свойствами: степень удовлетворения суточной потребности по цинку в фиолетовозёрной пшенице саратовской селекции составляет 16,6%; метод экспресс-оценки АОА выявил высокий процент связывания DPPH с антиоксидантами, содержащимися в экстрактах; в засушливых условиях Саратовской области содержание общих фенольных соединений составило  $84,6 \pm 5,2$  мг/100 г муки, что ниже на 25–50% в сравнении с данными ученых Казанского ФИЦ, следовательно, необходимо повышение засухоустойчивости фиолетовозёрных пшениц; оценка качественного состава фенольных соединений экстракта выявила преобладание в экстракте гидрофобных компонентов.

### Список литературы

1. Функциональное питание – общая проблема «здорового образа жизни» населения государств Евразии: научные статьи X Евразийского научного форума : сборник / общ. науч. ред. М. Ю. Спирина, Г. В. Алексеев. СПб. : Университет при МПА ЕврАзЭС, 2019. 189 с.
2. Lachman J., Martinek P., Kotíková Z., Orsák M., Šulc M. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain – A review // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 74. P. 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.007>



3. Полонский В. И., Лоскутов И. Г., Сумина А. В. Селекция на содержание антиоксидантов в зерне как перспективное направление для получения продуктов здорового питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22, № 3. С. 343–352. <https://doi.org/10.18699/VJ18.370>
4. Юдина Р. С., Гордеева Е. И., Шоева О. Ю., Тихонова М. А., Хлесткина Е. К. Антоцианы как компоненты функционального питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25, № 2. С. 178–189. <https://doi.org/10.18699/VJ21.022>
5. Рубец В. С., Ворончихина И. Н., Игонин В. Н., Сидоренко В. С., Ворончихин В. В. Характеристика фиолетовозерных сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального района Нечернозёмной зоны России // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. Т. 65, № 5 (389). С. 525–529. [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_65\\_5\\_525](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_5_525)
6. Василова Н. З., Асхадуллин Д. Ф., Асхадуллин Дан. Ф., Багавиева Э. З., Тазутдинова М. Р., Хусаинова И. И. Фиолетовозерный сорт яровой мягкой пшеницы Надира // Зернобобовые и крупяные культуры. 2021. Т. 4, № 40. С. 66–75. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-4-66-75>
7. Ворончихина И. Н., Сидоренко В. С., Рубец В. С., Пыльнев В. В., Игонин В. Н., Ворончихин В. В., Груздев И. В. Оценка качества зерна сортов яровой пшеницы с фиолетовой окраской зерна в условиях ЦРНЗ // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2022. Т. 6. С. 54–66. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-54-66>
8. Фотев Ю. В., Пивоваров В. Ф., Артемьева А. М., Куликов И. М., Гончарова Ю. К., Сысо А. И., Гончаров Н. П. Концепция создания Российской национальной системы функциональных продуктов питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22, № 7. С. 776–783.
9. Cerletti C., De Curtis A., Bracone F., Digesù C., Morganti A. G., Iacoviello L., de Gaetano G., Donati M. B. Dietary anthocyanins and health: Data from Flora and Athena EU projects // Br. J. Clin. Pharmacol. 2016. Vol. 83, № 1. P. 103–106. <https://doi.org/10.1111/bcp.12943>
10. Пшеница стекловидная. Краснозерная озимая. Химический состав, пищевая ценность. URL: [https://health-diet.ru/base\\_of\\_food/sostav/19971.php](https://health-diet.ru/base_of_food/sostav/19971.php) (дата обращения: 12.04.2024).
11. Fardet A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: What is beyond fibre? // Nutr. Res. Rev. 2010. Vol. 23, № 1. P. 65–134. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000041>
12. Румянцева Н. И., Валиева А. И., Акулов А. Н., Асхадуллин Дан. Ф., Асхадуллин Дам. Ф., Василова Н. З. Влияние засухи и высоких температур на урожайность и качество зерна фиолетовозерных линий яровой мягкой пшеницы // Biomcs. 2021. Т. 13, № 3. С. 254–273. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2021-17>
13. ГОСТ 32343-2013 Корма, комбикорма. Определение содержания кальция, меди, железа, магния, марганца, калия, натрия и цинка методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ISO 6869:2000) МКС 65.120 (дата введения 2015-07-01). М. : Стандартинформ, 2020. 15 с.
14. Руденко А. О., Карцова Л. А. Определение водорастворимых витаминов группы В и витамина С в комбикормах, премиксах и биологически активных добавках методом обращенно-фазовой ВЭЖХ // Журнал аналитической химии. 2010. Т. 65, № 1. С. 73–78.
15. ГОСТ 32043-2012 Премиксы. Методы определения витаминов А, D, Е (дата введения 01.07.2014). М. : Стандартинформ, 2020. 14 с.
16. Kupina S., Fields C., Roman M. C., Brunelle S. L. Determination of total phenolic content using the Folin-C assay: Single-laboratory validation, first action // J. AOAC Int. 2018. Vol. 101. P. 1466–1472.
17. Каневский М. В., Гринев В. С., Полуконова Н. В., Наволокин Н. А., Беяченко Ю. А., Бучарская А. Б., Дурнова Н. А., Маслякова Г. Н., Широков А. А. Сравнительный анализ содержания фенольных соединений в составе экстрактов антоциановой кукурузы сорта «Пурпурная Саратовская», выращенной при различных условиях увлажнения, методами спектроскопии и ВЭЖХ // Химико-фармацевтический журнал. 2020. Т. 54, № 3. С. 32–36. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2020-54-3-32-36>
18. Jiang H. C., Chi-Tang H. J. Antioxidant activities of caffeic acid and its related hydroxycinnamic acid compounds // Agric. Food Chem. 1997. Vol. 45. P. 2374–2378.
19. El Houssni I., Zahidi A., Khedid K., Hassikou R. Nutrient and anti-nutrient composition of durum, soft and red wheat landraces: Implications for nutrition and mineral bioavailability // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 15. Art. 101078. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101078>
20. Granda L., Rosero A., Benešová K., Pluháčková H., Neuwirthová J., Cerkal R. Content of selected vitamins and antioxidants in colored and nonpigmented varieties of quinoa, barley, and wheat grains // Journal of Food Science. 2018 Vol. 83, № 10. P. 2439–2447. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14334>
21. Tian P., Liu Y., Cheng Y., Yang B., Wang Y., Wu B. Exploration of folate and its derivatives in grains of wheat with different colors // Frontiers in Genetics. 2025. Vol. 16. Art. 1549122. <https://doi.org/10.3389/fgene.2025.1549122>
22. Shi P., Li B., Chen H., Song C., Meng J., Xi Z., Zhang Z. Iron supply affects anthocyanin content and related gene expression in berries of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon // Molecules. 2017. Vol. 22, № 2. Art. 283. <https://doi.org/10.3390/molecules22020283>



23. Михайлова О. П. Омская пшеница как продукт функциональной направленности // Молодой ученый. 2023. Т. 5, № 452. С. 223–225.
24. Корулькин Д. Ю., Абилов Ж. А., Музычкина Р. А., Толстиков Г. А. Природные флавоноиды. Новосибирск : ГЕО, 2007. 229 с.
25. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: Методические рекомендации. М. : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 72 с.
26. ГОСТ Р 55577-2013 Продукты пищевые специализированные и функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности (дата введения 06.09.2013). М. : Стандартинформ, 2014. 15 с.
27. Адамцевич Н. Ю., Болтовский В. С., Туток В. В. Влияние параметров экстракции на выход флавоноидов из листьев воробейника лекарственного (*Lithospermum officinale* L.) // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 2020. Т. 65, №. 4. С. 402–411. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-4-402-411>
28. Капитова И. А., Павлов К. В. Методы извлечения антоцианов из растительного сырья и способы очистки (обзор) // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 2. С. 245–253. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-02-245-253>
29. Куркин В. А., Рязанова Т. К. Определение антоцианов в плодах черники обыкновенной // Фармация. 2012. № 2. С. 10–13.
30. Liu H. L., Jiang W. B., Xie M. X. Flavonoids: Recent advances as anticancer drugs // Recent Pat. Anticancer Drug. Discov. 2010. Vol. 5, № 2. P. 152–164. <https://doi.org/10.2174/157489210790936261>
31. Акулов А. Н., Валиева А. И., Василова Н. З., Асхадуллин Д. Ф., Асхадуллин Дам. Ф., Румянцева Н. И. Влияние погодных условий на содержание и состав фенольных соединений в зерне фиолетовозерных линий яровой мягкой пшеницы // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды : сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Иркутск, 10–15 июля 2018) : в 2 ч. Ч. 1. Иркутск : СИФИБР СО РАН, 2018. С. 55–60. <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-55-60>
32. Heimler D., Vignolini P., Isolani L., Arfaioli P., Ghiselli L., Romani A. Polyphenol content of modern and old varieties of *Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf. grains in two years of production // J. Agric. Food Chem. 2010. Vol. 58, № 12. P. 7329–7334. <https://doi.org/10.1021/jf1010534>
33. Fernandez-Orozco R., Li L., Harflett C., Shewry P. R., Ward J. L. Effects of environment and genotype on phenolic acids in wheat in the HEALTHGRAIN diversity screen // J. Agric. Food Chem. 2010. Vol. 58, № 17. P. 9341–9352. <https://doi.org/10.1021/jf102017s>

## Reference

1. Spirina M. Yu., Alekseev G. V., total sci. eds. *Functional nutrition – a common problem of the “healthy lifestyle” of the population of the Eurasian states: Scientific articles of the 10th Eurasian Scientific Forum: Collection*. St. Petersburg, University under the IPA EurAsEC Publ., 2019. 189 p. (in Russian).
2. Lachman J., Martinek P., Kotíková Z., Orsák M., Šulc M. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain – A review. *Journal of Cereal Science*, 2017, vol. 74, pp. 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.007>
3. Polonsky V. I., Loskutov I. G., Sumina A. V. Breeding for antioxidant content in grain as a promising direction for obtaining healthy food products. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 343–352 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ18.370>
4. Yudina R. S., Gordeeva E. I., Shoeva O. Yu., Tikhonova M. A., Khlestkina E. K. Anthocyanins as components of functional nutrition. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 178–189 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ21.022>
5. Rubets V. S., Voronchikhina I. N., Igonin V. N., Sidorenko V. S., Voronchikhin V. V. Characteristics of violet-grain varieties of spring soft wheat in the conditions of the Central region of the Non-Chernozem zone of Russia. *International Agricultural Journal*, 2022, vol. 5, pp. 525–529 (in Russian). [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_65\\_5\\_525](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_5_525)
6. Vasilova N. Z., Askhadullin D. F., Askhadullin Dan. F., Bagavieva E. Z., Tazutdinova M. R., Khusainova I. I. Violet-grain variety of spring soft wheat Nadir. *Grain Legumes and Cereal Crops*, 2021, vol. 4, no. 40, pp. 66–75 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2021-4-66-75>
7. Voronchikhina I. N., Sidorenko V. S., Rubets V. S., Pylnev V. V., Igonin V. N., Voronchikhin V. V., Gruzdev I. V. Grain quality assessment of spring wheat varieties with purple grain color under the conditions of the Central Russian Scientific Research Plant. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2022, vol. 6, pp. 54–66 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-6-54-66>
8. Fotev Yu. V., Pivovarov V. F., Artemyeva A. M., Kulikov I. M., Goncharova Yu. K., Syso A. I., Goncharov N. P. Concept of creating a Russian national system of functional food products. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 776–783 (in Russian).
9. Cerletti C., De Curtis A., Bracone F., Digesù C., Morganti A. G., Iacoviello L., de Gaetano G., Donati M. B. Dietary anthocyanins and health: Data from Flora and Athena EU projects. *Br. J. Clin. Pharmacol.*, 2016, vol. 83, no. 1, pp. 103–106. <https://doi.org/10.1111/bcp.12943>



10. Glassy wheat. Red-grained winter. *Chemical composition, nutritional value* (in Russian). Available at: [https://health-diet.ru/base\\_of\\_food/sostav/19971.php](https://health-diet.ru/base_of_food/sostav/19971.php) (accessed April 12, 2024).
11. Fardet A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: What is beyond fibre? *Nutr. Res. Rev.*, 2010, vol. 23, no. 1, pp. 65–134. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000041>
12. Rumyantseva N. I., Valieva A. I., Akulov A. N., Askhadullin Dan. F., Askhadullin Dam. F., Vasilova N. Z. The influence of drought and high temperatures on the yield and grain quality of violet-grain lines of spring soft wheat. *Biomics*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 254–273 (in Russian). <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2021-17>
13. GOST 32343-2013 *Feed, compound feed. Determination of calcium, copper, iron, magnesium, manganese, potassium, sodium and zinc by atomic absorption spectrometry* (ISO 6869:2000) ISS 65.120 (date of introduction 2015-07-01). Moscow, Standartinform, 2020. 15 p. (in Russian).
14. Rudenko A. O., Kartsova L. A. Determination of water-soluble B vitamins and vitamin C in compound feeds, premixes and biologically active additives by reversed-phase HPLC. *Journal of Analytical Chemistry*, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 73–78 (in Russian).
15. GOST 32043-2012 *Premixes. Methods for determination of vitamins A, D, E* (date of introduction 01.07.2014). Moscow, Standartinform, 2020. 14 p. (in Russian).
16. Kupina S., Fields C., Roman M. C., Brunelle S. L. Determination of total phenolic content using the Folin-C assay: Single-laboratory validation, first action. *J. AOAC Int.*, 2018, vol. 101, pp. 1466–1472.
17. Kanevsky M. V., Grinev V. S., Polukonova N. V., Navolokin N. A., Belyachenko Yu. A., Bucharskaya A. B., Durnova N. A., Maslyakova G. N., Shirokov A. A. Comparative analysis of the content of phenolic compounds in the composition of anthocyanin extracts of the Purpurnaya Saratovskaya corn variety grown under different moisture conditions using spectroscopy and HPLC methods. *Chemical and Pharmaceutical Journal*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 32–36 (in Russian). <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2020-54-3-32-36>
18. Jiang H. C., Chi-Tang H. J. Antioxidant activities of caffeic acid and its related hydroxycinnamic acid compounds. *Agric. Food Chem.*, 1997, vol. 45, pp. 2374–2378.
19. El Houssni I., Zahidi A., Khedid K., Hassikou R. Nutrient and anti-nutrient composition of durum, soft and red wheat landraces: Implications for nutrition and mineral bioavailability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, vol. 15, art. 101078. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101078>
20. Granda L., Rosero A., Benešová K., Pluháčková H., Neuwirthová J., Cerkal R. Content of selected vitamins and antioxidants in colored and nonpigmented varieties of quinoa, barley, and wheat grains. *Journal of Food Science*, 2018, vol. 83, no. 10, pp. 2439–2447. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14334>
21. Tian P., Liu Y., Cheng Y., Yang B., Wang Y., Wu B. Exploration of folate and its derivatives in grains of wheat with different colors. *Frontiers in Genetics*, 2025, vol. 16, art. 1549122. <https://doi.org/10.3389/fgene.2025.1549122>
22. Shi P., Li B., Chen H., Song C., Meng J., Xi Z., Zhang Z. Iron supply affects anthocyanin content and related gene expression in berries of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon. *Molecules*, 2017, vol. 22, no. 2, art. 283. <https://doi.org/10.3390/molecules22020283>
23. Mikhailova O. P. Omsk wheat as a product of functional orientation. *Young Scientist*, 2023, vol. 5, no. 452, pp. 223–225 (in Russian).
24. Korulkin D. Yu., Abilov Zh. A., Muzychkina R. A., Tolstikov G. A. *Prirodnye flavonoidy* [Natural flavonoids]. Novosibirsk, GEO, 2007. 229 p. (in Russian)
25. *Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation: Methodological recommendations*. Moscow, Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing Publ., 2021. 72 p. (in Russian)
26. GOST R 55577-2013 *Specialized and functional food products. Information on distinctive features and efficiency* (date of introduction 06.09.2013). Moscow, Standartinform, 2014. 15 p. (in Russian).
27. Adamcevich N. Yu., Boltovskij V. S., Titok V. V. The influence of extraction parameters on the output of flavonoids from littlewale (*Lithospermum officinale* L.). *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 402–411 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-4-402-411>
28. Kapitova I. A., Pavlov K. V. Methods of extracting anthocyanins from plant material and purification techniques (review). *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 245–253 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-02-245-253>
29. Kurkin V. A., Ryazanova T. K. Determination of anthocyanins in blueberries. *Pharmacy*, 2012, no. 2, pp. 10–13 (in Russian)
30. Liu H. L., Jiang W. B., Xie M. X. Flavonoids: Recent advances as anticancer drugs. *Recent Pat. Anticancer Drug. Discov.*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 152–164. <https://doi.org/10.2174/157489210790936261>
31. Akulov A. N., Valieva A. I., Vasilova N. Z., Askhadullin D. F., Askhadullin Dam. F., Rumyantseva N. I. Influence of weather conditions on the content and composition of phenolic compounds in the grain of purple-grain lines of spring soft wheat. In: *Mekhanizmy ustojchivosti rastenij i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy: sb. materialov Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem* (Irkutsk, 10–15 iyulya



- 2018): v 2 ch. Ch. 1 [Mechanisms of Resistance of Plants and Microorganisms to Unfavorable Environment: Coll. of materials of the All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Irkutsk, July 10–15, 2018): in 2 parts. Part 1]. Irkutsk, Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry RAS Publ., 2018, pp. 55–60 (in Russian). <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-55-60>
32. Heimler D., Vignolini P., Isolani L., Arfaioli P., Ghiselli L., Romani A. Polyphenol content of modern and old varieties of *Triticum aestivum* L. and *T. durum* Desf. grains in two years of production. *J. Agric. Food Chem.*, 2010, vol. 58, no. 12, pp. 7329–7334. <https://doi.org/10.1021/jf1010534>
33. Fernandez-Orozco R., Li L., Harflett C., Shewry P. R., Ward J. L. Effects of environment and genotype on phenolic acids in wheat in the HEALTHGRAIN diversity screen. *J. Agric. Food Chem.*, 2010, vol. 58, no. 17, pp. 9341–9352. <https://doi.org/10.1021/jf102017s>

Поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 26.12.2025  
The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 20.12.2025; accepted for publication 26.12.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 87–89

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 87–89

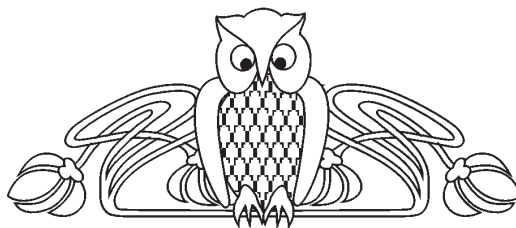
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-87-89>, EDN: PZEDWH

Научная статья

УДК 581.9(470.57)

## Новые флористические находки в Республике Башкортостан (по материалам 2025 года)



В. М. Васюков<sup>1</sup>✉, А. С. Курапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН, Россия, 445003, Самарская область, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10

<sup>2</sup>Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, Южно-Уральский ботанический сад-институт, Россия, 450080, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, корп. 3

Васюков Владимир Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследования экосистем, [vasjukov@yandex.ru](mailto:vasjukov@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-2688-1673>

Курапов Александр Сергеевич, аспирант лаборатории флоры и растительности, [jasoncoleen@mail.ru](mailto:jasoncoleen@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-2788-1213>

**Аннотация.** В статье приведена информация о находках с территории Бугульминско-Белебеевской возвышенности в 2025 году 6 видов (*Agrimonia grandis* (Asch. et Graebn.) Andr. ex Dobrocz., *Astragalus silviteppaceus* Knjaz., *Astragalus terginus* (Knjaz., Kulikov et E. G. Philippov) Knjaz., *Erucastrum gallicum* (Willd.) O. E. Schulz, *Koeleria theodoriana* (Klokov ex Tzvelev) Tzvelev, *Nonea lutea* (Desr.) DC.) и 2 нотовидов (*Galatella* × *tzvelevii* Vasjukov et Saksonov, *Veronica bashkiriensis* (Klokov ex Tzvelev) Vasjukov × *Veronica incana* L.) сосудистых растений, новых для Республики Башкортостан.

