

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

# ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия



Серия Химия. Биология. Экология

2020

Том 20

Выпуск 4





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

# ИЗВЕСТИЯ

САРАТОВСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
Новая серия



Научный журнал  
2020 Том 20

ISSN 1816-9775 (Print)

ISSN 2541-8971 (Online)

Издается с 2005 года

## Серия Химия. Биология. Экология, выпуск 4

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

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Научный отдел

##### Химия

**Кострицкий А. Ю., Наконечникова М. Г., Федотова О. В., Пчелинцева Н. В.** Синтез и гетероциклизация 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-онов 362

**Мелихова Е. В., Фарафонова О. В.** Оптимизация условий определения 2,4-Д и дельтаметрина методом ВЭЖХ 372

**Сумина Е. Г., Решеникова И. С., Угланова В. З., Юрасов Н. А.** Хроматографическое определение мельдония с предварительным концентрированием методом твердофазной экстракции на наночастицах магнетита 378

**Руденко Д. А., Браташов Д. Н., Шиповская А. Б.** Изучение поверхности пленок хитозана и его солей с органическими кислотами методом атомно-силовой микроскопии 387

##### Биология

**Кайбелева Э. И., Архипова Е. А., Юдакова О. И., Воронин М. Ю.** Репродуктивная стратегия *Poa bulbosa* L. в степных сообществах Нижнего Поволжья 395

**Иванова А. В., Костина Н. В., Аристова М. А.** Зависимость таксономических параметров флор от размеров выборки 404

**Седельникова Л. Л., Воробьева И. Г.** Биологические особенности *Gladiolus hybridus* в связи с адаптацией в Сибирском регионе 417

**Ромодин Л. А.** Угнетение хлорофиллином хемилюминесценции, сопровождающей катализируемую комплексом цитохрома с с кардиолипином квазилипоксигеназную реакцию 427

**Хачатуров Э. Г., Коробко В. В.** Особенности роста зародышевой корневой системы *Triticum durum* Desf. сортов саратовской селекции 433

**Гончарова О. А., Зотова О. Е.** Комплексная оценка жизнеспособности и декоративности видов рода *Crataegus* L. в условиях Кольского Севера 438

##### Экология

**Дьякова Н. А.** Накопление тяжелых металлов и мышьяка лекарственным растительным сырьем полыни горькой 445

**Благовещенский И. В.** Растительность болота Брехово (Ульяновская область). Рекомендации по режиму охраны и использования 454

**Назаренко Н. Н., Малаев А. В., Пироженкова А. В., Байда Н. А.** Мозаичность естественных галофитных экосистем на границе лесостепной и степной зон Южного Урала 465

#### Приложение

##### Personalia

**Бурмистрова Н. А., Монахова Ю. Б.** Юбилей Светланы Петровны Муштаковой 477

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.

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 (специальности: 02.00.02; 02.00.03; 02.00.04; 03.01.02; 03.02.01; 03.02.04; 03.02.05; 03.02.08 (биологические науки))

Индекс издания в объединенном каталоге «Пресса России» 36013, раздел 30 «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Журнал выходит 4 раза в год

##### Директор издательства

Бучко Ирина Юрьевна

##### Редактор

Митенева Елена Анатольевна

##### Художник

Соколов Дмитрий Валерьевич

##### Редактор-стилист

Кочкаева Инна Анатольевна

##### Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

##### Технический редактор

Каргин Игорь Анатольевич

##### Корректор

Певная Татьяна Константиновна

##### Адрес учредителя, издателя

и издательства (редакции):

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

Тел.: (845-2) 51-45-49, 52-26-89

E-mail: izvestiya@info.sgu.ru

Подписано в печать 23.11.20.

Подписано в свет 30.11.20.

Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 13,95 (15,0).

Тираж 500 экз. Заказ 108-Т.

Цена свободная

Отпечатано в типографии  
Саратовского университета.

##### Адрес типографии:

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2020



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

## CONTENTS

### Scientific Part

#### Chemistry

**Kostritskiy A. Y., Nakonechnikova M. G., Fedotova O. V., Pchelintseva N. V.** Synthesis and Heterocyclization of 4-Hydroxy-3-((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl)(aryl)methyl)-2H-chromen-2-ones 362

**Melikhova E. V., Farafonova O. V.** Optimization of the Conditions for Determining 2,4-D and Deltamethrin by HPLC 372

**Sumina E. G., Reshetnikova I. S., Uglanova V. Z., Yurasov N. A.** Chromatographical analysis of meldonium with preliminary concentration by solid-phase extraction on magnetite nanoparticles 378

**Rudenko D. A., Bratashov D. N., Shipovskaya A. B.** Atomic force microscopy study of the surface of films of chitosan and its salts with organic acids 387

#### Biology

**Kaybeleva E. I., Arkhipova E. A., Yudakova O. I., Voronin M. Yu.** The *Poa bulbosa* L. Reproductive Strategy in the Steppe Phytocenoses of the Lower Volga Region 395

**Ivanova A. V., Kostina N. V., Aristova M. A.** Dependence of Taxonomic Flora Parameters on Sample Sizes 404

**Sedelnikova L. L., Vorobyova I. G.** Biological Features of *Gladiolus hybridus* in Connection with the Adaptation of the Siberian Region 417

**Romodina L. A.** Chlorophyllin Inhibits Chemiluminescence That Accompanies a Quasi-Hydroxygenase Reaction Catalyzed by the Cytochrome *c*-Cardiolipin Complex 427

**Hachaturov E. G., Korobko V. V.** The Features of Growth of the Primary Root System of *Triticum durum* Desf. Varieties of the Saratov Breeding 433

**Goncharova O. A., Zotova O. E.** Complex Assessment of the Viability and Decorativeness of Species of the Genus *Crataegus* L. in the Kola North Conditions 438

#### Ecology

**Dyakova N. A.** Accumulation of Heavy Metals and Arsenic by Medicinal Plant Raw Material of Bitter Hollow 445

**Blagovetshenskiy I. V.** Vegetation of the Bog Brekhovo (Ulyanovsk Region). Recommendations for Regime Security and Use 454

**Nazarenko N. N., Malaev A. V., Pirozhenkova A. V., Bayda N. A.** Patterns in Natural Halophytic Grasslands at the Border of Forest-Steppe and Steppe Zones of South Ural 465

### Appendices

#### Personalia

**Burmistrova N. A., Monakhova Yu. B.** The Jubilee of Svetlana Petrovna Mushtakova 477



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА  
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ.  
СЕРИЯ: Химия. Биология. Экология»**

**Главный редактор**

Шляхтин Геннадий Викторович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)

**Заместитель главного редактора**

Федотова Ольга Васильевна, доктор химических 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, профессор (Москва, Россия)  
Горячева Ирина Юрьевна, доктор химических наук, доцент (Саратов, Россия)  
Дыкман Лев Абрамович, доктор биологических 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)  
Золотухин Вадим Викторович, доктор биологических наук, доцент (Ульяновск, Россия)  
Кашин Александр Степанович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)  
Коннова Светлана Анатольевна, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)  
Кулагин Алексей Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ и Республики Башкортостан (Уфа, Россия),  
Кулиш Елена Ивановна, доктор химических наук, доцент (Уфа, Россия)  
Максимов Георгий Владимирович, доктор биологических наук, профессор (Москва, Россия)  
Никитина Валентина Евгеньевна, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)  
Опарин Михаил Львович, доктор биологических наук, профессор (Саратов, Россия)  
Позднякова Наталия Николаевна, доктор биологических наук (Саратов, Россия)  
Ревин Виктор Васильевич, доктор биологических наук, профессор (Саранск, Россия)  
Розенберг Геннадий Самуилович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН (Тольятти, Россия)  
Шиповская Анна Борисовна, доктор химических наук, доцент (Саратов, 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. NEW SERIES.  
SERIES: Chemistry. Biology. Ecology»**

**Editor-in-Chief** – Gennady V. Shlyakhtin (Saratov, Russia)

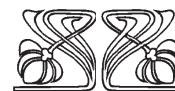
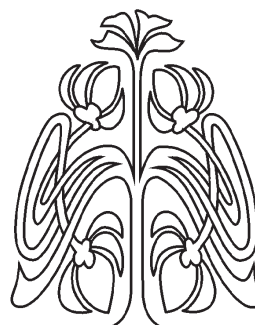
**Deputy Editor-in-Chief** – Olga V. Fedotova (Saratov, Russia)

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

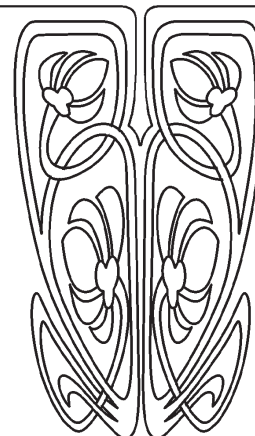
**Members of the Editorial Board:**

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)  
Irina Ju. Goryacheva (Saratov, Russia)  
Lev A. Dykman (Saratov, Russia)  
Galina A. Eroshenko (Saratov, Russia)  
Vladimir M. Zacharov (Moscow, Russia)  
Vadim V. Zolotuhin (Ulyanovsk, Russia)  
Alexandr S. Kashin (Saratov, Russia)  
Svetlana A. Konnova (Saratov, Russia)