**Ключевые слова:** флора, новые виды, Республика Башкортостан, Россия

**Благодарности.** Работа выполнена по теме государственного задания Института экологии Волжского бассейна РАН «Комплексная оценка состояния биологических ресурсов и мониторинг природных экосистем Волжского бассейна» (FMRW-2025-0047, № 1024032600230-5-1.6.19).

Авторы выражают благодарность за консультации Л. М. Абрамовой (Уфа), М. С. Князеву (Екатеринбург), А. В. Чувашову и за помощь в исследованиях А. В. Ивановой, М. Н. Стаменову (Тольятти).

**Для цитирования:** Васюков В. М., Курапов А. С. Новые флористические находки в Республике Башкортостан (по материалам 2025 года) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 87–89. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-87-89>, EDN: PZEDWH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### New floral finds in the Republic of Bashkortostan (based on the materials of 2025)

В. М. Васюков<sup>1</sup>✉, А. С. Курапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara Federal Research Center of RAS, Institute of Ecology of the Volga Basin of RAS, 10 Komzin St., Togliatti 445003, Samara Region, Russia

<sup>2</sup>Ufa Federal Research Center of RAS, South Ural Botanical Garden-Institute, 195/3 Mendeleev St., Ufa 450080, Russia

Vladimir M. Vasjukov, [vasjukov@yandex.ru](mailto:vasjukov@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-2688-1673>

Aleksandr S. Kurapov, [jasoncoleen@mail.ru](mailto:jasoncoleen@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-2788-1213>

**Abstract.** The article provides information on the findings of 6 species (*Agrimonia grandis* (Asch. et Graebn.) Andr. ex Dobrocz., *Astragalus silviteppaceus* Knjaz., *Astragalus terginus* (Knjaz., Kulikov et E. G. Philippov) Knjaz., *Erucastrum gallicum* (Willd.) O. E. Schulz, *Koeleria theodoriana* (Klokov ex Tzvelev) Tzvelev, *Nonea lutea* (Desr.) DC.) and 2 nothospecies (*Galatella* × *tzvelevii* Vasjukov et Saksonov, *Veronica bashkiriensis* (Klokov ex Tzvelev) Vasjukov × *Veronica incana* L.) of vascular plants new to the Republic of Bashkortostan from the Bugulminsko-Belebeevskaya upland in 2025.

**Keywords:** flora, new species, Republic of Bashkortostan, Russia

**Acknowledgements.** The work was carried out according to the state assignment of the IEVB RAS "Comprehensive assessment of the state of biological resources and monitoring of natural ecosystems of the Volga basin" (FMRW-2025-0047, No. 1024032600230-5-1.6.19).

The authors would like to thank Larisa M. Abramova (Ufa), Mikhail S. Knyazev (Ekaterinburg), Andrey V. Chuvashov (Togliatti) for their consultations and Anastasia V. Ivanova and Miroslav N. Stamenov (Togliatti) for their research assistance.



**For citation:** Vasjukov V. M., Kurapov A. S. New floral finds in the Republic of Bashkortostan (based on the materials of 2025). *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 87–89 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-87-89>, EDN: PZEDWH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

В результате флористических исследований Бугульминско-Белебеевской возвышенности в 2025 г. нами найдены 6 видов и 2 нотовида сосудистых растений, новых для Республики Башкортостан [1, 2], и ниже приведены сведения об этих находках.

Номенклатура таксонов соответствует стандартам, принятым в базе данных International Plant Names Index [3].

Образцы растений переданы в Гербарий имени Д. П. Сырейшикова (MW) Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

***Agrimonia grandis*** (Asch. et Graebn.) Andr. ex Dobrocz. (Rosaceae):

N 54.360697, E 54.07066, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, 2 км северо-восточнее с. Карамала-Губеево, березовые колки, 02.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

**Примечание.** Обычный в регионе *A. asiatica* Juz. отличается листьями снизу с плотным густым войлочком и внешними шипиками на плодах, отогнутыми вниз (*A. grandis* – более крупное растение до 130 см выс., листья снизу с войлочком, перекрытым шелковистым опушением из прямых волосков и внешними шипиками на плодах, направленными вверх и в стороны под острым углом) [4].

***Astragalus silvestepaceus*** Knjaz. (Fabaceae):

N 54.481922, E 54.063020, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, близ с. Кандры-Тюмекеево, природный парк «Кандры-Куль», каменистый склон, 02.07.2025, В. Васюков, А. Курапов, А. Иванова, М. Стаменов, опр. М. С. Князев.

**Примечание.** Эндемик Среднего и северной (лесостепной) части Южного Урала. Близкий *A. austriacus* Jacq. отличается меньшими размерами цветков и бобов, что связано с его диплоидностью (*A. silvestepaceus* – тетраплоид), а также более выраженной выемчатостью крыльев и менее длинными зубцами чашечки [5].

***Astragalus tergeminus*** (Knjaz., Kulikov et E. G. Philippov) Knjaz. (Fabaceae):

N 54.360697, E 54.07066, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, 2 км северо-восточнее с. Карамала-Губеево, каменистые степи, 02.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

**Примечание.** Эндемик мелкосопочников восточных р-нов Оренбургской обл. России и сопредельных р-нов Актыубинской обл. Казахстана. Близкий *A. helmii* Fisch. ex DC. отличается наличием 5–10 пар листочков у наиболее развитых листьев (*A. tergeminus* 2–4 пары листочков) [5].

***Erucastrum gallicum*** (Willd.) O. E. Schulz (Brassicaceae):

N 54.360697, E 54.07066, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, северные окрестности г. Октябрьск, гора Нарыш-Тау, обнажения известняковых красных глин, 01.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

***Galatella* × *tzzelevii*** Vasjukov et Saksonov (Asteraceae):

N 54.511238, E 53.469466, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, северные окрестности г. Октябрьск, гора Нарыш-Тау, луговая степь с обнажениями известняковых красных глин, 01.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

**Примечание.** Нотовид *G. × tzzelevii* (растение 30–60 см выс., немного сероватое, покрытое короткими, но более или менее обильными паутинистыми волосками, с малозаметными точечными железками в верхней части; листья от продолговато-ланцетных до ланцетных, 1–6 см дл. и 2.5–10 мм шир., на верхушке коротко заостренные, нижние и средние с 3 жилками, верхние часто с 1 жилкой) происходит от гибридизации *G. biflora* (L.) Nees (растение 25–100 см выс., зеленое, покрытое короткими сосочковидными волосками; листья линейно-ланцетные или линейные, 1–8 см дл. и 1.5–8 мм шир., на верхушке длинно заостренные; нижние средние с 3 жилками, верхние часто с 1 жилкой) × *G. villosa* (L.) Rchb. f. (растение 15–35 см выс., покрытое сероватым войлочком, с незаметными точечными железками; листья продолговатые или продолговато-линейные, 1.5–4 см дл. и 3–10 мм шир., на верхушке коротко заостренные или туповатые; все с 1 жилкой) [6].

***Koeleria theodoriana*** (Klokov ex Tzvelev) Tzvelev (Poaceae):

1) N 54.511238, E 53.469466, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, северные окрестности г. Октябрьск, гора Нарыш-Тау, обнажения известняковых красных глин. 01.07.2025, В. Васюков, А. Курапов;



2) N 54.549535, E 54.080513, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, северо-западная окраина с. Кандры, близ памятника природы «Посадки сосны в окрестностях села Кандры», обнажения известняковых красных глин, 03.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

*Примечание.* Эндемик юга и юго-востока Европейской России, северо-запада Казахстана. Близкий вид *K. sclerophylla* P. A. Smirn. s.str. имеет нижние цветковые чешуи по всей поверхности (кроме перепончатой окраины) покрыты отстоящими или прилегающими волосками; верхние колосковые чешуи 4.5–6 мм дл. (у *K. theodoriana* – нижние цветковые чешуи голые или с немногими волосками в их нижней половине, верхние колосковые чешуи 3.5–4.5 мм дл.) [7].

*Nonea lutea* (Desr.) DC. (Boraginaceae):

N 54.511238, E 53.469466, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, северные окрестности г. Октябрьск, гора Нарыш-Тау, обнажения известняковых красных глин, 01.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

*Veronica bashkiriensis* (Klokov ex Tzvelev) Vasjukov × *Veronica incana* L. (Plantaginaceae):

N 54.360697, E 54.07066, Респ. Башкортостан, Туймазинский р-н, 2 км северо-восточнее с. Карамала-Губеево, каменистые степи, 02.07.2025, В. Васюков, А. Курапов.

*Примечание.* Нотовид с промежуточными признаками между родительскими видами, габитуально близок к *V. bashkiriensis*, но отличается довольно обильным войлочным опушением (как у *V. incana*) и железистыми волосками.

#### Список литературы

1. Определитель высших растений Башкирской АССР: в 2 т. / отв. ред. Е. В. Кучеров, А. А. Мулдашев. М.: Наука, 1988. Т. 1. 316 с.

2. Определитель высших растений Башкирской АССР: в 2 т. / отв. ред. Е. В. Кучеров, А. А. Мулдашев. М.: Наука, 1989. Т. 2. 375 с.
3. IPNI: The International Plant Names Index. URL: <http://www.ipni.org> (дата обращения: 30.10.2025).
4. Камелин Р. В. Род Репейничек – *Agrimonia* L. // Флора Восточной Европы. Т. 10 / отв. ред. Н. Н. Цвелёв. СПб.: Мир семья; Изд-во СПХФА, 2001. С. 467–470.
5. Князев М. С. Бобовые (Fabaceae Lindl.) Урала: видообразование, географическое распространение, историко-экологические свиты: дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2014. 608 с.
6. Васюков В. М., Саксонов С. В. *Galatella* × *tzvelevii* (Asteraceae) – новый гибрид из Жигулей // Ботанический журнал. 2015. Т. 100, № 10. С. 1106–1109.
7. Цвелёв Н. Н., Пробатова Н. С. Злаки России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. 646 с.

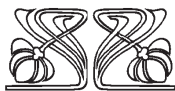
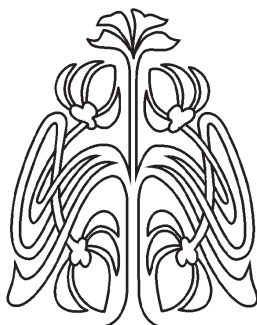
#### References

1. *Opredeletel' vysshikh rastenij Bashkirskoj ASSR: v 2 t. Otv. red. E. V. Kuchero, A. A. Muldashev* [Kuchero E. V., Muldashev A. A., eds. Determiner to higher plants of the Bashkir ASSR: in 2 vols]. Moscow, Nauka, 1988. Vol. 1. 316 p. (in Russian).
2. *Opredeletel' vysshikh rastenij Bashkirskoj ASSR: v 2 t. Otv. red. E. V. Kuchero, A. A. Muldashev* [Kuchero E. V., Muldashev A. A., eds. Determiner to higher plants of the Bashkir ASSR: in 2 vols]. Moscow, Nauka, 1989. Vol. 2. 375 p. (in Russian).
3. IPNI: *The International Plant Names Index*. Available at: <http://www.ipni.org> (accessed October 30, 2025).
4. Kamelin R. V. Genus *Agrimonia* L. Tzvelev N. N., ed. *Flora of Eastern Europe*. Vol. 10. St. Petersburg, Mir i semia, Academy Chemico-Pharmaceutica Peteropolitana Publ., 2001, pp. 467–470 (in Russian).
5. Knyazev M. S. *Legumes (Fabaceae Lindl.) of the Urals: Speciation, Geographical Distribution, Historical and Ecological Suites*. Diss. Dr. Sci. (Biol.). Ekaterinburg, 2014. 608 p. (in Russian).
6. Vasjukov V. M., Saksonov S. V. *Galatella* × *tzvelevii* (Asteraceae), a new hybrid from the Zhiguli. *Botanical Journal*, 2015, vol. 100, no. 10, pp. 1106–1109 (in Russian).
7. Tzvelev N. N., Probatova N. S. *Zlaki Rossii* [Grasses of Russia]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2019. 646 p. (in Russian).

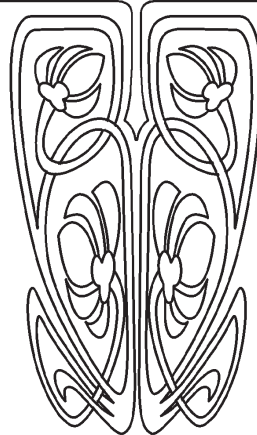
Поступила в редакцию 15.11.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 20.02.2026  
The article was submitted 15.11.2025; approved after reviewing 19.02.2026; accepted for publication 20.02.2026



## ЭКОЛОГИЯ



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 90–99

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 90–99

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-90-99>

EDN: QPIEKJ

Научная статья  
УДК 574.192.2

### Эколого-физиологический потенциал аборигенных штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв с высоким уровнем нефтяного загрязнения

Д. Д. Нестеркина<sup>1</sup>, Д. М. Голубев<sup>1</sup> ✉, А. К. Тарасюк<sup>1</sup>, Е. И. Тихомирова<sup>2</sup>,  
О. В. Нечаева<sup>3,4</sup>, Д. В. Уткин<sup>1</sup>, Е. В. Глинская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

<sup>3</sup>ФГБУ «НМИЦ АГП им. В. И. Кулакова» Минздрава России, Россия, 117997, г. Москва, ул. Академика Опарина, д. 4

<sup>4</sup>ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Россия, 125993, г. Москва, ул. Баррикадная, д. 2/1, стр. 1

Нестеркина Дарья Дмитриевна, магистрант биологического факультета, [nesterkina.darya@yandex.ru](mailto:nesterkina.darya@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-5953-3647>

Голубев Дмитрий Михайлович, магистрант биологического факультета, [dimagolubev2018@yandex.ru](mailto:dimagolubev2018@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Тарасюк Анна Константиновна, аспирант, ассистент кафедры микробиологии и физиологии растений, [annatarasyuk011201@gmail.com](mailto:annatarasyuk011201@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-6664-3218>

Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и техносферной безопасности, [tichomirova\\_ei@mail.ru](mailto:tichomirova_ei@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>

Нечаева Ольга Викторовна, доктор биологических наук, профессор, <sup>3</sup>ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии отдела молекулярной микробиологии и биоинформатики института микробиологии, антимикробной терапии и эпидемиологии; <sup>4</sup>профессор кафедры медицинской микробиологии имени академика З. В. Ермольевой, [olgav.nechaeva@rambler.ru](mailto:olgav.nechaeva@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3331-1051>

Уткин Денис Валерьевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой микробиологии и физиологии растений, [twoduck@yandex.ru](mailto:twoduck@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5903-7700>

Глинская Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, [elenavg-2007@yandex.ru](mailto:elenavg-2007@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

**Аннотация.** Нефть и нефтепродукты являются серьезным источником загрязнения окружающей среды, что обуславливает накопление углеводов в почвенном профиле. Они загрязняют грунтовые воды, нарушают естественные биохимические почвенные процес-



сы, взаимодействуют с минеральными соединениями, снижая их биодоступность для растений, и вызывают отравление и гибель живых организмов. Исследование углеводородокисляющих микроорганизмов имеет существенное прикладное значение в связи с их способностью разлагать углеводороды. Анализ адаптационных механизмов и устойчивости к стрессовым факторам бактерий-деструкторов позволяет прогнозировать эффективность биоремедиации в различных экологических сценариях. В работе изучено влияние температуры, концентрации NaCl и значения pH среды на рост и интенсивность образования биопленок углеводородокисляющими бактериями, выделенными из почв с высоким уровнем нефтяного загрязнения. Исследована субстратная специфичность бактерий-нефтедеструкторов. Наиболее устойчивыми к абиотическим факторам среды являются штаммы *Paenibacillus polymyxa* S31 и *Citrobacter freundii* K29. Наибольшей субстратной специфичностью обладает *P. polymyxa* S31, так как он способен к деградации всех исследуемых субстратов. Максимальная продукция биопленок всеми исследуемыми штаммами наблюдается при температуре 28°C, штаммами *Bacillus circulans* D18, *Bacillus licheniformis* M88, *Bacillus muralis* V16, *Bacillus pumilus* L27, *P. glucanolyticus* F15 – в щелочной среде (при pH 9), штаммами *C. freundii* K29 и *P. polymyxa* S31 – в нейтральной среде (при pH 7).

**Ключевые слова:** углеводородокисляющие бактерии, нефть, нефтепродукты, почвенные экосистемы, экологический мониторинг, биопленки, микроорганизмы, антропогенно нарушенные территории

**Благодарности.** Авторы благодарят Н. Е. Щербакову (ФКУН Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб» Роспотребнадзора) за проведение масс-спектрометрического анализа и идентификацию выделенных штаммов.