Alexey Yu. Kulagin (Ufa, Russia)  
Elena I. Kulish (Ufa, Russia)  
Georgy V. Maksimov (Moscow, Russia)  
Valentina E. Nikitina (Saratov, Russia)  
Michail L. Oparin (Saratov, Russia)  
Natalia N. Pozdnyakova (Saratov, Russia)  
Viktor V. Revin (Saransk, Russia)  
Gennady S. Rozenberg (Toliatty, Russia)  
Anna B. Shipovskay (Saratov, Russia)  
Sergey N. Shtykov (Saratov, Russia)  
Sergey Ju. Shchyogolev (Saratov, Russia)  
Olga I. Yudakova (Saratov, Russia)



**РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ**





## ХИМИЯ

УДК 547.814.5

### Синтез и гетероциклизация 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-онов

А. Ю. Кострицкий, М. Г. Наконечникова, О. В. Федотова, Н. В. Пчелинцева

Кострицкий Александр Юрьевич, аспирант кафедры органической и биоорганической химии Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, alexandrkostritskiy@mail.ru

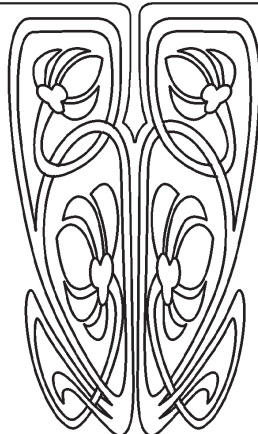
Наконечникова Марина Геннадьевна, студент кафедры органической и биоорганической химии Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, mnakonchnikova@mail.ru

Федотова Ольга Васильевна, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры органической и биоорганической химии Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Fedotova\_ov@rambler.ru

Пчелинцева Нина Васильевна, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры органической и биоорганической химии Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, PchelinzevaNV555@mail.ru



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



В данной работе показана возможность получения несимметричных 1,5-дикетонных на основе 4-гидрокси-2Н-хромен-2-она и димедона путём трехкомпонентной конденсации в присутствии L-пролина в качестве катализатора. В результате был получен ряд 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-онов с выходом от 25 до 73%. В ходе исследования выявлено, что наибольший выход отмечается для соединений, содержащих фрагменты орто-замещенных альдегидов, способных к образованию водородной связи. Для мета- и пара- замещенных – наблюдается наименьший выход. Вероятно, это объясняется стабилизацией промежуточного комплекса, в случае орто- замещения, двумя внутримолекулярными водородными связями, что позволяет селективно получать только один конечный продукт – 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-он. Строение полученных продуктов доказано с помощью ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ , HSQC, HMBC спектроскопии. Ввиду наличия 1,5-дикетонного фрагмента для вышеописанных соединений была предположена возможность их O-гетероциклизации в присутствии пропионового ангидрида. Кипячение 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-онов в среде ангидрида в течение часа привело к получению ряда 7-(арил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6Н,8Н-хромено[4,3-*b*]хромен-6,8-дионов. Их строение также подтверждено методами ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ , HSQC, HMBC спектроскопии.

**Ключевые слова:** 4-гидрокси-2Н-хромен-2-он, димедон, 1,5-дикетоны, гетероциклизация.

Поступила в редакцию: 18.08.2020 / Принята: 26.08.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-362-371>

#### Введение

Конденсированные гетероциклические соединения, такие как бензопираноны, представляют собой важный класс соединений, при-





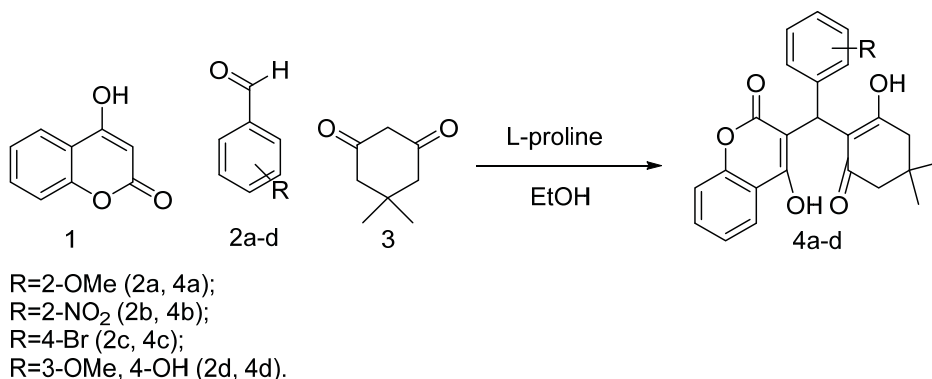
существующих во многих природных [1–5], а также синтетических соединениях [6–8], которые демонстрируют широкий спектр их биологической активности. Например, пирано[3,2-с]хромен-2-оны проявляют противогрибковую, инсектицидную, противоопухолевую, противовоспалительную и антибактериальную активности [9–13]. Известно также, что хроменоны обладают противораковой активностью, антианафилактической и противовоспалительной активностями [14–17].

В связи с этим разработка путей синтеза и изучение реакционной способности новых неизвестных 3-замещенных 4-гидрокси-2Н-хромен-2-онов, совмещающих в молекуле различные био-

логически активные фрагменты, синергетически усиливающие действие каждого из них, являются перспективной задачей в плане расширения их практических возможностей.

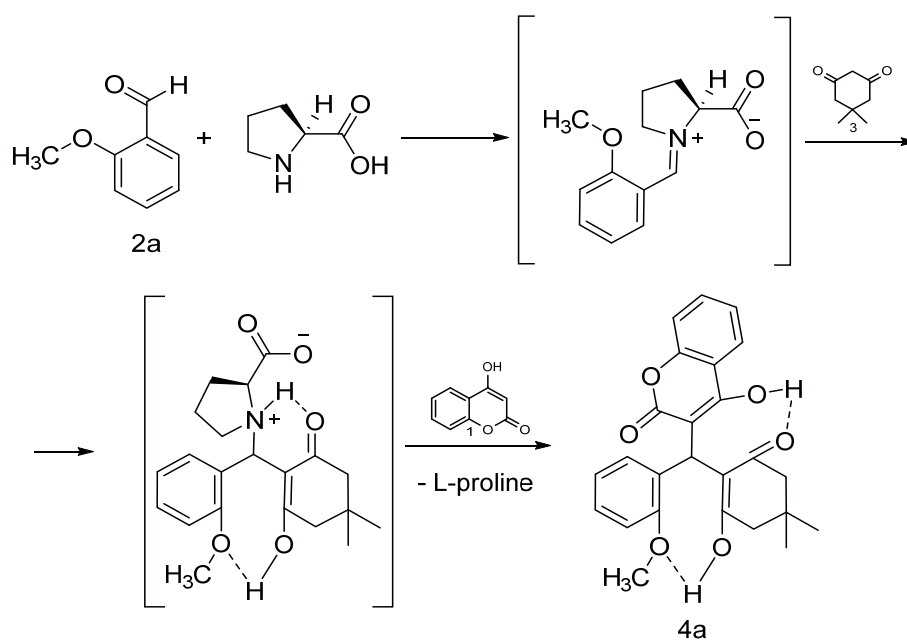
### Результаты и их обсуждение

Взаимодействие 4-гидрокси-2Н-хромен-2-она (1), альдегидов (2а-d) и димедона (3) осуществлялось в среде этилового спирта в присутствии L-пролина в качестве катализатора. Применение L-пролина позволило селективно получить гибридные продукты несимметричного строения, избегая конденсации в 3,3'-(арилметил)бис(4-гидрокси-2Н-хромен-2-оны).



Вероятный механизм образования 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2Н-хромен-2-онов (**4a-d**) включает в себя первоначальное взаимодействие ароматических альдегидов с L-пролином, что приводит к основаниям Шиффа, которые в дальнейшем реагируют с димедоном, в результате чего образуются промежуточные комплексы, вероятно,

стабилизированные двумя внутримолекулярными водородными связями. Атака комплекса молекулой 4-гидрокси-2Н-хромен-2-она (**1**) приводит к отщеплению катализатора и возвращению его в реакционную среду, а также к формированию конечных продуктов – 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-арил)метил)-2Н-хромен-2-онов (**4a-d**).





На примере продукта **4a** проведено методами ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ , HSQC, HMBC, NOESY спектроскопии подтверждение строения его структуры. Так, в сильном поле ЯМР  $^1\text{H}$  спектра наблюдаются: сигнал, принадлежащий протонам эквивалентных метильных групп при 1,17 м.д., синглеты при 2,36 и 2,45 м.д., относящиеся к протонам двух метиленовых звеньев димедонильного фрагмента. Метоксильная группа проявляется при 3,63 м.д., сигнал протона при узлом третичном атоме углерода расположен при 5,82 м.д. Сигналы восьми протонов двух ароматических колец расположены в области 6,83–7,99 м.д.