**Для цитирования:** Нестеркина Д. Д., Голубев Д. М., Тарасюк А. К., Тихомирова Е. И., Нечаева О. В., Уткин Д. В., Глинская Е. В. Эколого-физиологический потенциал аборигенных штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв с высоким уровнем нефтяного загрязнения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-90-99>, EDN: QPIEKJ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Ecophysiological potential of indigenous hydrocarbon-degrading bacteria isolated from heavily oil-contaminated soils

D. D. Nesterkina<sup>1</sup>, D. M. Golubev<sup>1</sup>✉, A. K. Tarasyuk<sup>1</sup>, E. I. Tikhomirova<sup>2</sup>, O. V. Nechaeva<sup>3,4</sup>, D. V. Utkin<sup>1</sup>, E. V. Glinskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410054, Russia

<sup>3</sup>Academician V. I. Kulakov National Medical Research Center of Obstetrics, Gynecology, and Perinatology, Ministry of Health of Russia, 4 Akademika Oparina St., Moscow 117997, Russia

<sup>4</sup>Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of the Russian Federation, 1, 2/1 Barrikadnaya St., Moscow 125993, Russia

Darya D. Nesterkina, nesterkina.darya@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5953-3647>

Dmitry M. Golubev, dimagolubev2018@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Anna K. Tarasyuk, annatarasyuk011201@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6664-3218>

Elena I. Tikhomirova, tikhomirova\_ei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6030-7344>

Olga V. Nechaeva, olgav.nechaeva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3331-1051>

Denis V. Utkin, twoduck@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5903-7700>

Elena V. Glinskaya, elenavg-2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

**Abstract.** Oil and petroleum products are a significant source of environmental pollution, leading to the accumulation of hydrocarbons in the soil profile. They contaminate groundwater, disrupt natural soil biochemical processes, interact with mineral compounds – thereby reducing their bioavailability to plants – and cause the poisoning and death of living organisms. The study of hydrocarbon-oxidizing microorganisms is of considerable practical importance due to their ability to degrade hydrocarbons. Analyzing the adaptation mechanisms and stress resistance of degrading bacteria enables the prediction of bioremediation efficiency under various ecological scenarios. This work investigates the influence of temperature, NaCl concentration, and pH on the growth and biofilm formation intensity of hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from soils with high levels of oil contamination. The substrate specificity of the oil-degrading bacteria was also studied. The strains *Paenibacillus polymyxa* S31 and *Citrobacter freundii* K29 were the most tolerant to abiotic environmental factors. *P. polymyxa* S31 exhibited the broadest substrate specificity, as it was capable of degrading all tested substrates. Maximum biofilm production by all studied strains was observed at 28°C. For strains *Bacillus circulans* D18, *Bacillus licheniformis* M88, *Bacillus muralis* V16, *Bacillus pumilus* L27, and *P. glucanolyticus* F15, the maximum production occurred in an alkaline environment (at pH 9), while for strains *C. freundii* K29 and *P. polymyxa* S31, it was in a neutral environment (at pH 7).

**Keywords:** hydrocarbon-oxidizing bacteria, petroleum, petroleum products, soil ecosystems, environmental monitoring, biofilms, microorganisms, anthropogenic disturbed areas

**Acknowledgments.** The authors wish to thank Nataliya E. Shcherbakova (Russian Research Anti-Plague Institute “Microbe”) for performing the mass spectrometry analysis and identification of the isolated strains.

**For citation:** Nesterkina D. D., Golubev D. M., Tarasyuk A. K., Tikhomirova E. I., Nechaeva O. V., Utkin D. V., Glinskaya E. V. Ecophysiological potential of indigenous hydrocarbon-degrading bacteria isolated from heavily oil-contaminated soils. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 90–99 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-90-99>, EDN: QPIEKJ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



## Введение

С каждым годом повышается спрос на нефть и нефтепродукты, ускоряется развитие нефтяной промышленности. Ежегодно в процессе добычи, транспортировки и переработки миллионы тонн углеводов попадают в почву [1]. Одним из важнейших вопросов современности является восстановление экосистем после загрязнения углеводородами, в частности, нефтью и нефтепродуктами [2]. Накопление даже небольшого количества углеводов может оказывать негативное влияние на физико-химические свойства почвы [3]. Находясь в почве длительное время, нефть за счет своего токсического и канцерогенного действия вызывает повреждения растений на всех стадиях их развития и нарушает экологическое равновесие почвы, что опосредованно влияет на животных и человека [4].

Сырая нефть представляет собой сложное природное вещество, состав которого в основном определяется происхождением, но в любом случае характеризуется преобладанием углеводов. С нефтепродуктами дела обстоят немного сложнее, ведь их состав определяется не только природой изначальной субстанции, но и методом переработки [5]. Так или иначе, сложность состава нефтяных веществ совместно с их гидрофобностью объясняют трудность очистки почвы от данных соединений [6].

Рекультивационные мероприятия почв вызывают особый интерес, поскольку существующие методические подходы оказывают различное влияние на свойства почвы. На сегодняшний день одним из основных направлений рекультивации является биоремедиация – метод, основанный на способности живых организмов разлагать загрязнители окружающей среды и превращать их в безвредные химические вещества [7]. Биоремедиация считается экономически эффективным и экологически чистым методом восстановления антропогенно нарушенных территорий, значительно снижающим токсичное воздействие поллютантов на подлежащие рекультивации участки [8].

Процессы самоочищения почвы от органических загрязнителей, в частности углеводов нефти, осуществляется под действием ее микробной активности. Бактерии являются основными агентами разложения нефти и нефтепродуктов в окружающей среде. Известно более

79 родов бактерий, которые могут использовать углеводороды в качестве источника углерода и энергии, разлагающих нефтяные соединения, а именно *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Kocuria*, *Mycobacterium*, *Oleiphilus*, *Oleispira*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* и другие. Использование бактерий-нефтедеструкторов для восстановления нефтезагрязненных территорий является одним из наиболее эффективных способов биоремедиации [9–11].

На основе углеводородокисляющих бактерий создают эффективные, экологически безопасные и экономически выгодные препараты для очистки почв, загрязненных нефтью [12]. Для скрининга штаммов особое значение имеет оценка их субстратного спектра, устойчивости к абиотическим факторам окружающей среды и способности формировать биопленки [13].

Цель работы – выявить эколого-физиологические особенности аборигенных штаммов углеводородокисляющих бактерий для обоснования их использования в биоремедиационных биопрепаратах.

## Материалы и методы

Объектом исследования являлись пробы темно-каштановых почв, отобранных с земельных участков сельскохозяйственного назначения, загрязненных нефтепродуктами в результате аварийной ситуации (Советский район, Саратовская область) (рис. 1) [14].

Советский район находится в степной зоне Саратовского Заволжья. Основными характеристиками почвенного покрова района являются его относительная однородность, невысокое содержание гумуса и степень солонцеватости (рис. 2) [15].

Отбор проб методом конверта проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-20174.

Лабораторные исследования проведены в ИЛЦ ЭкоОС (СГТУ имени Гагарина Ю. А.) и на кафедре микробиологии и физиологии растений (СГУ имени Н. Г. Чернышевского). Для выделения углеводородокисляющих бактерий 0,1 мл почвенной суспензии высевали по общепринятой методике на синтетическую среду М9, в которой в качестве единственного источника углерода присутствовало вазелиновое масло [16]. Культивирование микроорганизмов проводили в стационарных условиях в термостате ТС-1-20 СПУ при температуре +28°C в течение 2–4 суток.



Рис. 1. Местоположение с. Новокривовка на топографической карте Саратовской области [14]  
 Fig. 1. Location of Novokrivovka village on the topographic map of the Saratov Region

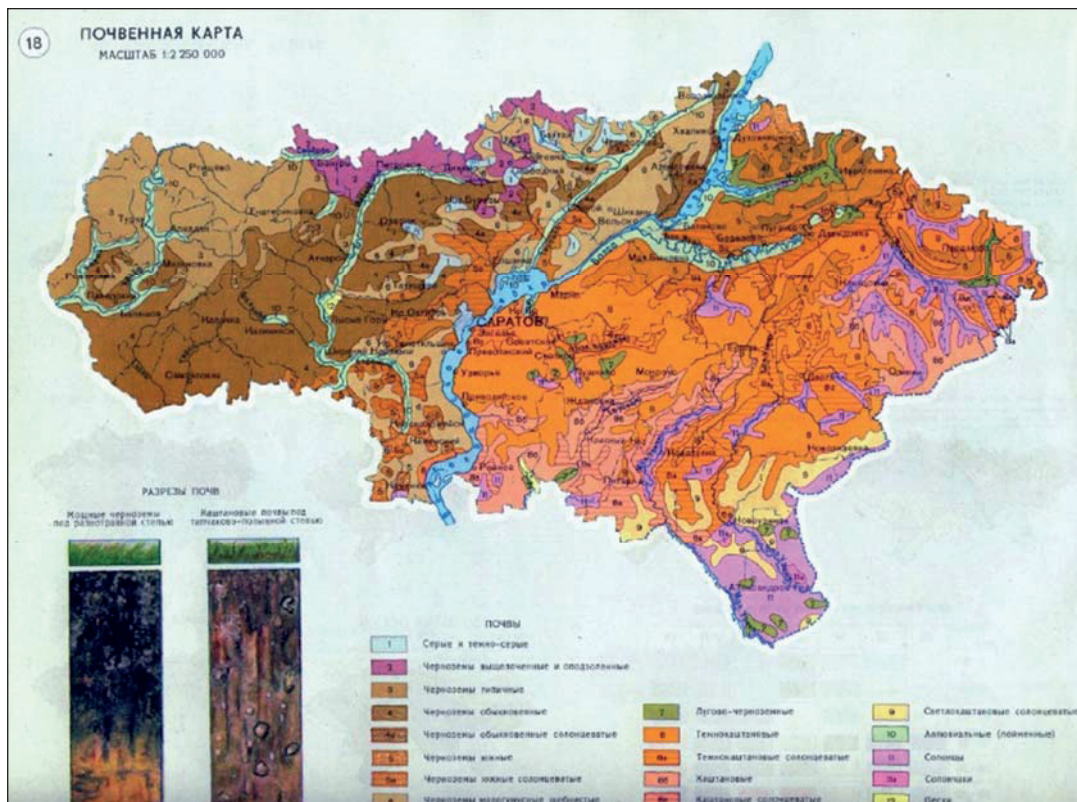


Рис. 2. Почвенная карта Саратовской области  
 Fig. 2. Soil map of the Saratov Region



Идентификацию бактерий проводили на основании изучения фенотипических свойств по «Определителю бактерий Берджи» (1997) [17].

Верификацию и определение неидентифицированных видов осуществляли с помощью метода MALDI-ToF масс-спектрометрии [18]. Для этого из суточной культуры микроорганизмов с одной колонии изготавливали белковые экстракты с использованием этанола, муравьиной кислоты и 80% трифторуксусной кислоты. Экстракцию проводили в соответствии с МУ 4.2.3.733-21. В качестве матрицы использовали насыщенный водный раствор  $\alpha$ -циано-4-гидроксикоричной кислоты, ацетонитрила и 5% трифторуксусной кислоты. Сбор спектров производился в автоматическом режиме на масс-спектрометре Microflex™ LT MALDI-TOF (Bruker Daltonics, Германия) с использованием программы Flex Control (ver. 3.3). Диапазон масс полученного спектра – 2–20 КДа. Полученные масс-спектры анализировали в программе Biotyper 3 (Bruker Daltonics, Германия). Таксономию исследуемых образцов определяли на основании значения индекса соответствия (score value, SV). Идентификацию белков осуществляли с использованием международной базы белков UniProt [19]

Для исследования субстратной специфичности углеводородокисляющих бактерий в работе использовали сырую нефть Соколовгорского месторождения (Волго-Уральский нефтяной бассейн, г. Саратов, Россия), предельные (n-алканы: гексан, гептан, декан), непредельные (гексадиен) и ароматические (толуол) углеводороды, а также углеводородное производное – фенол. Способность бактериальных штаммов к деструкции указанных субстратов оценивали методом лунок. В центр чашки Петри с агаризованной минеральной средой М9 (г/л:  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  – 6,0;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 3,0;  $\text{NaCl}$  – 0,5;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 1,0; голодный агар – 20,0) вносили исследуемый углеводород в лунку диаметром 8 мм. Посев тест-культур производили штрихообразными линиями вокруг лунки. Благодаря радиальной диффузии субстрата в агар и его частичному испарению культивирование проводили в условиях одновременного воздействия твёрдой и газовой фаз углеводородов. Учёт результатов проводили в течение 7 суток инкубации при температуре 28°C. О деструктивной активности судили по ви-

зуальной оценке интенсивности роста тест-культур в зоне диффузии субстрата [20].

Для оценки влияния абиотических факторов на рост углеводородокисляющих штаммов были проведены эксперименты в широком диапазоне температурных условий: при +6°C (низкотемпературный режим) и +45°C (высокотемпературный режим). Параллельно исследовали влияние водородного показателя среды (ГРМ-бульон, Оболенск, Россия) на рост микроорганизмов при значениях pH 5,0 (кислая), 7,0 (нейтральная) и 9,0 (щелочная). Для определения солеустойчивости использовали среды с различной концентрацией хлорида натрия: 2, 5, 7, 10 и 15%, что позволило оценить осмотическую толерантность исследуемых штаммов [21].

Для оценки степени (способности) формирования биопленок использовали агаровые культуры микроорганизмов в стационарной фазе роста. Штаммы бактерий выращивали на ГРМ-агаре pH 7,2 (Оболенск, Россия) при температуре 28°C в течение 24 ч. Взвеси клеток микроорганизмов готовили в 0,9% NaCl по стандарту мутности 10 Ед. Далее переносили взвеси микроорганизмов в ГРМ-бульон (Оболенск, Россия) с pH, равной 5, 7 и 9, до конечной концентрации  $5 \times 10^7$  КОЕ/мл. Культуры микроорганизмов в бульоне вносили по 200 мкл в лунки полистироловых 96-луночных плоскодонных планшетов для культивирования клеток и тканей (Jet Bio-Filtration, Китай) и инкубировали при температурах +6, +28, +37 °C в течение 72 ч без встряхивания. Для отслеживания отрицательного контроля в лунки добавляли 200 мкл ГРМ-бульона pH 7,2. По окончании культивирования из лунок планшетов отбирали среду с планктонными клетками, после чего лунки промывали стерильным физиологическим раствором в объеме 200 мкл в течение 2–3 мин. Физиологический раствор полностью удаляли из лунок и высушивали планшеты в течение 20 мин. Окраску биопленок на поверхности лунок проводили по методу O'Toole, основанному на способности красителя кристаллического фиолетового связываться с клетками и внеклеточным матриксом биопленок [22]. Для этого в лунки планшетов вносили по 200 мкл отфильтрованного 0,2% раствора кристаллического фиолетового в 96% этиловом спирте и инкубировали при комнат-



ной температуре в течение 15 мин. Краситель удаляли из лунок, с последующим трехкратным промыванием водопроводной водой. Планшеты высушивали в течение 30 мин, после чего в лунки добавляли 96% раствор этанола в объеме 200 мкл для элюции связанного с биопленкой красителя. Растворитель отбирали, помещали в чистые плоскодонные планшеты и измеряли оптическую плотность на планшетном фотометре iMark (Bio Rad, США) при длине волны 600 нм. В качестве контроля использовали лунки, инкубированные с чистой средой, подвергнутые аналогичным манипуляциям.

Количественную оценку образования биопленки в каждой лунке проводили по формуле:

$$OD_{отн} = OD_{абс} / OD_c$$

где  $OD_{отн}$  – относительная оптическая плотность красителя,  $OD_{абс}$  – абсолютная оптическая плотность красителя,  $OD_c$  – оптическая плотность (OD) отрицательного контроля+3sd [23].

Умеренную продукцию биопленки считали при  $2 \times OD_c \leq OD_{отн} \leq 4 \times OD_c$ , плотную продукцию считали при  $4 \times OD_c < OD_{отн}$ , слабую – при  $OD_c < OD_{отн} < 2 \times OD_c$ .

Для каждого штамма и разных условий культивирования проводили измерения оптической плотности в 4 повторностях. Статистический анализ осуществляли с использованием программы StatTech v. 4.9.5 (ООО «Статтех», Россия). Количественные показатели оценивали на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро – Уилка. Количественные показатели, выборочное распределение которых соответствовало

нормальному, описывали с помощью средних арифметических величин ( $M$ ) и стандартных отклонений ( $SD$ ). Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$  (F–критерий Фишера). При распределении, отличном от нормального, переменные описывали с помощью медианы ( $Me$ ) и интерквартильного размаха ( $Q_1-Q_3$ ). Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$  (Критерий Краскала – Уоллиса).

## Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного микробиологического анализа образцов с последующей идентификацией выделенных культур установлено, что доминирующей группой являлись микроорганизмы рода *Bacillus*, составившие 57% от общего числа изолятов. Доля бактерий рода *Paenibacillus* составила 29%, а представители рода *Citrobacter* были обнаружены в 14% случаев.

Изолированные углеводородокисляющие бактерии были идентифицированы как грамположительные палочки следующих видов: *Bacillus circulans*; *B. licheniformis*; *B. muralis*; *B. pumilus*; *Paenibacillus glucanolyticus*; *P. polymyxa*; *Citrobacter freundii*.

Анализ субстратной специфичности исследуемых бактериальных штаммов выявил значительные различия в их метаболическом потенциале. Штамм *P. polymyxa* S31 продемонстрировал способность к деградации всех тестируемых субстратов (таблица).

Субстратный спектр углеводородокисляющих микроорганизмов  
Table. The substrate spectrum of hydrocarbon oxidizing microorganisms

Штамм / Specie	Субстрат / Substrate						
	Предельные углеводороды / Saturated hydrocarbons			Непредельные углеводороды / Unsaturated hydrocarbons	Ароматические соединения / Aromatic compounds		Сырая нефть / Crude oil
	Гексан / Hexane	Гептан / Heptane	Декан / Decane	Гексадиен / Hexadiene	Фенол / Phenol	Толуол / Toluol	
<i>B. circulans</i> D18	+	+	+	-	-	-	+
<i>B. licheniformis</i> M88	+	+	+	-	+	-	+
<i>B. muralis</i> V16	+	+	+	+	+	-	+
<i>B. pumilus</i> L27	+	+	-	+	-	+	+
<i>P. glucanolyticus</i> F15	-	-	-	-	-	-	+
<i>P. polymyxa</i> S31	+	+	+	+	+	+	+
<i>C. freundii</i> K29	-	+	+	-	-	-	+



Наиболее широким субстратным профилем использованных разлагаемых соединений характеризовался *B. pumilus* L27, однако он не был способен к утилизации фенола и декана. Штаммы *B. muralis* V16 и *B. licheniformis* M88 не проявляли способности к биодegradации толуола, тогда как *B. circulans* D18, помимо ароматических соединений, не утилизировал гексадекан. Наиболее ограниченный субстратный профиль наблюдался у штаммов *C. freundii* K29, способного к деградации только сырой нефти и двух представителей *n*-алканов (гептана и декана), и *B. glucanolyticus* F15, проявлявшего активность исключительно в отношении многокомпонентного субстрата – нефти.

Результаты исследования по определению влияния устойчивости физико-химических факторов среды на рост углеводородокисляющих бактерий показали, что все исследуемые штаммы обладали широким диапазоном выживаемости под действием абиотических факторов (Т, рН, конц. NaCl). Наиболее устойчивыми среди всех представленных штаммов явились *P. polymyxa* S31 и *C. freundii* K29, которые были способны к росту в широком диапазоне температур и рН (как при минимальной (6), так и при максимальной (45°C) температуре, как в щелочной (9), так в кислой (5) среде). Кроме того, исследуемые штаммы характеризовались способностью к росту при низких (2%) и высоких (10%) концентрациях хлорида натрия (рис. 3).

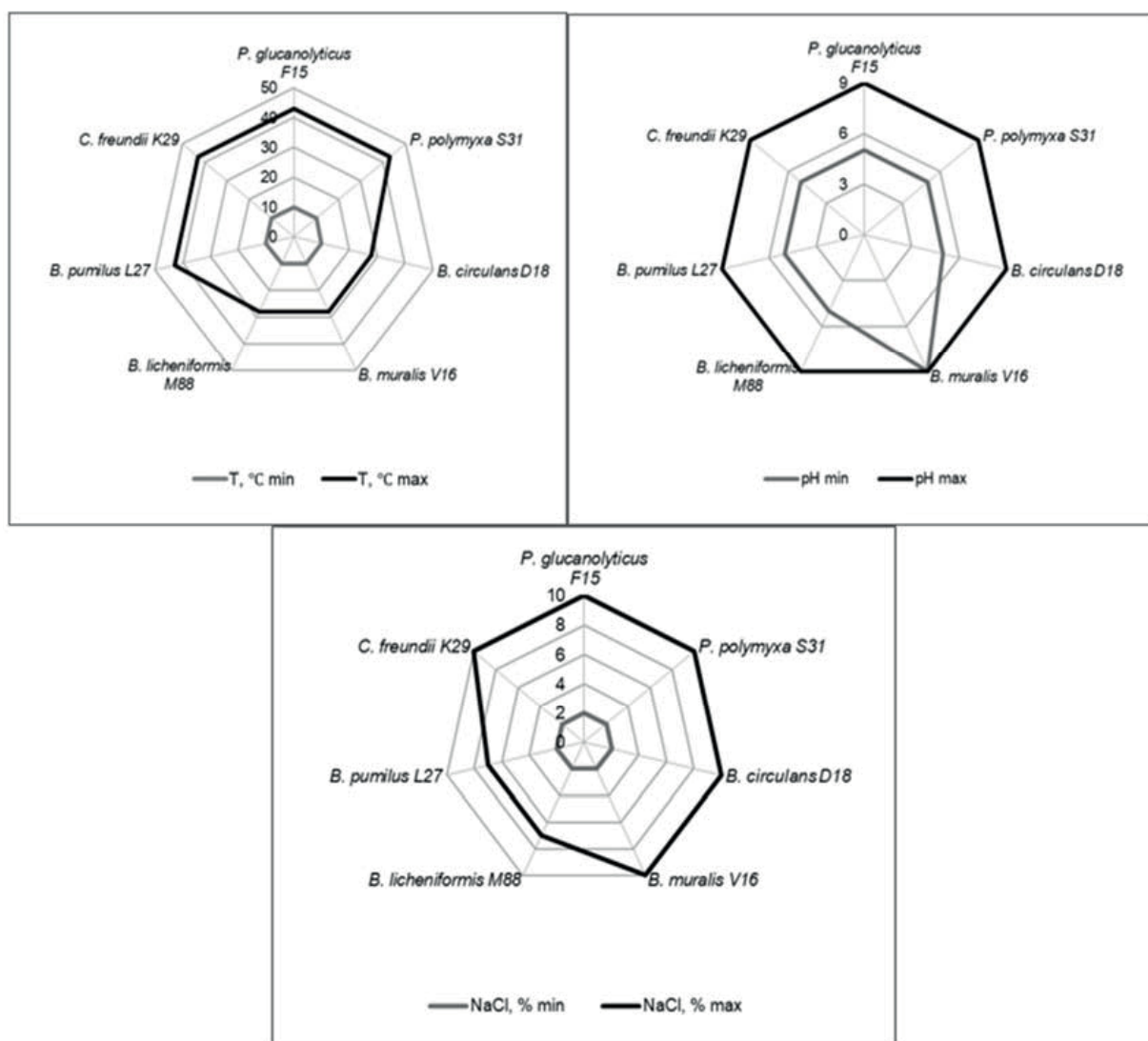


Рис. 3. Устойчивость углеводородокисляющих бактерий к физико-химическим условиям среды  
Fig. 3. Resistance of hydrocarbon-oxidizing bacteria to abiotic environmental conditions



Результаты исследования влияния температуры на процесс пленкообразования показали, что максимальная продукция биопленки всех выделенных штаммов микроорганизмов наблюдалась при температуре 28°C (рис. 4). Согласно полученным данным, при анализе оптической плотности в зависимости от температуры, были установлены статистически значимые различия.

Анализ влияния pH на формирование биопленки позволил статистически достоверно

установить, что наибольшая ее продукция у штаммов *B. circulans* D18, *B. licheniformis* M88, *B. muralis* V16, *B. pumilus* L27, *P. glucanolyticus* F15 наблюдалась в щелочной среде (pH 9) при температуре 28 °С, а для штаммов *C. freundii* K29 и *P. polymyxa* S31 оптимальной оказалась нейтральная среда (pH 7) при температуре 28 °С. Для изолятов *B. pumilus* L27 и *P. glucanolyticus* F15 было также отмечено формирование биопленки в кислой среде (pH 5) (рис. 4).

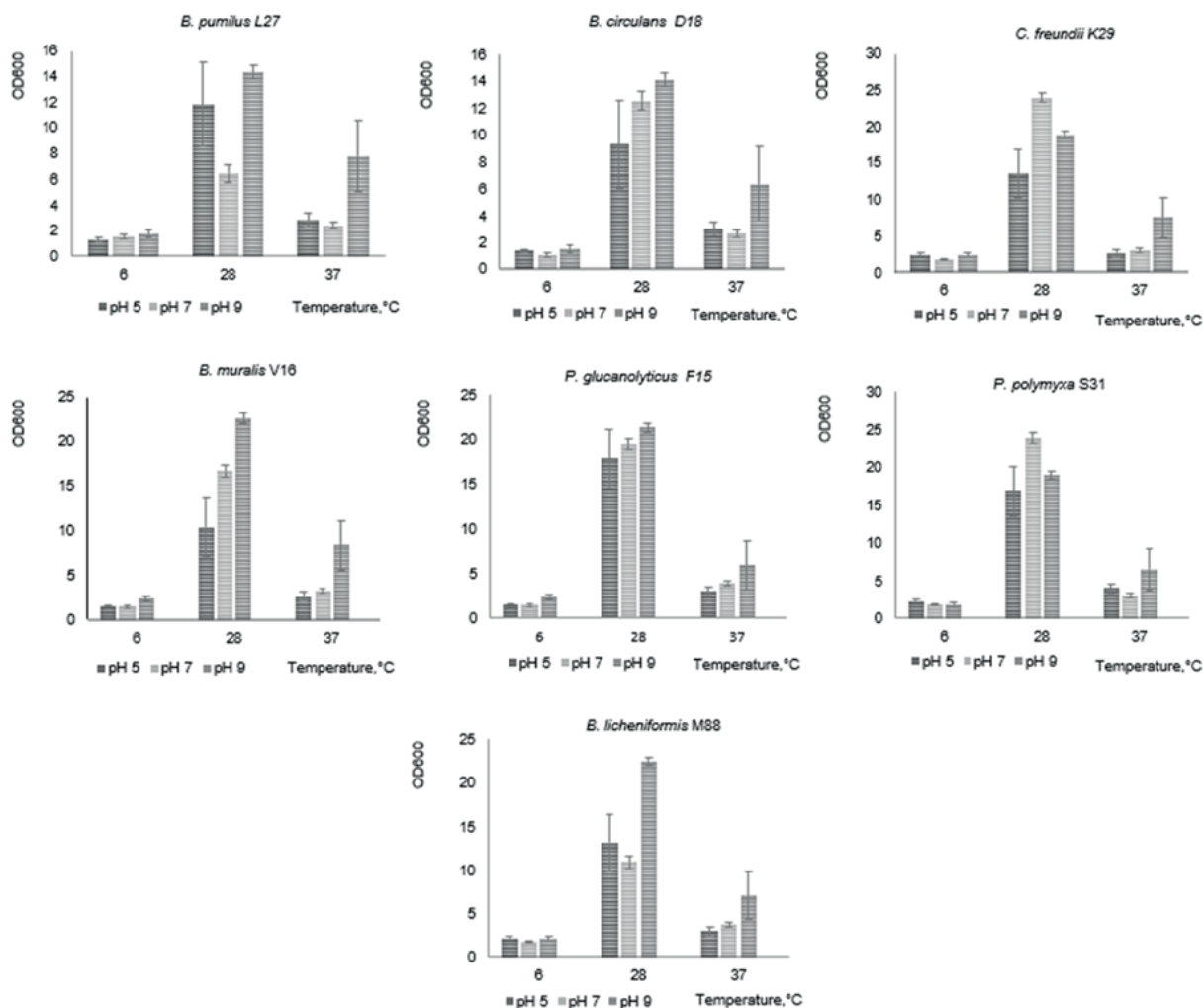


Рис. 4. Сравнение способности формирования биопленок штаммами углеводородокисляющих микроорганизмов при различных значениях pH и температуры

Fig. 4. Comparison of biofilm production by hydrocarbon-oxidizing strains at different temperatures and pH

### Заключение

В ходе работы был проведен микробиологический анализ почв, пробы которых отбирали с земельных участков сельскохозяйственного назначения с высоким уровнем нефтяного загрязнения.

В результате скрининга были отобраны культуры, проявившие углеводородокисля-

ющую способность. Наиболее устойчивыми к неблагоприятным абиотическим факторам среды оказались штаммы *B. pumilus* L27 и *C. freundii* K29, а наиболее широким субстратным спектром характеризовался штамм *P. polymyxa* S31, способный к деградации всех исследуемых субстратов. Оптимальное значение температуры, при котором наблюдалась максимальная продукция биопленок у всех



исследуемых штаммов бактерий, составило 28°C. *B. circulans* D18, *B. licheniformis* M88, *B. muralis* V16, *B. pumilus* L27, *P. glucanolyticus* F15 более эффективно формировали биопленки в щелочной среде (pH 9), штаммы *C. freundii* K29 и *P. polytuxa* S31 – в нейтральной среде (pH 7). Для изолятов *B. pumilus* L27 и *P. glucanolyticus* F15 было также отмечено формирование биопленки в кислой среде (pH 5).

Таким образом, на основании полученных результатов в качестве перспективного для конструирования биопрепарата может рассматриваться штамм *P. polytuxa* S31, использование которого возможно при загрязнении почв различными группами углеводородных субстратов в засоленных почвах при щелочных и нейтральных значениях pH.

### Список литературы

1. Freedman B. Oil pollution // Environmental Ecology. 1995. № 2. P. 159–188.
2. Teal J. M., Howarth R. W. Oil spill studies: A review of ecological effects // Journal of Environmental Management. 1984. № 8. P. 27–43.
3. Polyak Y. M., Bakina L. G., Chugunova M. V., Mayachkina N. V., Gerasimov A. O., Bure V. M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil // International Biodeterioration & Biodegradation. 2018. № 126. P. 57–68.
4. Pakova V., Hilscherova K., Feldmannova M., Bláha L. Toxic effects and oxidative stress in higher plants exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons and their N-heterocyclic derivatives // Environmental Toxicology and Chemistry. 2006. № 25. P. 3238–3245.
5. Smith H. M., Dunning H. N., Rall H. T., Ball J. S. Keys to the mystery of crude oil // Proceedings. 1959. Vol. 39. P. 433–465.
6. Chen M., Xu P., Zeng G., Yang C., Huang D., Zhang J. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs // Biotechnology Advances. 2015. № 33. P. 745–755.
7. Mambwe M., Kalebaila K. K., Johnson T. Remediation technologies for oil contaminated soil // Global Journal of Environmental Science and Management. 2021. № 7. P. 419–438.
8. Wang M., Chen S., Jia X., Chen L. Concept and types of bioremediation // Handbook of Bioremediation. Academic Press, 2021. P. 3–8. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00001-6>
9. Rahman K. S. M., Rahman T. J., Kourkoutas Y., Petsas I., Marchant R., Banat I. M. Enhanced bioremediation of n-alkane in petroleum sludge using bacterial consortium amended with rhamnolipid and micronutrients // Biore-source Technology. 2003. Vol. 90, № 2. P. 159–168.
10. Плешакова Е. В., Шешнев А. С., Герасимов О. А., Глинская Е. В., Голубев Д. М., Несцеркина Д. Д., Овечкина А. А. Геохимическая и микробиологическая индикация техногенной трансформации почв города Балаково (Саратовская область) // Трансформация экосистем. 2025. Т. 8, № 3 (30). С. 99–117. <https://doi.org/10.23859/estr-240514>
11. Fathepure B. Z. Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments // Frontiers in Microbiology. 2014. Vol. 5. P. 173.
12. Minzhen W., Mingzhu D., Yingjin Y. Bioengineering for the microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants // Bioengineering. 2023. Vol. 3, № 10. P. 347–355.
13. Chunyan X. The role of microorganisms in petroleum degradation: Current development and prospects // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 865. P. 500–514.
14. Топографическая карта Саратовской области. URL: <http://www.etomesto.ru/karta2026/?ysclid=lqet4k2zqb560884929> (дата обращения: 21.12.2023).
15. Макаров В. З., Пичугина Н. В., Чумаченко А. Н. Ландшафтное районирование Саратовской области. Карта. М 1:500 000 // Эколого-ресурсный атлас Саратовской области / под ред. В. С. Белова, Г. И. Худякова; Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Саратовской области; Роскартография. Саратов: ВТУ ГШ, 1996. С. 7.
16. Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.
17. Определитель бактерий Берджи: в 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1997. 368 с.
18. Хачатуров Э. Г., Поливанов Д. А., Уткин Д. В., Щербакова Н. Е., Уткин Е. Д., Голубев Д. М. Молекулярно-биологический анализ изменчивости эндофитных бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* при вертикальном и горизонтальном переносе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 7. С. 27–33. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.7.38>
19. UniProt. URL: <http://www.uniprot.org/> (дата обращения: 13.03.2024).
20. Беляков А. Ю., Плешакова Е. В. Скрининг микроорганизмов-деструкторов компонентов буровых растворов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13, вып. 4. С. 37–42.
21. Успанова Д. М., Мурзина Ю. И., Коробейникова А. С., Глинская Е. В., Нечаева О. В. Адаптация микроорганизмов-нефтедеструкторов к физико-химическим факторам внешней среды // Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания: тезисы докладов Второй Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2022. С. 92–94.
22. Тауыев С. Р., Kazemipour N., Hassanshahian M., Rokhbakhs-Zamin F., Khoshroo S. M. R. Microbial community response to biostimulation and bioaugmentation in crude oil-polluted sediments of the Persian Gulf: A microcosm simulation study // Environmental Research. 2024. Vol. 249. Art. 118197. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118197>



23. Adeniji A. O., Okoh O. O., Okoh A. I. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: A review // *Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 2017. P. 1–13.

## References

- Freedman B. Oil pollution. *Environmental Ecology*, 1995, no. 2, pp. 159–188.
- Teal J. M., Howarth R. W. Oil spill studies: A review of ecological effects. *Journal of Environmental Management*, 1984, no. 8, pp. 27–43.
- Polyak Y. M., Bakina L. G., Chugunova M. V., Mayachkina N. V., Gerasimov A. O., Bure V. M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, no. 126, pp. 57–68.
- Pakova V., Hilscherova K., Feldmannova M., Bláha L. Toxic effects and oxidative stress in higher plants exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons and their N-heterocyclic derivatives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, no. 25, pp. 3238–3245.
- Smith H. M., Dunning H. N., Rall H. T., Ball J. S. Keys to the mystery of crude oil. *Proceedings*, 1959, vol. 39, pp. 433–465.
- Chen M., Xu P., Zeng G., Yang C., Huang D., Zhang J. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs. *Biotechnology Advances*, 2015, no. 33, pp. 745–755.
- Mambwe M., Kalebaila K.K., Johnson T. Remediation technologies for oil contaminated soil. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2021, no. 7, pp. 419–438.
- Wang M., Chen S., Jia X., Chen L. Concept and types of bioremediation. *Handbook of Bioremediation*. Academic Press, 2021, pp. 3–8. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00001-6>
- Rahman K. S. M., Rahman T. J., Kourkoutas Y., Petsas I., Marchant R., Banat I. M. Enhanced bioremediation of n-alkane in petroleum sludge using bacterial consortium amended with rhamnolipid and micronutrients. *Bioresource Technology*, 2003, vol. 90, no. 2, pp. 159–168.
- Pleshakova E. V., Sheshnev A. S., Gerasimov O. A., Glinskaya E. V., Golubev D. M., Nesterkina D. D., Ovechkina A. A. Geochemical and microbiological indication of technogenic transformation of soils in the city of Balakovo (Saratov region). *Transformation of Ecosystems*, 2025, vol. 8, no. 3 (30), pp. 99–117 (in Russian). <https://doi.org/10.23859/estr-240514>
- Fatpure B. Z. Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments. *Frontiers in Microbiology*, 2014, vol. 5, pp. 173.
- Minzhen W., Mingzhu D., Yingjin Y. Bioengineering for the microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants. *Bioengineering*, 2023, vol. 3, no. 10, pp. 347–355.
- Chunyan X. The role of microorganisms in petroleum degradation: Current development and prospects. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 865, pp. 500–514.
- Topographic map of the Saratov Region* (in Russian). Available at: <http://www.etomesto.ru/karta2026/?ysclid=lqet4k2zqb560884929> (accessed December 21, 2023).
- Makarov V. Z., Pichugina N. V., Chumachenko A. N. Landscape zoning of the Saratov region. Map. M 1:500000. In: *Ekologo-resursnyi atlas Saratovskoi oblasti. Pod red. V. S. Belova, G. I. Khudyakova* [Belov V. S., Khudyakov G. I., eds. Ecological and Resource Atlas of the Saratov region. Environmental Protection Committee environment and natural resources of the Saratov region, Roskartografiya]. Saratov, VTU GS Publ., 1996, pp. 7 (in Russian).
- Netrusov A. I., Egorova M. A., Zakharchuk L. M. *Praktikum po mikrobiologii* [Practical training in microbiology]. Moscow, Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).
- Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Lippincott Williams & Wilkins, 1994. 787 p.
- Khachaturov E. G., Polivanov D. A., Utkin D. V., Shcherbakova N. E., Utkin E. D., Golubev D. M. Molecular biological analysis of the variability of endophytic bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* during vertical and horizontal transport. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*, 2024, no. 7, pp. 27–33 (in Russian). <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.7.38>
- UniProt*. Available at: <http://www.uniprot.org/> (accessed March 13, 2024).
- Belyakov A. Yu., Pleshakova E. V. Screening of microorganisms-destroyers of drilling mud components. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2013, vol. 13, iss. 4, pp. 37–42 (in Russian).
- Uspanova D. M., Murzina Yu. I., Korobeynikova A. S., Glinskaya E. V., Nechaeva O. V. Adaptation microorganisms-oil destructors to physico-chemical environmental factors. *Mechanisms of Adaptation of Microorganisms to Various Environmental Conditions: Abstracts of the Second All-Russ. sci. conf. with Intern. participation (Irkutsk, Feb. 28 – March 6, 2022)*. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2022, pp. 92–94 (in Russian).
- Tayyeb S. R., Kazemipour N., Hassanshahian M., Rokhbakhs-Zamin F., Khoshroo S. M. R. Microbial community response to biostimulation and bioaugmentation in crude oil-polluted sediments of the Persian Gulf: A microcosm simulation study. *Environmental Research*, 2024, vol. 249, art. 118197. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118197>
- Adeniji A. O., Okoh O. O., Okoh A. I. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: A review. *Journal of Chemistry*, 2017, vol. 2017, pp. 1–13.

Поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 20.11.2025  
The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 18.11.2025; accepted for publication 20.11.2025



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 100–109

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 100–109

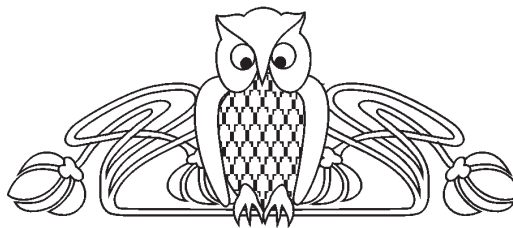
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-100-109>, EDN: RVLUTC

Научная статья

УДК 574.24: 615.322

## Сравнительный элементный анализ корней лопуха большого и одуванчика лекарственного



Н. А. Дьякова

Воронежский государственный университет, Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1

Дьякова Нина Алексеевна, доктор фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры фармацевтической технологии, [Ninotchka\\_V89@mail.ru](mailto:Ninotchka_V89@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0766-3881>

**Аннотация.** Урбанизация и антропогенная нагрузка ведут к трансформации экосистем и накоплению экотоксикантов, в том числе тяжелых металлов, в растениях. Лекарственные растения, такие как лопух большой (*Arctium lappa* L.) и одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.), широко применяются в медицине, но могут аккумулировать как эссенциальные, так и токсичные элементы. Целью исследования стало проведение сравнительного анализа макро- и микроэлементного состава корней лопуха большого и одуванчика лекарственного, произрастающих в естественном экотопе Воронежской области. Корни растений и пробы почвы отобраны на территории Воронежского государственного биосферного заповедника (экологически чистая зона). Пробоподготовка проводилась методом микроволнового кислотного разложения. Количественный анализ 59 элементов выполнялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Рассчитывался коэффициент биологического поглощения для оценки способности растений аккумулировать элементы из почвы. Корни лопуха большого – мощный концентратор с высокой биохимической активностью, избирательно накапливающий как полезные (калий, фосфор, цинк, медь), так и потенциально опасные (стронций, кадмий, олово) элементы, что является важным как для его лекарственного применения, так и для использования в качестве растения-индикатора. Корни одуванчика лекарственного имеют менее насыщенный минеральный состав, содержание элементов (19 мг/г) более чем в 2,5 раза ниже, чем в корнях лопуха большого, что указывает на иную стратегию минерального питания. Корни одуванчика лекарственного избирательно поглощают фосфор и кобальт, а также могут быть индикатором свинцового загрязнения. Полученные данные создают основу для разработки стандартизованных препаратов и обоснованного применения изученных видов в фитотерапии и нутрициологии.

**Ключевые слова:** Воронежская область, лопух большой, одуванчик лекарственный, *Taraxacum officinale* L., *Arctium lappa* L., элементный состав

**Для цитирования:** Дьякова Н. А. Сравнительный элементный анализ корней лопуха большого и одуванчика лекарственного // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 100–109. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-100-109>, EDN: RVLUTC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Comparative elemental analysis of roots of burdock and medicinal dandelion

N. A. Dyakova

Voronezh State University, 1 University Sq., Voronezh 394006, Russia

Nina A. Dyakova, [Ninotchka\\_V89@mail.ru](mailto:Ninotchka_V89@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0766-3881>

**Abstract.** Urbanization and human stress lead to ecosystem transformation and accumulation of ecotoxicants, including heavy metals, in plants. Medicinal plants such as large burdock (*Arctium lappa* L.) and medicinal dandelion (*Taraxacum officinale* L.) are widely used in medicine, but can accumulate both essential and toxic elements. The purpose of the study was to conduct a comparative analysis of the macro- and microelement composition of the roots of large burdock and medicinal dandelion, growing in the natural ecotope of the Voronezh region. Plant roots and soil samples were taken on the territory of the Voronezh State Biosphere Reserve (environmentally friendly zone). Sample preparation was carried out by microwave acid decomposition. Quantitative analysis of 59 elements was performed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A biological uptake factor (BSC) was calculated to assess the ability of plants to accumulate elements from the soil. Large burdock root is a powerful concentrator with high biochemical activity, selectively accumulating both useful (potassium, phosphorus, zinc, copper) and potentially dangerous (strontium, cadmium, tin) elements, which is important both for its medicinal use and for use as an indicator plant. Dandelion medicinal roots have a less saturated mineral composition, the content of elements (19 mg/g)



is more than 2.5 times lower than in burdock of large roots, which indicates a different strategy of mineral nutrition. Medicinal dandelion roots selectively absorb phosphorus and cobalt, and can also be an indicator of lead contamination. The data obtained form the basis for the development of standardized drugs and the justified use of the studied species in herbal medicine and nutritionology.

**Keywords:** Voronezh region, large burdock, medicinal dandelion, *Taraxacum officinale* L., *Arctium lappa* L., elemental composition

**For citation:** Dyakova N. A. Comparative elemental analysis of roots of burdock and medicinal dandelion. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 100–109 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-100-109>, EDN: RVLUTC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Процесс урбанизации представляет собой одну из ключевых социально-экологических проблем современности. Расширение городов ведет к глубокой трансформации естественных экосистем на занятых и прилегающих территориях. В результате формируется принципиально новая, антропогенная среда, ключевой чертой которой является интенсивное техногенное воздействие. Это проявляется в изменении химического состава атмосферы, деградации почвенного покрова и загрязнении гидросферы. Повышение уровня загрязнения вызывает дестабилизацию природной среды, вынуждая живые организмы существовать на пределе своих адаптационных возможностей. Под антропогенным прессом происходит упрощение структуры растительных сообществ, сокращение видовых ареалов, уменьшение численности популяций в различных фитоценозах, а также изменение фитохимических и минеральных профилей растений [1–3].

Территория Воронежской области исторически относится к значимым агропромышленным регионам. Тем не менее, активная разработка полезных ископаемых, масштабное применение агрохимикатов, а также долгосрочные последствия аварии на Чернобыльской АЭС обострили проблему обеспечения пищевой и перерабатывающей промышленности безопасным и эффективным растительным сырьем. Низкокачественное сырье и произведенные из него продукты выступают одним из основных каналов поступления в организм человека различных химических элементов, включая токсичные [4–7]. Микроэлементы, аккумулируемые растениями, образуют с органическими биологически активными соединениями природные комплексы, биодоступность которых для человека существенно выше, чем у синтетических неорганических аналогов [8–10]. В связи с этим при оценке элементного состава лекарственного растительного сырья (ЛРС) особую

значимость приобретают виды, используемые для создания комплексных фитопрепаратов, где синергетический эффект достигается за счет взаимного усиления действия высокомолекулярных соединений и микроэлементов [11].

Неуклонный рост популярности ЛРС и препаратов на его основе обусловлен их доказанной терапевтической эффективностью в сочетании с высоким профилем безопасности и минимальным риском побочных реакций. При этом значительный объем заготавливаемых лекарственных растений приходится на Центральную Россию – регион с высокой плотностью населения, развитой промышленностью, густой транспортной сетью и интенсивным сельским хозяйством [12, 13]. В подобных условиях резко возрастает риск сбора сырья в зонах с неблагоприятной экологической обстановкой, что обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение влияния антропогенного загрязнения на химический состав растений. Известно, что помимо эссенциальных (жизненно необходимых) элементов, лекарственные растения способны аккумулировать тяжелые металлы [14–16].

Несмотря на общемировую тенденцию к детальному изучению элементного профиля, для многих регионов России, включая Центральное Черноземье, такие данные фрагментарны или отсутствуют. Существующие исследования носят выборочный характер и не дают системного представления о полном спектре минеральных веществ в местной лекарственной флоре, их концентрациях и закономерностях распределения, что необходимо для оценки сырьевой базы и ее экологической чистоты [12, 13]. Указанные факторы определяют настоятельную необходимость проведения комплексных исследований по определению макро- и микроэлементного состава лекарственных растений данного региона.

Лопух большой (*Arctium lappa* L.) является типичным синантропным и рудеральным видом, процветающим на антропогенно нарушенных территориях. Его естественный ареал ох-



ватывает умеренные зоны Евразии и Северной Америки, откуда он был интродуцирован и на другие континенты. Растение проявляет высокую экологическую толерантность, включая засухо- и морозоустойчивость. Его классические местообитания – пустыри, свалки, обочины дорог, заброшенные поля и берега водоемов [2, 12, 17]. Препараты корней лопуха большого стимулируют обмен веществ, проявляют диуретическое, потогонное, желчегонное, гепатопротекторное, противовоспалительное, иммуностимулирующее, гипогликемическое, гиполипидемическое действие. Лечебные свойства корней лопуха обусловлены их исключительно богатым и сложным химическим составом, представляющим собой комплекс взаимодополняющих биогенных соединений. Корни лопуха большого содержат до 45% инулина и слизи, до 12,5% протеина, жирное масло (до 0,8% с преобладанием ненасыщенных жирных кислот (линолевая, линоленовая)), фенолкарбоновые кислоты (хлорогеновая, кофейная – до 1,3%), флавоноиды (до 2,3%) и лигнаны (арктиин), горькие вещества, фитостерины (ситостерин), эфирное масло, кумарины, витамины (группа В, С, Е, К), а также широкий спектр макро- (К, Са, Р, Mg) и микроэлементов (Fe, Zn, Se, Mn) [10, 12, 15, 17].

Одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* L.) является высокоадаптивным синантропным полиморфным видом. Его ареал охватывает практически все регионы России и стран СНГ, за исключением экстремальных природных зон: арктических тундр, засушливых пустынь. Хорошо развивается на нарушенных и трансформированных местообитаниях. Способность активно заселять слабодренированные территории и положительно реагировать на дигрессию растительных сообществ делает его пионерным видом, подготавливающим условия для последующих сукцессионных стадий [3, 13, 17]. Корень одуванчика лекарственного накапливает широкий спектр биологически активных соединений, состав и концентрация которых варьируются в зависимости от сезона вегетации. Доминирующим компонентом являются полисахарид инулин (до 40–45% осенью) и моносахара (фруктоза, глюкоза, до 18%). Содержат тритерпеновые сапонины (до 1,5%), обуславливающие противовоспалительное действие, а также фитостерины ( $\beta$ -ситостерин, стигмастерин), влияющие на липидный обмен.

Сесквитерпеновый лактон лактукопикрин и другие горечи ответственны за рефлекторное усиление секреции пищеварительных желез. Флавоноиды (до 1,1%) и гидроксикоричные кислоты (до 0,8%), проявляют антиоксидантную и противовоспалительную активность. Корни одуванчика лекарственного содержат протеины и аминокислоты (до 5%), каучук (до 3%), дубильные вещества (танины до 0,4%), слизи, смолы, воск, незначительное количество эфирного масла (до 0,3%) и жирного масла, витамины А, С, группы В (В1, В2, ниацин, никотинамид, холин), каротиноиды (лютеин, тараксантин), а также макро- (К, Са) и микроэлементы (Fe, Zn, Se, Mn, Cu) [18–21].

Корни лопуха обыкновенного и одуванчика лекарственного являются активными концентраторами тяжелых металлов и перспективными видами для фиторемедиации загрязненных почв, хотя их аккумуляционные способности различаются как по набору элементов, так и по интенсивности накопления [2–7, 10, 16].

Лопух обыкновенный обладает способностью аккумулировать в корнях свинец и кадмий, что подтверждено рядом исследований на примере Красноярского [4] и Алтайского [1] краев республики Северная Осетия [10] Российской Федерации, а также на примере республики Беларусь [5], республики Узбекистан [21] часто с многократным превышением ПДК (до 5,4 раза для свинца и 2,4 раза для кадмия вблизи автотрасс Красноярья [4]). Для корней лопуха большого характерно также накопление меди, хрома, кобальта, циркония и железа [2, 4, 6, 7, 10, 16]. В ряде исследований подчеркнута жесткая корреляция между содержанием элементов в почве и в растении, что, наряду с высокими показателями накопления, подтверждает его ремедиаторный потенциал в отношении широкого спектра поллютантов [6, 7, 10, 16].

Одуванчик лекарственный демонстрирует более сложную и дифференцированную картину накопления. Данные Е. О. Клинской [14] о большем накоплении свинца в листьях, чем в корнях, указывают на ведущую роль надземной части в фитоэкстракции. В то же время в разных (Минская область [5], Оренбургская область [16], Южная Фергана [21]) местах зафиксирована высокая накопительная способность корней одуванчика лекарственного в отношении марганца, цинка, меди, хрома, кобальта, олова, железа и алюминия. Корни одуванчика лекар-



ственного активно накапливают цинк, никель и медь, а особенно активно – кадмий [5]. Высокая корреляция с загрязнением почвы и широкий диапазон накопления делают одуванчик не только инструментом ремедиации, но и ценным биоиндикатором [14].

Сравнительный анализ И. Т. Караевой [10] на примере флоры Северной Осетии непосредственно показывает более высокое накопление в корнях лопуха большого свинца, кадмия и меди, а в корнях одуванчика лекарственного — марганца и цинка, что позволяет рассматривать их как взаимодополняющие виды в программах фиторемедиации для комплексной очистки почв от различных групп загрязнителей.

В связи с высокой и разнонаправленной аккумулярующей способностью рассматриваемых видов актуальной задачей является изучение полного элементного анализа корней лопуха большого и одуванчика лекарственного естественного экотопа Воронежской области с целью выявления аккумулярующих способностей в отношении всего спектра макро- и микро-элементов в местах возможной заготовки сырья.

*Цель исследования* – проведение сравнительного элементного анализа корней лопуха большого и одуванчика лекарственного естественного экотопа Воронежской области.

## Материалы и методы

Заготовку корней лопуха большого и одуванчика лекарственного проводили в соответствии с требованиями Государственной фармакопеи [22] на территории Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В. М. Пескова (Рамонский район Воронежской области). Выбор локации был обусловлен ее экологической чистотой – удаленностью от промышленных зон, крупных населенных пунктов и автомагистралей, что минимизирует риск химического загрязнения сырья.

Корни лопуха большого и одуванчика лекарственного заготавливали осенью (октябрь), очищали от остатков стеблей, листьев, тонких корней, отмывали от земли, разрезали на куски и высушивали. Для каждого эксперимента выбирали 5 опытных площадок. Для исследований использовали объединенные пробы. Каждая объединённая проба состояла из 5 точечных проб (не менее 200 г каждая). Проба расти-

тельного сырья для определения элементного состава выделялась методом квартования из объединенной пробы. Для каждого определения использовали 10,0 г измельченного испытуемого ЛРС [22]. Параллельно с заготовкой корней были отобраны пробы почвы с верхнего горизонта (0–20 см) с места произрастания для последующего сравнительного анализа. Отбор почвенных проб регламентировался ГОСТ Р 58595-2019 и производился по методу «конверта» с применением почвенного ножа.

Отобранные образцы растительного сырья подвергали кислотному разложению для перевода элементов в растворенную форму. Пробоподготовку выполняли с использованием системы микроволнового разложения. Навеску образца помещали во фторопластовый реактор, куда добавляли 5 мл смеси концентрированных азотной ( $\text{HNO}_3$ ) и плавиковой (HF) кислот. Процесс разложения проводили по программе, рекомендованной производителем оборудования. Полученный после разложения раствор количественно переносили в мерную пробирку на 15 мл, выполняя трехкратное смывание реактора деионизованной водой (порциями по 1 мл). Объем полученного раствора доводили до 10 мл той же водой. Для проведения анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой аликвотную часть раствора (1 мл) разбавляли в 10 раз 0,5% раствором азотной кислоты. Определение микроэлементного состава выполняли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре «ELAN-DRC» в соответствии с методическими указаниями МУК 4.1.1483-03. Для построения калибровочных графиков использовали серийные многоэлементные стандартные растворы («Perkin-Elmer»). Контроль правильности получаемых результатов осуществляли с помощью метода добавок [8, 9]. Все анализы выполняли в трехкратной повторности, после чего данные подвергали статистической обработке при доверительной вероятности  $p \leq 0,05$ .

Для анализа способности ЛРС накапливать химические элементы из почвы был рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП). Расчет проводили по формуле:

$$\text{КБП} = C_{\text{ЛРС}} / C_{\text{почва}},$$

где  $C_{\text{ЛРС}}$  – концентрация элемента в исследуемом растительном сырье;  $C_{\text{почва}}$  – концентрация соответствующего элемента в образце почвы, отобранной в месте произрастания [8, 9].