В слабopольной области спектра находятся два уширенных сингleta, принадлежащие двум протонам гидроксильных групп хроменоного и димедонильного фрагментов, их уширение, вероятно, вызвано образованием водородных связей (рис. 1). В двумерном корреляционном спектре HSQC наблюдается ключевой сигнал 5,82/31,60 м.д., принадлежащий узловому CH фрагменту, также проявляются сигналы двух неэквивалентных друг другу  $\text{CH}_2$  звеньев димедонильного фрагмента при 2,45/43,87 и 2,36/49,76 м.д. (рис. 2). Спектр HMBC подтверждает предложенную структуру для продукта **4a** (рис. 3).

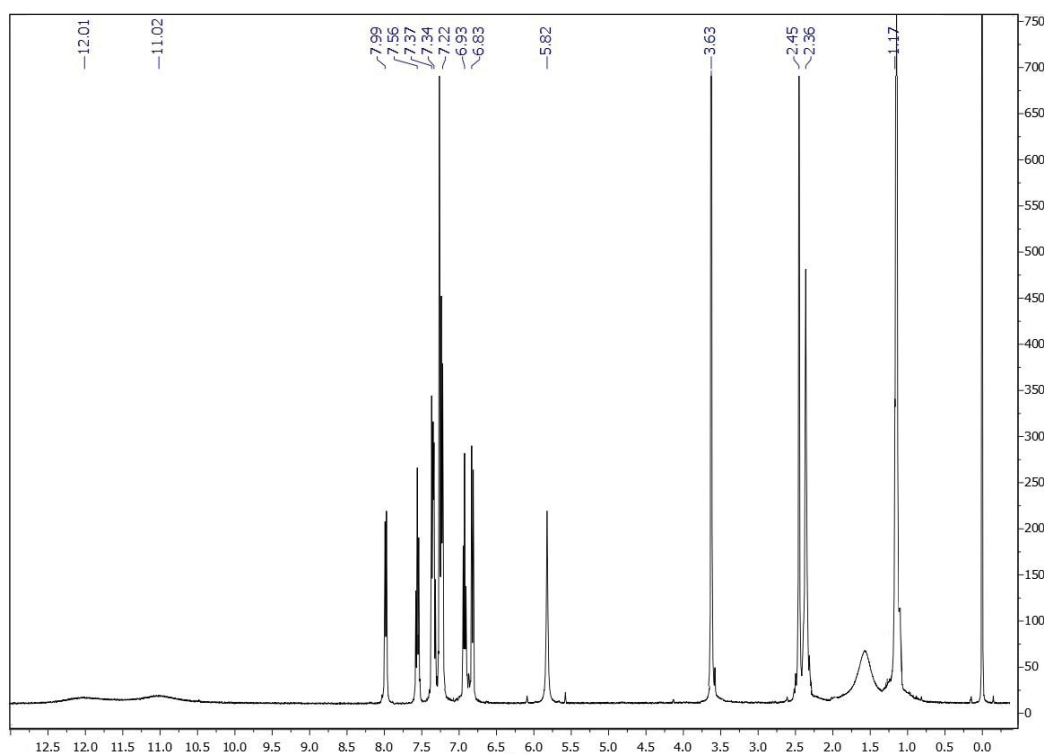


Рис. 1. ЯМР  $^1\text{H}$  спектр 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-метокси-фенил)метил)-2H-хромен-2-она (**4a**),  $\text{CDCl}_3$

Fig. 1. NMR  $^1\text{H}$  spectrum 4-hydroxy-3-((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl)(2-methoxyphenyl)methyl)-2H-chromen-2-one (**4a**),  $\text{CDCl}_3$

С целью расширить ряд гибридных димедонилхроменонов были проведены реакции с использованием 2-нитро-, 4-бром-, 3-метокси-4-гидроксибензальдегидов, которые протекали в аналогичных условиях. Результатом явилось выделение продуктов **4b-d**. Однако следует отметить резкое уменьшение выхода и увеличение времени реакции для продуктов **4c** и **4d** до 25–37% по сравнению с **4a,b**, выход которых составил 63–73%. Возможным фактором, повлекшим за собой уменьшение выхода и увеличение времени реакции, является отсутствие у альдегидов **2c,d**

заместителей в орто-положении, способных к образованию водородных связей, наличие которых, вероятно, является необходимым фактором образования стабильного промежуточного комплекса, представленного в механизме образования димедонилхроменонов **4a-d**. В ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ , HSQC, HMBC спектрах соединений **4b-d** наблюдается аналогия с таковыми для **4a**.