**Результаты и их обсуждение**

Исследование методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой позволило определить 59 элементов в корнях лопуха большого и одуванчика лекарственного, заготовленных в Воронежской области (таблица).

Общая масса учтенных микро- и макроэлементов в корнях лопуха большого (48 мг/г) существенно выше, чем в корнях одуванчика лекарственного (19 мг/г). Более высокая минерализация корней лопуха большого обеспечивается более высоким накоплением практически всего комплекса элементов, особенно макроэлементов.

**Накопление элементов ЛРС из почв***Table. Accumulation of elements by medicinal plant raw materials from soils*

Элемент / Element	Содержание, мкг/г / Content, µg/g			КБП / Biological absorption coefficient	
	Корни лопуха большого / Burdock big root	Корни одуванчика лекарственного / Dandelion medicinal roots	Почва / Soil	Корни лопуха большого / Burdock big root	Корни одуванчика лекарственного / Dandelion medicinal roots
Макроэлементы / Macrocells					
Ca	6605 ± 820	2415 ± 300	19660 ± 2440	0,34	0,12
K	31978 ± 3970	9226 ± 1145	10500 ± 1300	3,05	0,88
Mg	1896 ± 235	1109 ± 138	4400 ± 546	0,43	0,25
Na	3042 ± 378	911 ± 113	3300 ± 410	0,92	0,28
P	1977 ± 245	2478 ± 308	730 ± 91	2,71	3,39
Эссенциальные элементы / Essential elements					
Co	3,7 ± 0,46	4,3 ± 0,53	3,3 ± 0,41	1,13	1,29
Cr	3,1 ± 0,38	3,2 ± 0,40	4,2 ± 0,52	0,73	0,78
Cu	8,5 ± 1,05	5,3 ± 0,66	3,1 ± 0,38	2,73	1,69
Fe	509 ± 63	278 ± 34	19100 ± 2370	0,03	0,01
Li	0,92 ± 0,11	0,32 ± 0,04	8,50 ± 1,05	0,11	0,04
Mn	29 ± 3,6	20 ± 2,5	370 ± 46	0,08	0,05
Mo	0,8 ± 0,10	0,2 ± 0,02	0,9 ± 0,11	0,87	0,24
Ni	2,2 ± 0,27	1,0 ± 0,12	2,3 ± 0,29	1,00	0,45
Se	0,3 ± 0,04	0,2 ± 0,02	8,5 ± 1,05	0,04	0,03
Si	686 ± 85	2071 ± 257	347000 ± 32050	<0,01	0,01
V	3,2 ± 0,40	1,2 ± 0,15	78,0 ± 9,7	0,04	0,01
Zn	32,4 ± 4,0	29,5 ± 3,66	12,0 ± 1,5	2,70	2,46
Токсичные и малоизученные элементы / Toxic and poorly understood elements					
Ag	0,020 ± 0,0022	0,020 ± 0,0024	0,190 ± 0,024	0,09	0,11
Al	1036,8 ± 128,7	447,7 ± 55,6	31100 ± 3860	0,03	0,01
As	0,28 ± 0,035	0,13 ± 0,016	0,90 ± 0,11	0,31	0,14
Au	0,0020 ± 0,00025	0,0030 ± 0,00037	0,060 ± 0,0074	0,04	0,04
Ba	38,4 ± 4,77	9,7 ± 1,20	290,0 ± 36,0	0,13	0,03
Be	0,030 ± 0,0037	0,020 ± 0,0025	2,000 ± 0,248	0,01	0,01
Bi	0,0110 ± 0,0014	0,0050 ± 0,00051	0,110 ± 0,014	0,10	0,05
Cd	0,050 ± 0,0045	0,030 ± 0,0037	0,020 ± 0,0025	2,30	1,48
Ce	0,66 ± 0,082	0,46 ± 0,057	38,0 ± 4,7	0,02	0,01
Cs	0,080 ± 0,010	0,040 ± 0,0050	2,30 ± 0,29	0,03	0,02



Окончание таблицы / Continuation of the Table

Элемент / Element	Содержание, мкг/г / Content, µg/g			КБП / Biological absorption coefficient	
	Корни лопуха большого / Burdock big root	Корни одуванчика лекарственного / Dandelion medicinal roots	Почва / Soil	Корни лопуха большого / Burdock big root	Корни одуванчика лекарственного / Dandelion medicinal roots
Токсичные и малоизученные элементы / Toxic and poorly understood elements					
Dy	0,050 ± 0,0062	0,030 ± 0,0037	2,00 ± 0,25	0,03	0,02
Er	0,030 ± 0,0037	0,020 ± 0,0025	1,20 ± 0,15	0,02	0,01
Eu	0,0150 ± 0,0019	0,0070 ± 0,00087	0,650 ± 0,081	0,02	0,01
Ga	0,210 ± 0,026	0,150 ± 0,019	8,80 ± 1,09	0,02	0,02
Gd	0,070 ± 0,0087	0,050 ± 0,0062	3,00 ± 0,37	0,02	0,02
Ge	0,0210 ± 0,0026	0,0150 ± 0,0019	1,10 ± 0,14	0,02	0,01
Hf	0,0200 ± 0,0023	0,0200 ± 0,0021	1,60 ± 0,20	0,01	0,01
Hg	0,0050 ± 0,00061	0,0030 ± 0,00037	0,050 ± 0,0060	0,10	0,05
Ho	0,0100 ± 0,0012	0,0050 ± 0,00062	0,360 ± 0,045	0,03	0,01
La	0,350 ± 0,043	0,230 ± 0,029	18,00 ± 2,23	0,02	0,01
Lu	0,0040 ± 0,00050	0,0030 ± 0,00037	0,160 ± 0,020	0,03	0,02
Nb	0,082 ± 0,010	0,060 ± 0,0074	6,70 ± 0,83	0,01	0,01
Nd	0,330 ± 0,041	0,280 ± 0,035	15,0 ± 1,86	0,02	0,02
Pb	0,60 ± 0,074	2,00 ± 0,25	4,00 ± 0,50	0,15	0,49
Pr	0,080 ± 0,010	0,050 ± 0,0062	4,10 ± 0,51	0,02	0,01
Rb	7,40 ± 0,92	3,40 ± 0,42	63,0 ± 7,8	0,12	0,05
Sb	0,0200 ± 0,0020	0,0200 ± 0,0022	0,410 ± 0,051	0,05	0,05
Sc	0,620 ± 0,077	0,510 ± 0,063	50,0 ± 6,2	0,01	0,01
Sm	0,070 ± 0,0087	0,050 ± 0,0062	3,20 ± 0,40	0,02	0,01
Sn	2,86 ± 0,35	1,27 ± 0,16	1,20 ± 0,15	2,38	1,06
Sr	157,9 ± 19,6	17,10 ± 2,12	73,0 ± 9,1	2,16	0,23
Ta	0,0040 ± 0,00040	0,0040 ± 0,00050	0,500 ± 0,062	0,01	0,01
Tb	0,0100 ± 0,0012	0,0060 ± 0,00074	0,440 ± 0,055	0,02	0,01
Te	0,030 ± 0,0037	0,040 ± 0,0050	0,100 ± 0,012	0,33	0,41
Th	0,100 ± 0,012	0,070 ± 0,0087	5,40 ± 0,67	0,02	0,01
Ti	36,8 ± 4,57	26,6 ± 3,30	2400 ± 298	0,02	0,01
Tl	0,0150 ± 0,0019	0,0110 ± 0,0014	0,230 ± 0,029	0,07	0,05
Tm	0,0040 ± 0,00040	0,0040 ± 0,00045	0,160 ± 0,020	0,03	0,03
U	0,070 ± 0,0087	0,020 ± 0,0020	1,20 ± 0,15	0,06	0,02
W	0,020 ± 0,0022	0,020 ± 0,0021	0,780 ± 0,097	0,03	0,03
Y	0,250 ± 0,031	0,170 ± 0,021	9,90 ± 1,23	0,03	0,02
Yb	0,020 ± 0,0020	0,020 ± 0,0021	1,10 ± 0,14	0,02	0,01
Zr	0,780 ± 0,097	0,610 ± 0,076	78,0 ± 9,7	0,01	0,01
Всего / In total	48063 ± 5965	19064 ± 2366	439370 ± 54520		



Корни лопуха большого демонстрируют высокую биологическую активность в отношении поглощения из почвы калия (КБП 3,05) и фосфора (КБП 2,71). Это делает их ЛРС ценным для человека источником этих макроэлементов. К сильно накапливаемым эссенциальным микроэлементам корнями лопуха большого относятся цинк (КБП 2,70) и медь (КБП 2,73). Выявлены высокая способность корней лопуха большого к поглощению некоторых условно-токсичных и малоизученных элементов – стронция (КБП 2,16), кадмия (КБП 2,30), олова (КБП 2,38), что является важным индикатором для фитомониторинга и указанием на необходимость осторожности при сборе сырья в загрязненных районах. Четко видна избирательность корней лопуха большого в поглощении многих других токсичных элементов (алюминий, железо, свинец, кремний, все редкоземельные элементы), для большинства из которых КБП менее 0,1, что свидетельствует о барьерной функции корня.

Корни одуванчика лекарственного проявляют более избирательную и, в целом, менее интенсивную способность к поглощению элементов по сравнению с корнями лопуха большого. Ключевая особенность аккумуляции элементов – высокое накопление из почв фосфора (КБП 3,39, что значительно выше, чем у лопуха большого). При этом калий поглощается практически на уровне почвенной концентрации (КБП 0,88). Корни одуванчика лекарственного хорошо концентрируют кобальт (КБП 1,29) и цинк (КБП 2,46). По большинству токсичных элементов (кадмий, мышьяк, ртуть, алюминий) показаны низкие КБП. Исключение составляет свинец, КБП которого корнями одуванчика лекарственного достигло 0,49. Данная особенность растения может быть использована для мониторинга свинцового загрязнения. Стоит также отметить, что у корней одуванчика лекарственного четко выражена барьерная функция для кальция, магния, железа, кремния и практически всех редкоземельных элементов (КБП 0,05).

Сравнительный анализ элементного состава корней лопуха большого и одуванчика лекарственного указывает на их разный минеральный профиль. Лопух большой – мощный аккумулятор, более активный участник круговорота веществ, извлекающий из почвы целый ряд элементов. Одуванчик лекарственный – очень

избирателен и концентрирует только некоторые элементы. У изучаемых видов ЛРС разная приоритетность в макроэлементах: лопух большой – аккумулятор калия, одуванчик лекарственный – фосфора. Из эссенциальных элементов оба вида накапливают цинк, корни лопуха большого выделяются высоким содержанием меди, одуванчика лекарственного – кобальта. В отношении токсичных элементов корни лопуха большого могут выступать индикаторами для мониторинга и фиторемедиации кадмия и стронция, одуванчика лекарственного – свинца. При этом оба растения блокируют поступление многих токсичных элементов (алюминий, железо, редкоземельные), но одуванчик делает это эффективнее.

Полученные результаты коррелируют с данными ряда авторов по аккумуляции способностям корней одуванчика лекарственного [5, 10, 14, 16, 21] и лопуха большого [4–7, 10, 16, 21], что указывает на их видовые особенности накопления ряд микроэлементов, в частности, токсичных.

## Заключение

Проведенное исследование, выполненное на территории Воронежской области, представляет собой комплексный сравнительный анализ элементного состава корней лопуха большого и одуванчика лекарственного. Установлено, что корни лопуха большого обладают более высокой общей минерализацией (48 мг/г), чем корни одуванчика (19 мг/г), что свидетельствует о большей интенсивности накопления элементов первым видом. Исследование доказало, что сырье, заготовленное в условиях естественного фитоценоза региона, характеризуется низким содержанием токсичных элементов, что гарантирует его безопасность и высокую минеральную ценность. Выявлены видовые особенности аккумуляции элементов: корни лопуха большого активно накапливают калий (КБП 3,05) и медь (КБП 2,73), корни одуванчика лекарственного – фосфор (КБП 3,39) и кобальт (КБП 1,29). Оба вида эффективно накапливают цинк (КБП 2,70 и 2,46 соответственно).

Подтверждена высокая аккумуляционная способность корней лопуха большого в отношении кадмия (КБП 2,30), стронция (КБП 2,16) и олова (КБП 2,38). Корни одуван-



чика лекарственного проявляют склонность к накоплению свинца (КБП 0,49), что подтверждает его репутацию биоиндикатора. Важно, что оба вида демонстрируют надежную барьерную функцию, блокируя поступление большинства токсичных (Al, Fe, As) и редкоземельных элементов, причем у одуванчика эта барьерная функция выражена сильнее. Полученные данные подтверждают возможность использования лопуха большого в фиторемедиации почв, загрязненных кадмием и стронцием, а одуванчика лекарственного – свинцом.

Работа восполняет пробел в системных данных о полном элементном спектре лекарственной флоры Центрального Черноземья, коррелируя с результатами исследований по другим регионам (Красноярский край, Беларусь, Северная Осетия) и подтверждая видовые особенности накопления элементов.

#### Список литературы

1. Гравель И. В., Шойхет Я. Н., Яковлев Г. Н., Самылина И. А. Фармакогнозия. Экотоксиканты в лекарственном растительном сырье и фитопрепаратах. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2013. 304 с.
2. Дьякова Н. А. Накопление тяжелых металлов и мышьяка лекарственным растительным сырьем лопуха обыкновенного // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 478–487. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-4-478-487>
3. Дьякова Н. А. Особенности накопления тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье одуванчика лекарственного, собранного в урбо- и агробиоценозах Воронежской области // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2021. Т. 24, № 3. С. 49–55. <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-03-07>
4. Ефремов А. А., Шаталина Н. В., Стрижова Е. Н., Первышина Г. Г. Влияние экологических факторов на химический состав некоторых дикорастущих растений Красноярского края // Химия растительного сырья. 2002. № 3. С. 53–56.
5. Позняк С. С. Содержание некоторых тяжелых металлов в растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 1 (13). С. 123–137.
6. Кончина Т. А., Гузницева М. В. Влияние техногенного загрязнения на некоторые биологические характеристики рудеральных растений // Молодой ученый. 2015. № 23, ч. 2 (103). С. 118–122.
7. Кириенко Н. Н., Терлеева П. С., Первышина Г. Г. Влияние автотранспортного загрязнения биотопа на биохимическую активность *Arctium lappa* и *Plantago major* // Вестник КрасГАУ. 2009. № 7 (34). С. 70–72.
8. Дьякова Н. А. Изучение минерального комплекса корней лопуха обыкновенного // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2022. Т. 21, № 1. С. 175–180. <https://doi.org/10.37903/vsgma.2022.1.23>
9. Дьякова Н. А. Исследование минерального комплекса корней одуванчика лекарственного // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2022. Т. 21, № 2. С. 171–176. <https://doi.org/10.37903/vsgma.2022.2.23>
10. Караева И. Т., Хмелевская А. В., Черчесова С. К. Результаты определения минерального состава инулинсодержащих растений, произрастающих в РСО-Алания // Известия Горского государственного аграрного университета. 2016. Т. 53, ч. 3. С. 133–136.
11. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Пиш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека. М. : Медицина, 1991. 496 с.
12. Дьякова Н. А. Особенности накопления биологически активных веществ в корнях лопуха обыкновенного синантропной флоры Воронежской области // Традиционная медицина. 2021. № 2 (65). С. 47–52. [https://doi.org/10.54296/18186173\\_2021\\_2\\_47](https://doi.org/10.54296/18186173_2021_2_47)
13. Дьякова Н. А. Особенности накопления биологически активных веществ в корнях одуванчика лекарственного синантропной флоры Воронежской области // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2020. Т. 19, № 4. С. 158–163.
14. Клинская Е. О. Оценка загрязнения окружающей среды Биробиджана по содержанию свинца в одуванчике лекарственном (*Taraxacum officinale*) // Региональные проблемы. 2005. № 6-7. С. 73–76.
15. Струпан Е. А., Тупсина Н. Н., Струпан О. А. Химический состав дикорастущего лекарственного сырья, произрастающего в Красноярском крае // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 1. С. 124–126.
16. Васильева Т. Н., Брудастов Ю. А. Потенциальные фитоаккумуляторы металлов-поллютантов урбанизированных почв города Оренбурга // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 6 (125). С. 142–146.
17. Куркин В. А. Фармакогнозия. 2-е изд., перераб. и доп. Самара : ООО «Офорт», 2007. 1239 с.
18. Лукашов Р. И., Гурина Н. С. Одуванчик лекарственный. Часть 2. Фармакологические свойства // Рецепт. 2019. Т. 22, № 2. С. 259–265.
19. Тигунцева Н. П., Каницкая Л. В., Естафьев С. Н., Ушаков И. А. Пектиновые полисахариды корней одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg) // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 1243–1247.