Наличие в соединениях **4a-d** оксогрупп в хроменоном и димедонильном фрагментах в 1,5-положениях относительно друг друга предполагало внутримолекулярную конденсацию

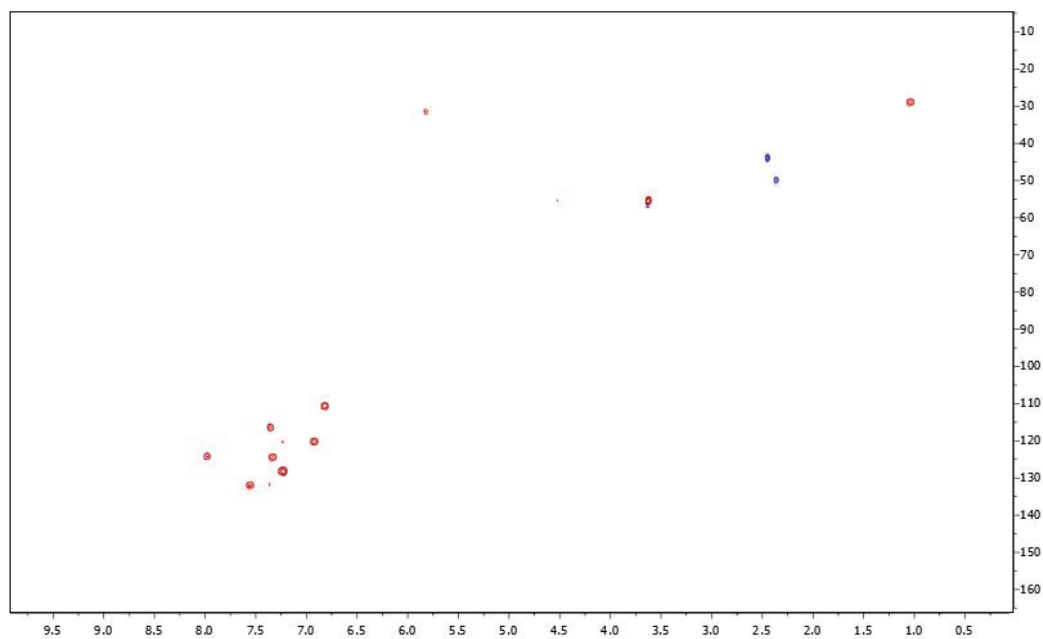


Рис. 2. HSQC спектр 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-метокси-фенил)метил)-2H-хромен-2-она (**4a**), CDCl<sub>3</sub>

Fig. 2. HSQC spectrum 4-hydroxy-3-((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl)(2-methoxyphenyl)methyl)-2H-chromen-2-one (**4a**), CDCl<sub>3</sub>