20. Кароматов И. Д., Давлатова М. С. Лечебные свойства лекарственного растения одуванчик // Биология и интегративная медицина. 2018. № 9 (26). С. 145–164.
  21. Игамбердиева П. К., Мамаджанов Б. С., Саидхаматова Н. Г. Исследование количества микроэлементов лекарственных растений Южной Ферганы и перспективы их применения при лечении железодефицитной анемии // Современная медицина: актуальные вопросы : сб. ст. по материалам XLIV–XLV междунар. науч.-практ. конф. № 6-7 (41). Новосибирск : СибАК, 2015. С. 80–87.
  22. Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. XIV. Т. 4. М. : ФЭМБ, 2018. 1834 с.
- ### References
1. Gravel' I. V., Shoikhet Ya. N., Yakovlev G. N., Samylna I. A. *Farmakognosiya. Ekotoksikanty v lekarstvennom rastitel'nom syr'e i fitopreparatakh* [Pharmacognosy. Ecotoxicants in medicinal plant materials and herbal preparations]. Moscow, GEOTAR-Media, 2013. 304 p. (in Russian).
  2. Dyakova N. A. Accumulation of heavy metals and arsenic with medicinal herbal raw material of common shovel harvested in Voronezh region. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 478–487 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-4-478-487>
  3. D'yakova N. A. Features of the accumulation of heavy metals and arsenic in the medicinal plant material of common dandelion collected in urban and agrobiocenoses of the Voronezh region. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 49–55 (in Russian). <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-03-07>
  4. Efremov A. A., Shatalina N. V., Strizheva E. N., Pervyshina G. G. The influence of environmental factors on the chemical composition of some wild plants of the Krasnoyarsk Territory. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2002, no. 3, pp. 53–56 (in Russian).
  5. Poznyak S. S. Content of some heavy metals in the vegetation of field and meadow agrophytocenoses under conditions of technogenic soil pollution. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2011, no. 1 (13), pp. 123–137 (in Russian).
  6. Konchina T. A., Guznishcheva M. V. The influence of technogenic pollution on some biological characteristics of ruderal plants. *Young Scientist*, 2015, no. 23, pt 2 (103), pp. 118–122 (in Russian).
  7. Kirienko N. N., Terleeva P. S., Pervyshina G. G. Influence of motor vehicle biotope pollution on the biochemical activity of *Arctium lappa* and *Plantago major*. *The Bulletin of KSAU*, 2009, no. 7 (34), pp. 70–72 (in Russian).
  8. D'yakova N. A. Study of the mineral complex of common burdock roots. *Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 175–80 (in Russian). <https://doi.org/10.37903/vsgma.2022.1.23>
  9. D'yakova N. A. Investigation of the mineral complex of common dandelion roots. *Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 171–176 (in Russian). <https://doi.org/10.37903/vsgma.2022.2.23>
  10. Karaeva I. T., Khmylevskaya A. V., Cheresova S. K. Results of determining the mineral composition of inulin-containing plants growing in the Republic of North Ossetia-Alania. *Izvestiya of the Gorsk State Agrarian University*, 2016, vol. 53, pt 3, pp. 133–136 (in Russian).
  11. Avtsyn A. P., Zhavoronkov A. A., Rish M. A., Strochkova L. S. *Mikroelementozy cheloveka* [Human Microelementoses]. Moscow, Meditsina, 1991. 496 p. (in Russian).
  12. D'yakova N. A. Features of the accumulation of biologically active substances in the roots of common burdock of the synanthropic flora of the Voronezh region. *Traditional Medicine*, 2021, no. 2 (65), pp. 47–52 (in Russian). [https://doi.org/10.54296/18186173\\_2021\\_2\\_47](https://doi.org/10.54296/18186173_2021_2_47)
  13. D'yakova N. A. Features of the accumulation of biologically active substances in the roots of common dandelion of the synanthropic flora of the Voronezh region. *Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 158–163 (in Russian).
  14. Klinskaya E. O. Assessment of environmental pollution of Birobidzhan by lead content in medicinal dandelion (*Taraxacum officinale*). *Regional'nye problemy*, 2005, no. 6-7, pp. 73–76 (in Russian).
  15. Strupan E. A., Tipsina N. N., Strupan O. A. Chemical composition of wild medicinal raw materials growing in the Krasnoyarsk Territory. *The Bulletin of KSAU*, 2008, no. 1, pp. 124–126 (in Russian).
  16. Vasil'eva T. N., Brudastov Yu. A. Potential phytoaccumulators of metals-half-soils of urbanized soils of the city of Orenburg. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2011, no. 6 (125), pp. 142–146 (in Russian).
  17. Kurkin V. A. *Farmakognosiya. 2-e izd. perer. i dop.* [Pharmacognosy. 2nd ed., revised and expanded]. Samara, OOO "Ofort" Publ., 2007. 1239 p. (in Russian).
  18. Lukashov R. I., Gurina N. S. Common dandelion. Part 2. Pharmacological properties. *Prescripton*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 259–265 (in Russian).
  19. Tiguntseva N. P., Kanitskaya L. V., Estaf'ev S. N., Ushakov I. A. Pectic polysaccharides of common dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg) roots. *Fundamental Research*, 2013, no. 10, pp. 1243–1247 (in Russian).

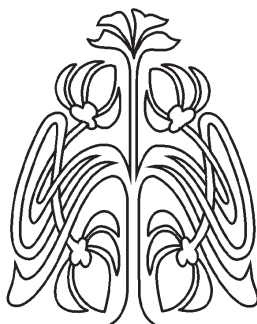


20. Karomatov I. D., Davlatova M. S. Medicinal properties of the dandelion medicinal plant. *Biology and Integrative Medicine*, 2018, no. 9 (26), pp. 145–164 (in Russian).
21. Igamberdieva P. K., Mamadzhanov B. S., Saidakhmadova N. G. Study of the number of trace elements of medicinal plants in South Fergana and the prospects for their use in the treatment of iron deficiency anemia. *Sovremennaya meditsina: aktual'nye voprosy: sb. st. po materialam XLIV–XLV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Medicine: Current Issues: Coll. of arts based on the materials of the 44<sup>th</sup>–45<sup>th</sup> Intern. sci. and pract. conf.]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2015, no. 6-7 (41), pp. 80–87 (in Russian).
22. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiiskoi Federatsii. XIV izd. T. 4* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation. 14th ed. Vol. 4]. Moscow, Federal Electronic Medical Library Publ., 2018. 1834 p. (in Russian).

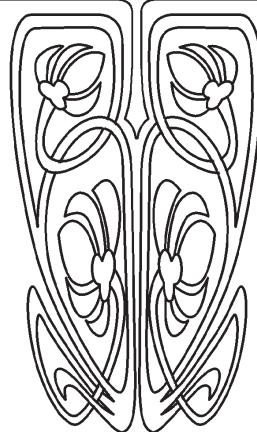
Поступила в редакцию 29.12.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 20.02.2026  
The article was submitted 29.12.2025; approved after reviewing 19.02.2026; accepted for publication 20.02.2026



## PERSONALIA



ПРИЛОЖЕНИЕ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 110–116

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 110–116

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-110-116>

EDN: UPWHVB

Персоналии

УДК 631.527(092)

### Научное наследие профессора В. С. Тырнова. К 85-летию со дня рождения

О. И. Юдакова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Юдакова Ольга Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой генетики, [yudakovaoi@info.sgu.ru](mailto:yudakovaoi@info.sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1391-6803>

**Аннотация.** В статье приводится краткий обзор научного наследия профессора В. С. Тырнова (1941–2015) – одного из ведущих специалистов в области биологии и генетики систем репродукции растений. Его исследования внесли весомый вклад в развитие представлений о закономерностях и механизмах гаплоидии. Им разработан ряд оригинальных технологий получения гаплоидных растений в условиях *in vivo* и *in vitro*, созданы уникальные линии кукурузы с наследуемой и ненаследуемой (индуцированной) формами партеногенеза.

**Ключевые слова:** гаплоидия, партеногенез, андрогенез, гаплоиндукция, апомиксис, культура клеток *in vitro*, кукуруза

**Для цитирования:** Юдакова О. И. Научное наследие профессора В. С. Тырнова. К 85-летию со дня рождения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 110–116. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-110-116>, EDN: UPWHVB

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Personalia

Scientific heritage of professor V. S. Tyrnov. On his 85th birthday anniversary

O. I. Yudakova

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Olga I. Yudakova, [yudakovaoi@info.sgu.ru](mailto:yudakovaoi@info.sgu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1391-6803>

**Abstract.** The article is a brief overview of the scientific heritage of professor V. S. Tyrnov (1941–2015). He was one of the leading scientists in the field of biology and genetics of plant reproduction. His research has made a significant contribution to the understanding of reasons for and mechanisms of haploidy. V. S. Tyrnov was an author of original haploid production technologies *in vivo* and *in vitro*. He created unique corn lines with heritable and non-heritable (induced) forms of parthenogenesis.

**Keywords:** haploidy, parthenogenesis, androgenesis, haploid-induction, apomixis, *in vitro*, corn

**For citation:** Yudakova O. I. Scientific heritage of professor V. S. Tyrnov. On his 85th birthday anniversary. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 110–116 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-110-116>, EDN: UPWHVB

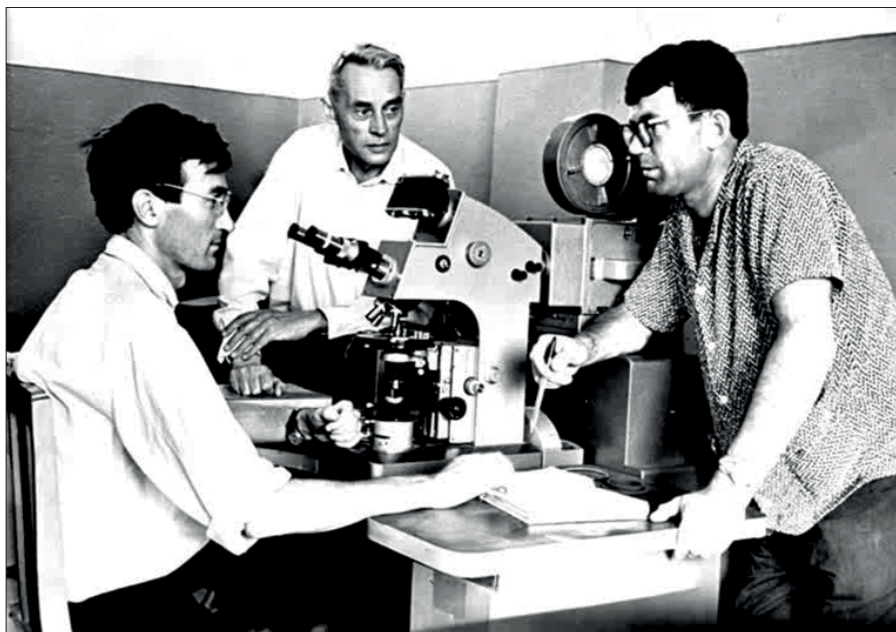
This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



В этом году исполнилось бы 85 лет со дня рождения Валерия Степановича Тырнова (27.02.1941–06.12.2015) – заведующего кафедрой генетики Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского, одного из ведущих специалистов в области генетики систем репродукции растений, апомиксиса, партеногенеза, гаплоидии, андрогенеза и клеточных технологий. Направления научной деятельности В. С. Тырнова были столь разнообразны, что в рамках журнальной статьи можно кратко обозначить лишь основные составляющие его научного наследия, которое, несомненно, заслуживает изучения, применения и развития.

В. С. Тырнов родился 27 февраля 1941 г. в г. Петровске Саратовской области в семье рабочих. Раннее детство он провел на Дальнем Востоке. В годы Великой Отечественной войны его отец работал рыбаком на Камчатке и Сахалине. После войны семья неоднократно меняла место жительства. В первый класс В. С. Тырнов пошел в Астрахани, затем были Анадырь, Баку и Саратов, где он окончил школу № 17. В юности

Валерий Степанович мечтал стать писателем и даже сделал попытку поступить в Московский литературный институт, но представленная на конкурс повесть не пришлась по душе приемной комиссии, которая сочла, что в рукописи недостаточно идеологической составляющей. Возвращаясь из Москвы в Саратов, он все еще надеялся реализовать свои способности на литературном поприще, но случайная встреча в поезде с юной попутчицей, увлеченно рассказывающей о «запрещенной» науке генетике, оказалась для Валерия Степановича судьбоносной. Вернувшись домой, он решает поступить в Саратовский государственный университет, но теперь уже не на филологический факультет, а на биологический, чтобы заниматься возрождающейся у нас в стране и такой интересной генетикой. Еще одним судьбоносным событием стала для него встреча с профессором Сергеем Спиридоновичем Хохловым – талантливым ученым и замечательным человеком, возглавлявшим в то время кафедру генетики и дарвинизма СГУ.



С. С. Хохлов со своими учениками В. С. Тырновым (слева) и В. А. Лавровским (справа)

Sergey S. Khokhlov with his students Valery S. Tyrnov (left) and Vadim A. Lavrovsky (right)

В 1960 г. по инициативе С. С. Хохлова при кафедре была создана лаборатория цитологии и генетики. Ее коллектив в основном составили перспективные выпускники кафедры, которые самоотверженно, с неиссякаемым эн-

тузиазмом молодых жаждали заниматься научной работой. В. С. Тырнов пришел работать в лабораторию ещё будучи студентом и очень скоро стал её негласным лидером. Оценив по достоинству незаурядные способности, эру-



дицию и неиссякаемую тягу к знаниям своего ученика, С. С. Хохлов фактически передаёт ему руководство лабораторией, а после защиты в 1970 г. кандидатской диссертации «Генетическое исследование гаплоидии у кукурузы» официально назначает заведующим.

Постепенно под руководством С. С. Хохлова и при активном участии В. С. Тырнова складывается оригинальная научная школа по биологии и генетике систем репродукции, которая получает признание в нашей стране и за рубежом. После скоропостижного ухода из жизни С. С. Хохлова в 1974 г. 33-летний Валерий Степанович вынужден взять на себя научное руководство проводимых в лаборатории исследований. В. С. Тырнов не только сохраняет широкий диапазон научных направлений, но и успешно их развивает. В 1986 г. он защищает докторскую диссертацию на тему «Экспериментальная гаплоидия у цветковых растений». С 1988 г. на протяжении 27 лет возглавляет кафедру генетики СГУ и осуществляет научное руководство отделом генетики и репродуктивной биологии Ботанического сада СГУ, в который со временем была реорганизована лаборатория цитологии и генетики.

Одним из главных направлений исследований для Валерия Степановича становится изучение гаплоидии у растений. Гаплоиды (организмы с одинарным, гаметическим, набором хромосом) являются ценным исходным материалом для селекции, на их основе можно быстро, за 1–2 года, создавать гомозиготные линии, аллоплазматические и мутантные формы для различных селекционных целей [1, 2]. Спонтанное образование гаплоидов происходит с очень низкой частотой (1 на 1000 и даже 1 на 10000 растений), поэтому для практического использования гаплоидии крайне важен поиск путей повышения ее частоты. Изучение закономерностей и механизмов этого явления имеет большое теоретическое значение для решения вопросов эволюции геномов, генетической детерминации пола, половых и неполовых систем репродукции и др. Проводимые под руководством В. С. Тырнова исследования генетических, физиолого-биохимических и эмбриологических особенностей гаплоидных растений в условиях *in vivo* и *in vitro* внесли весомый вклад в теорию репродуктивной биологии и разработку новых методов селекции и биотехнологии.

В. С. Тырновым была обоснована концепция ненаследуемых (индуцированных) и наследуемых форм гаплоидии, предложена оригинальная классификация партеногенеза [3]. На основе ненаследуемой формы гаплоидии разработана высокоэффективная технология массового получения гаплоидов для селекционных целей [4]. Созданы линии-гаплоиндукторы кукурузы (ЗМС, ЗМС-8, ЗМСП), использование которых в качестве отцовского родителя приводит к образованию в первом поколении гаплоидов с высокой частотой [5, 6]. Для облегчения диагностики гаплоидов в линии-гаплоиндукторы были введены доминантные маркерные гены, причем не только окраски зародыша и эндосперма, как у аналоговых линий, но и гены окраски вегетативных частей растения. Это позволяет по внешним морфологическим признакам выявлять гаплоиды на разных стадиях развития: от семени до взрослого растения. Полученные коллективом Валерия Степановича линии существенно превосходят своих аналогов по эффективности гаплоиндукции и другим ценным качествам: засухоустойчивости, пониженной полегаетости, густоте метёлки (что особенно важно, поскольку растения в скрещиваниях используются как опылители). Разработанная технология была высоко оценена специалистами и успешно применяется в настоящее время в России и за рубежом. Лицензия на неё в 1998 г. была куплена одной из семеноводческих фирм Франции.

Под руководством В. С. Тырнова была создана не имеющая аналогов коллекция линий кукурузы с наследуемой формой партеногенеза (АТ-1, АТ-3, АПО, АТТМ и др.). Средняя частота появления в потомстве матроклинных гаплоидов у них составляет 10–15% [6, 7]. В коллекции представлены партеногенетические линии с разными типами ЦМС, а также линии, маркированные рецессивными генами, позволяющими по морфологическим признакам проводить быстрый и эффективный отбор гаплоидных растений. Уникальность линий заключается в том, что они могут быть использованы как специфические эмбриомутанты для решения разных вопросов генетики, биохимии и физиологии репродуктивных процессов.

Было установлено, что линии, склонные к партеногенезу, характеризуются повышенной частотой появления не только матроклинных, но и андрогенных гаплоидов. Андрогенез – крайне редкое явление, при котором в оплодотворенной яйцеклетке ее ядро дегенерирует,



в результате чего у развивающегося зародыша остается только отцовский ядерный геном [8]. Партеногенетические линии могут служить индукторами андрогенеза при использовании их в скрещиваниях в качестве материнских родителей [9]. Это открывает возможность быстрого получения аллоплазматических форм, или ядерно-плазменных гибридов, имеющих ядро отцовской формы и материнскую цитоплазму [9, 10]. По проблеме андрогенеза В. С. Тырновым была написана обстоятельная обзорная работа, которая до настоящего времени остается единственным научным обзором по данной проблеме [11].

Большое внимание В. С. Тырнов уделял изучению систем репродукции в условиях *in vitro*. В возглавляемой им лаборатории впервые в СССР были получены гаплоидные растения в культуре пыльников табака, перца, пшеницы и тритикале, на основании чего были созданы ценные линии андроклиного происхождения [12–14]. Выявлены факторы, позволяющие получать в стерильной культуре стабильную регенерацию у пшеницы, ячменя, сорго, трипсакума, коикса, кукурузы [14–17]. Разработаны методы клонального микроразмножения трудно размножающихся традиционными способами ценных древесных пород (скуппии, бобовника и др.) [18]. По разным проблемам культуры *in vitro* возглавляемые им кафедра и лаборатория длительное время были крупным научно-методическим центром, в котором проходили стажировку специалисты из научных и селекционных учреждений республик СССР (стран СНГ) и многих городов России.

В 1989 г. на Международном эмбриологическом конгрессе В. С. Тырнов был удостоен медали имени С. Г. Навашина за разработку нового научного направления – эмбриогенетики растений [19]. Работы в этой области стали возможными благодаря предложенным сотрудниками лаборатории ускоренным методам эмбриологического анализа [20]. Приготовление препаратов зародышевых мешков с помощью ферментативной мацерации семязачатков позволило в сотни и тысячи раз повысить эффективность работ по изучению влияния генетических и паратипических факторов на различные эмбриологические признаки, процессы и явления. Была изучена структура женского гаметофита ряда культурных и дикорастущих видов растений, особенности эмбриогенеза при амфиксисе и апомиксисе, установлены

закономерности изменчивости женского гаметофита в условиях *in vitro* и *in vivo* [21, 22]. Прикладной аспект этих работ заключается в поиске путей целенаправленного изменения структурно-функциональной организации зародышевых мешков для индукции явлений, имеющих селекционное значение (гаплоидии, полиплоидии, апомиксиса и др.).

Новые ускоренные методы цитозембриологического анализа дали возможность перейти на популяционно-эмбриологический уровень изучения апомиксиса (размножения семенами без оплодотворения) у растений. С целью выявления новых апомиктических видов (потенциальных доноров генетических факторов апомиксиса) сотрудниками лаборатории и кафедры была проведена широкомасштабная диагностика способа размножения природных популяций цветковых [23]. В ходе многочисленных экспедиций в разные районы нашей страны (от Кавказа до Камчатки) был собран обширный гербарный и эмбриологический материал, установлены особенности проявления апомиксиса



В. С. Тырнов с коллегами А. Н. Завалишиной (слева) и О. В. Гуторовой на Третьей Международной конференции по апомиксису (Германия, 2007)  
Valery S. Tyrnov with colleagues Alexandra N. Zavalishina (left) and Olga V. Gutorova at Third International Conference on Apomixis (Germany, 2007)



на популяционном и эмбриологическом уровнях. Только в семействе злаков было изучено более 100 видов и впервые зарегистрирован апомиксис у 18 из них [24].

В начале 2000-х гг. Валерий Степанович возобновил инициированные С. С. Хохловым в 1970-х гг. работы по магнитобиологии. В результате проведенных экспериментов было установлено, что воздействие на семена и проростки низкочастотным магнитным полем вызывает увеличение митотической активности клеток апикальных меристем. Показано, что данная стимуляция приводит к значительному увеличению урожайности ряда ценных сельскохозяйственных культур [25].

В последние годы В. С. Тырнов был увлечен идеей создания на основе пурпурных форм кукурузы неограниченного нетрадиционного источника сырья для получения натуральных пищевых красителей и фармакологических препаратов (биофлавоноидов). Были отобраны семь кукурузы, нерасщепляющиеся по пурпурной окраске, на основе которых выведены новые линии и сорт «Пурпурная Саратовская» [26]. Установлено, что пищевой краситель, получаемый из кукурузы, обладает антимикробной активностью против стафилококка, синегнойной и кишечной палочек [27].

Признанием работ коллектива, возглавляемого В. С. Тырновым, явилась организация и проведение на базе кафедры и лаборатории ряда крупных научных мероприятий: Первого съезда Вавиловского общества генетиков и селекционеров России (1994), Международного симпозиума «Апомиксис у растений: состояние проблемы и перспективы исследований» (1994), III Международной школы для молодых учёных «Эмбриология, генетика и биотехнология» (2009).

Результаты проведенных В. С. Тырновым исследований изложены в 300 научных трудах. Его разработки удостоены Золотой медали ВДНХ (1989), Серебряной медали Салона изобретений, инноваций и инвестиций (2005), а изобретательская деятельность отмечена знаком «Изобретатель СССР». За успешную преподавательскую, научную и организационную деятельность ему были присвоены звания «Почетный работник высшего образования России», «Почетный профессор СГУ».

Под руководством В. С. Тырнова защищено 12 кандидатских и 3 докторские диссертации. Длительное время Валерий Степанович был ко-

ординатором научного направления «Генетика систем размножения растений», входящего в Координационный план ГКНТ СССР, вице-президентом Вавиловского общества генетиков и селекционеров РФ, председателем его Поволжского отделения, членом Головного совета Минвуза РФ «Биологические науки и технологии», членом секции «Генетика сельскохозяйственных растений» РАСХН, членом Научного совета по проблемам генетики и селекции РАН.

Валерий Степанович обладал огромной эрудицией, был человеком справедливым и бескомпромиссным, полным новых идей, всегда готовым оказать поддержку своим ученикам и коллегам. Его неординарное мышление являлось для них образцом в решении сложных научных проблем. Ему были чужды уныние и пессимизм. Он обладал тонким чувством юмора, и поэтому на традиционных Новогодних капустниках биологического факультета мог с удовольствием из солидного профессора перевоплотиться в милого кота Леопольда, турецкого султана и незабываемую Донну Розу, проявляя при этом незаурядное актерское мастерство. «Человек рождается ради радости творчества», – считал Валерий Степанович. – «Творчество – вот что делает человека человеком! Творчество приближает простых смертных, уязвимых, живущих столь краткий век, к Творцу. Творчество преображает мир и людей» [28, с. 269].

#### Список литературы

1. Тырнов В. С. Использование гаплоидов в генетических исследованиях // Гаплоидия и селекция / отв. ред. В. А. Крупнов. М. : Наука, 1976. С. 140–151.
2. Тырнов В. С. Гаплоидия у растений: научное и прикладное значение. М. : Наука, 1998. 53 с. (Серия «Чтения памяти академика Н. И. Вавилова»).
3. Тырнов В. С. Партеногенез // Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции : в 3 т. / ред. Т. Б. Батыгина. Т. 3. Системы репродукции. СПб. : Мир и семья, 2000. С. 158–165.
4. А. с. № 921138. Способ получения матроклиных гаплоидов у кукурузы / В. С. Тырнов, А. Н. Завалишина. Заяв. 19.11.1980. Оpubл. 14.12.1981.
5. Тырнов В. С., Завалишина А. Н. Индукция высокой частоты возникновения матроклиных гаплоидов у кукурузы // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276, № 3. С. 735–738.
6. Тырнов В. С. Гаплоидия и апомиксис // Репродуктивная биология, генетика и селекция : сб. науч. тр., посвящ. 90-летию со дня рождения С. С. Хохлова / отв. ред. Н. А. Шишкинская. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2002. С. 32–46.



7. Тырнов В. С., Еналеева Н. Х. Автономное развитие зародыша и эндосперма у кукурузы // Докл. АН СССР. 1983. Т. 272, № 3. С. 722–725.
8. Тырнов В. С., Хохлов С. С. Андрогенез у покрытосеменных растений // Генетика. 1974. Т. 10, № 9. С. 154–167.
9. Демихова Д. С., Смолькина Ю. В., Тырнов В. С. Получение полиэмбрионных андрогенных гаплоидов кукурузы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13, вып. 4. С. 46–48.
10. Эльконин Л. А., Тырнов В. С. Генетический контроль цитоплазматической мужской стерильности растений: состояние проблемы и современные подходы для ее исследования // Генетика. 2000. Т. 36. С. 437–450.
11. Тырнов В. С. Андрогенез *in vivo* у растений // Биология развития и управление наследственностью / под ред. В. А. Струнникова. М. : Наука, 1986. С. 138–164.
12. Суханов В. М., Клочков В. П., Хохлов С. С., Тырнов В. С. Использование культуры пыльников для получения гаплоидов // Культура клеток растений / под ред. Р. Г. Бутенко. Киев : Наук. думка, 1978. С. 412–314.
13. А. с. № 1036306. Способ получения растений из пыльцы в культуре пыльников / В. М. Суханов, В. С. Тырнов, Н. Н. Салтыкова. Заяв. 01.04.1981. Оpubл. 22.04.1983.
14. А. с. № 1054941. Способ получения растений / Н. Д. Папазян, В. М. Суханов, В. С. Тырнов. Заяв. 01.04.1981. Оpubл. 15.06.1983.
15. Нестеров А. Ю., Суханов В. М., Тырнов В. С. Регенерация растений из каллусных тканей *Coix* sp. // Физиология растений. 1981. Т. 28, № 1. С. 212–215.
16. Эльконин Л. А., Тырнов В. С., Папазян Н. Д., Ишин А. Г. Морфогенез и стабильная регенерация растений в каллусных культурах, полученных из зрелых зародышей видов *Sorghum* (Poaceae) // Бот. журн. 1989. Т. 74, № 12. С. 1740–1746.
17. Алаторцева Т. А., Тырнов В. С. Влияние питательной среды и генотипа на морфогенез в культуре зрелых зародышей кукурузы // Бюл. Бот. сада Саратов. ун-та. 2008. Вып. 7. С. 179–183.
18. Timofeeva S. N., Elkonin L. A., Tyrnov V. S. Micropropagation of *Laburnum anagyroides* Medic. through axillary shoot regeneration // *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*. 2014. Vol. 50, № 5. P. 561–567.
19. Тырнов В. С. Эмбриогенетика растений // Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции : в 3 т. / ред. Т. Б. Батыгина. Т. 3. Системы репродукции. СПб. : Мир и семья, 2000. С. 389–392.
20. Еналеева Н. Х., Тырнов В. С., Хохлов С. С. Выделение зародышевых мешков покрытосеменных растений путем мацерации тканей // Цитология и генетика. 1972. Т. 6, № 5. С. 439–441.
21. Еналеева Н. Х., Тырнов В. С. Гаметофитные мутации // Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции : в 3 т. / ред. Т. Б. Батыгина. Т. 3. Системы репродукции. СПб. : Мир и семья, 2000. С. 378–384.
22. Тырнов В. С., Шишкинская Н. А., Юдакова О. И. Структурная изменчивость зрелых женских гаметофитов злаков // Докл. РАЕН. 2000. № 2. С. 44–48.
23. Хохлов С. С., Зайцева М. И., Куприянов П. Г. Выявление апомиктических форм во флоре цветковых растений СССР: Программа, методика, результаты. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 224 с.
24. Шишкинская Н. А., Юдакова О. И., Тырнов В. С. Популяционная эмбриология и апомиксис у злаков. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2004. 145 с.
25. Пат. РФ № 2332841. Способ стимуляции митотической активности клеток растений / Ю. А. Беляченко, А. Д. Усанов, В. С. Тырнов, Д. А. Усанов. Заяв. 25.04.2007. Оpubл. 10.09.2008.
26. Пат. РФ на селекционное достижение № 9732. Кукуруза Пурпурная Саратовская / А. С. Пархоменко, В. С. Тырнов, Ю. В. Смолькина, Н. В. Апанасова, О. Л. Госенова, О. В. Гуторова, А. Ю. Колесова, Л. П. Лобанова. Заяв. 05.09.2016. Оpubл. 11.07.2018.
27. Полуконова Н. В., Райкова С. В., Дурнова Н. А., Наволокин Н. А., Курчатова М. Н., Тырнов В. С. Антимикробная активность экстракта антоциановой формы кукурузы *Zea mays* L. при разных способах получения // Проблемы медицинской микологии. 2014. Т. 16, № 2. С. 115.
28. Микулина С. Элемент бесконечности. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2012. 529 с.

## References

1. Tyrnov V. S. Use of haploids in genetic research. In: *Gaploidiya i selektsiya. Otv. red. V. A. Krupnov* [Krupnov V. A., ed. Haploidy and Selection]. Moscow, Nauka, 1976, pp. 140–151 (in Russian).
2. Tyrnov V. S. *Gaploidiya u rasteniy: nauchnoye i prikladnoye znachenije* [Haploidy in plants: Scientific and applied significance]. *Seriya "Chteniyu pamyati akademika N. I. Vavilova"* [Series "Readings in memory of Academician N. I. Vavilov"]. Moscow, Nauka, 1998. 53 p. (in Russian).
3. Tyrnov V. S. Parthenogenesis. *Embriologiya tsvetkovykh rasteniy. Terminologiya i kontseptsii: v 3 t. Red. T. B. Batygina. T. 3. Sistemy reproduksii* [Batygina T. B., ed. Plant Embryology. Terminology and Concepts: in 3 vols. Vol. 3. Reproduction Systems]. St. Petersburg, Mir i semya, 2000, pp. 158–165 (in Russian).
4. A. s. no. 921138. *Method for obtaining matroclinal haploids in corn*. V. S. Tyrnov, A. N. Zavalishina. Statement 19.11.1980. Published 14.12.1981 (in Russian).
5. Tyrnov V. S., Zavalishina A. N. Induction of a high frequency of occurrence of matroclinal haploids in maize. *Doklady AN SSSR*, 1984, vol. 276, no. 3, pp. 735–738 (in Russian).



6. Tyrnov V. S. Haploidy and apomixis. In: *Reproduktivnaya biologiya, genetika i selektsiya: sb. nauch. tr., posvyashch. 90-letiyu so dnya rozhdeniya S. S. Khokhlova*. Otv. red. N. A. Shishkinskaya [Shishkinskaya N. A., ed. Reproductive biology, genetics and selection: Coll. of sci. papers dedicated to the 90th anniversary of S. S. Khokhlov birth]. Saratov, Saratov State University Publ., 2002, pp. 32–46 (in Russian).
7. Tyrnov V. S., Enaleeva N. Kh. Autonomous development of the embryo and endosperm in corn. *Doklady AN SSSR*, 1983, vol. 272, no. 3, pp. 722–725 (in Russian).
8. Tyrnov V. S., Khokhlov S. S. Androgenesis in angiosperms. *Genetika*, 1974, vol. 10, no. 9, pp. 154–167 (in Russian).
9. Demikhova D. S., Smolkina Yu. V., Tyrnov V. S. Obtaining polyembryonic androgenic haploids of maize. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2013, vol. 13, iss. 4, pp. 46–48 (in Russian).
10. Elkonin L. A., Tyrnov V. S. Genetic control of cytoplasmic male sterility in plants: State of the problem and modern approaches to its study. *Genetika*, 2000, vol. 36, pp. 437–450 (in Russian).
11. Tyrnov V. S. Androgenesis *in vivo* in plants. *Biologiya razvitiya i upravleniye nasledstvennostyu. Pod red. V. A. Strunnikova* [Strunnikov V. A., ed. Developmental biology and heredity control]. Moscow, Nauka, 1986, pp. 138–164 (in Russian).
12. Sukhanov V. M., Klochkov V. P., Khokhlov S. S., Tyrnov V. S. Using anther culture to obtain haploids. In: *Kultura kletok rastenij. Pod red. R. G. Butenko* [Butenko R. G., ed. Plant cell culture]. Kyiv, Nauk. dumka, 1978, pp. 412–314 (in Russian).
13. A.s. no. 1036306. *Method for obtaining plants from pollen in anther culture*. V. M. Sukhanov, V. S. Tyrnov, N. N. Saltykova. Statement 01.04.1981. Published 22.04.1983 (in Russian).
14. A.s. no. 1054941. *Method for obtaining plants*. N. D. Papazyan, V. M. Sukhanov, V. S. Tyrnov. Statement 01.04.1981. Published 15.07.1983 (in Russian).
15. Nesterov A. Yu., Sukhanov V. M., Tyrnov V. S. Plant regeneration from callus tissues of *Coix* sp. *Fiziologiya rasteniy*, 1981, vol. 28, no. 1, pp. 212–215 (in Russian).
16. Elkonin L. A., Tyrnov V. S., Papazyan N. D., Ishin A. G. Morphogenesis and stable regeneration of plants in callus cultures obtained from mature embryos of *Sorghum* species (Poaceae). *Botanicheskii zhurnal*, 1989, vol. 74, no. 12, pp. 1740–1746 (in Russian).
17. Alatorseva T. A., Tyrnov V. S. Influence of nutrient medium and genotype on morphogenesis in the cult of mature corn embryos. *Bulletin of the Botanical Garden of Saratov University*, 2008, iss. 7, pp. 179–183 (in Russian).
18. Timofeeva S. N., Elkonin L. A., Tyrnov V. S. Micropropagation of *Laburnum anagyroides* Medic. through axillary shoot regeneration. *In vitro Cellular and Developmental Biology-plant*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 561–567.
19. Tyrnov V. S. Plant Embryogenetics. *Embriologiya tsvetkovykh rasteniy. Terminologiya i kontseptsii: v 3 t. Red. T. B. Batygina. T. 3. Sistemy reproduksii* [Batygina T. B., ed. Embryology of flowering plants. Terminology and concepts: in 3 vols. Vol. 3. Reproduction systems]. St. Petersburg, Mir i semya, 2000, pp. 389–392 (in Russian).
20. Enaleeva N. Kh., Tyrnov V. S., Khokhlov S. S. Isolation of embryo sacs of angiosperms by tissue maceration. *Tsitologiya i genetika*, 1972, vol. 6, no. 5, pp. 439–441 (in Russian).
21. Enaleeva N. Kh., Tyrnov V. S. Gametophytic mutations. *Embriologiya tsvetkovykh rastenii. Terminologiya i kontseptsii: v 3 t. Red. T. B. Batygina. T. 3. Sistemy reproduksii* [Batygina T. B., ed. Embryology of flowering plants. Terminology and concepts: in 3 vols. Vol. 3. Reproduction systems]. St. Petersburg, Mir i semya, 2000, pp. 378–384 (in Russian).
22. Tyrnov V. S., Shishkinskaya H. A., Yudakova O. I. Structural variability of mature female gametophytes of cereals. *Doklady RAEN*, 2000, no. 2, pp. 44–48 (in Russian).
23. Khokhlov S. S., Zaitseva M. I., Kupriyanov P. G. *Vyyavleniye apomiktichnykh form vo flore tsvetkovykh rasteniy SSSR: Programma, metodika, rezul'taty* [Identification of apomictic forms in the flora of flowering plants of the USSR: Program, methods, results]. Saratov, Saratov State University Publ., 1978. 224 p. (in Russian).
24. Shishkinskaya N. A., Yudakova O. I., Tyrnov V. S. *Populyatsionnaya embriologiya i apomixis u zlakov* [Population embryology and apomixis in cereals]. Saratov, Saratov State University Publ., 2004. 145 p. (in Russian).
25. Patent RF no. 2332841. *Method for stimulating mitotic activity of plant cells*. Yu. A. Belyachenko, A. D. Usanov, V. S. Tyrnov, D. A. Usanov. Statement 25.04.2007. Published 10.09.2008 (in Russian).
26. Patent for selection achievement no. 9732. *Purple Saratov Corn*. A. S. Parkhomenko, V. S. Tyrnov, Yu. V. Smolkina, N. V. Apanasova, O. L. Gosenova, O. V. Gutorova, A. Yu. Kolesova, L. P. Lobanova. Statement 05.09.2016. Published 11.07.2018 (in Russian).
27. Polukonova N. V., Raikova S. V., Durnova N. A., Navolokin N. A., Kurchatova M. N., Tyrnov V. S. Antimicrobial activity of an extract of the anthocyanin form of corn *Zea mays* L. under different methods of production. *Problems in Medical Micology*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 115 (in Russian).
28. Mikulina S. *Element beskonechnosti* [Element of Infinity]. Saratov, Saratov State University Publ., 2012. 529 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.12.2025; принята к публикации 25.12.2025

The article was submitted 20.12.2025; accepted for publication 25.12.2025

ISSN 1816-9775

26001



9 771816 977503

ISSN 1816-9775 (Print). ISSN 2541-8971 (Online)  
Известия Саратовского университета. Новая серия.  
Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Том 26, выпуск 1

## ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА Новая серия

- Серия: Акмеология образования. Психология развития
- Серия: История. Международные отношения
- Серия: Математика. Механика. Информатика
- Серия: Науки о Земле
- Серия: Социология. Политология
- Серия: Физика
- Серия: Филология. Журналистика
- Серия: Философия. Психология. Педагогика
- Серия: Химия. Биология. Экология**
- Серия: Экономика. Управление. Право