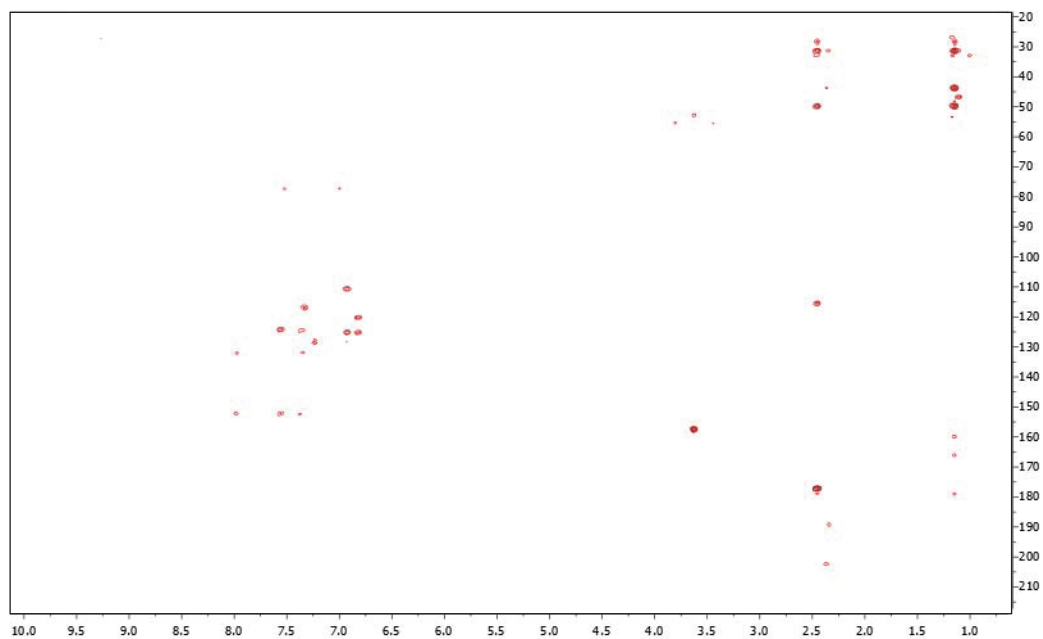


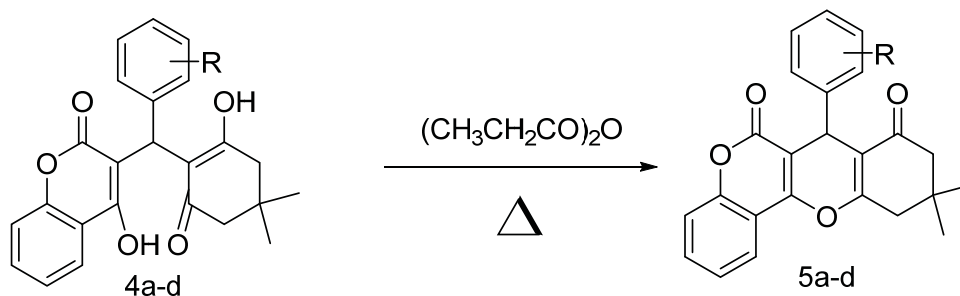
Рис. 3. HMBC спектр 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-метокси-фенил)метил)-2H-хромен-2-она (**4a**), CDCl<sub>3</sub>

Fig. 3. HMBC spectrum 4-hydroxy-3-((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl)(2-methoxyphenyl)methyl)-2H-chromen-2-one (**4a**), CDCl<sub>3</sub>

с образованием хроменогидрохроменовых структур. Действительно, нагревание сложнопостроенных димедонилхроменонов в среде пропионового ангидрида в течение часа позволило

выделить продукты полициклического строения – 10,10-диметил-7-фенил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено [4,3-b]хромен-6,8-дионы **5a-d** с выходом 52–73%.





R=2-OMe (4a, 5a);  
R=2-NO<sub>2</sub> (4b, 5b);  
R=4-Br (4c, 5c);  
R=3-OMe, 4-OH (4d, 5d).

Явление гетероциклизации субстратов **4a-d** подтверждается исчезновением сигналов протонов двух гидроксильных групп в слабopольной области спектра ЯМР <sup>1</sup>H, смещением сигнала третичного протона в более сильное поле, а также изменением картины мультиплетности сигналов для насыщеннoй части молекулы в продуктах **5a-d**. Так, в связи с жесткой фиксацией димедонильного кольца проявляется магнитная неэквивалентность протонов метиленовых звеньев, в результате чего каждое из метиленовых звеньев

отображается в спектре в виде дублета дублетов при 2,63 и 2,28 м.д. Отличие характера протонов метиленовых звеньев хорошо просматривается в НМВС спектре. Протоны метиленового звена, расположенного при карбонильной группе, коррелируют с карбонильным атомом углерода 2,28/195,67 м.д., а кросспик 2,63/163,55 м.д. отвечает за взаимодействие протонов метиленового звена с С-2 атомом 4Н-пиранового сегмента изучаемых соединений. Спектры соединений **5b-d** аналогичны (рис. 4–6).

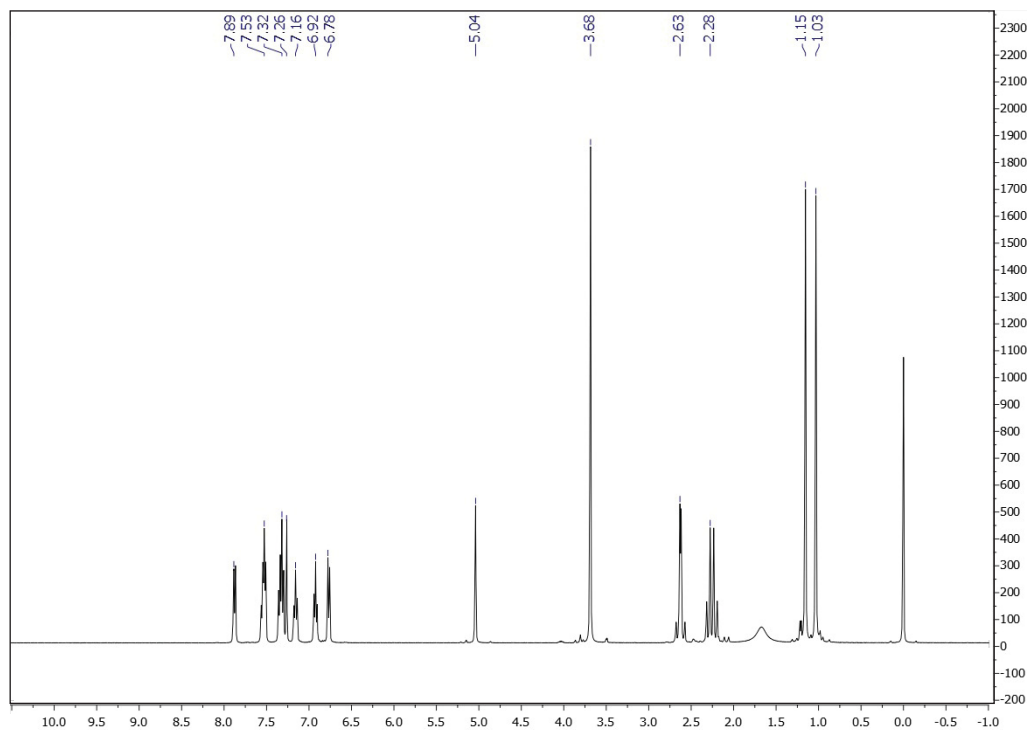


Рис. 4. ЯМР <sup>1</sup>H спектр 7-(2-метоксифенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-диона (**5a**), CDCl<sub>3</sub>

Fig. 4. NMR <sup>1</sup>H spectrum 7-(2-methoxyphenyl)-10,10-dimethyl-7,9,10,11-tetrahydro-6H,8H-chromeno[4,3-b]chromene-6,8-dione (**5a**), CDCl<sub>3</sub>

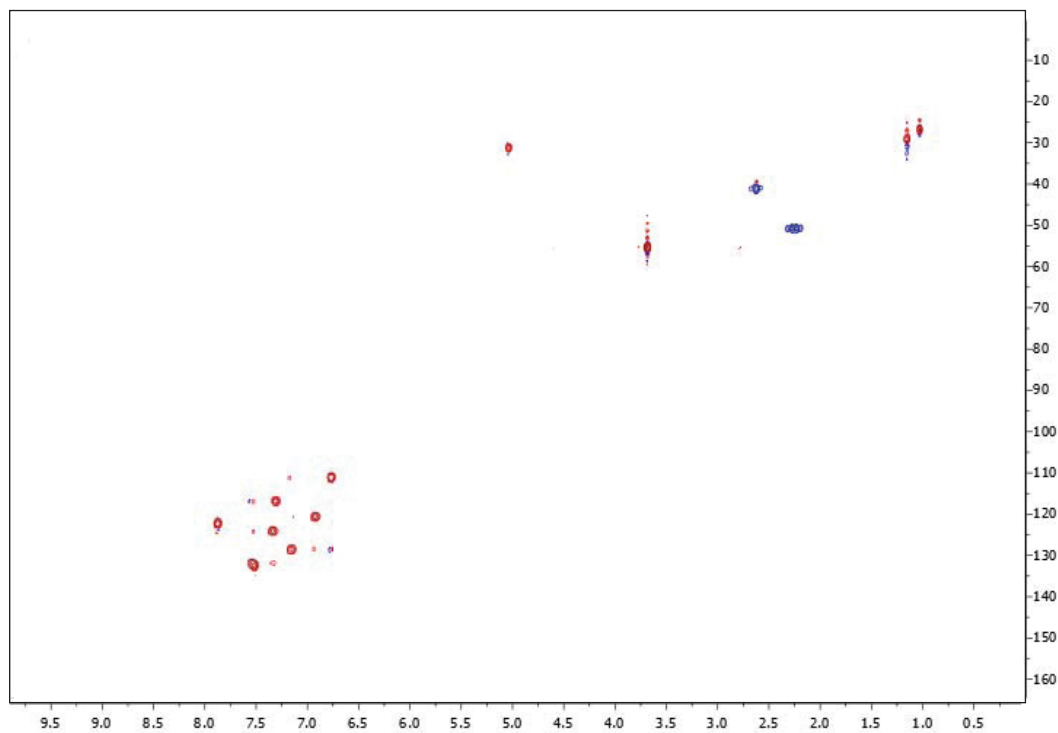


Рис. 5. HSQC спектр 7-(2-метоксифенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-диона (**5a**), CDCl<sub>3</sub>  
 Fig. 5. HSQC spectrum 7-(2-methoxyphenyl)-10,10-dimethyl-7,9,10,11-tetrahydro-6H,8H-chromeno[4,3-b]chromene-6,8-dione (**5a**), CDCl<sub>3</sub>

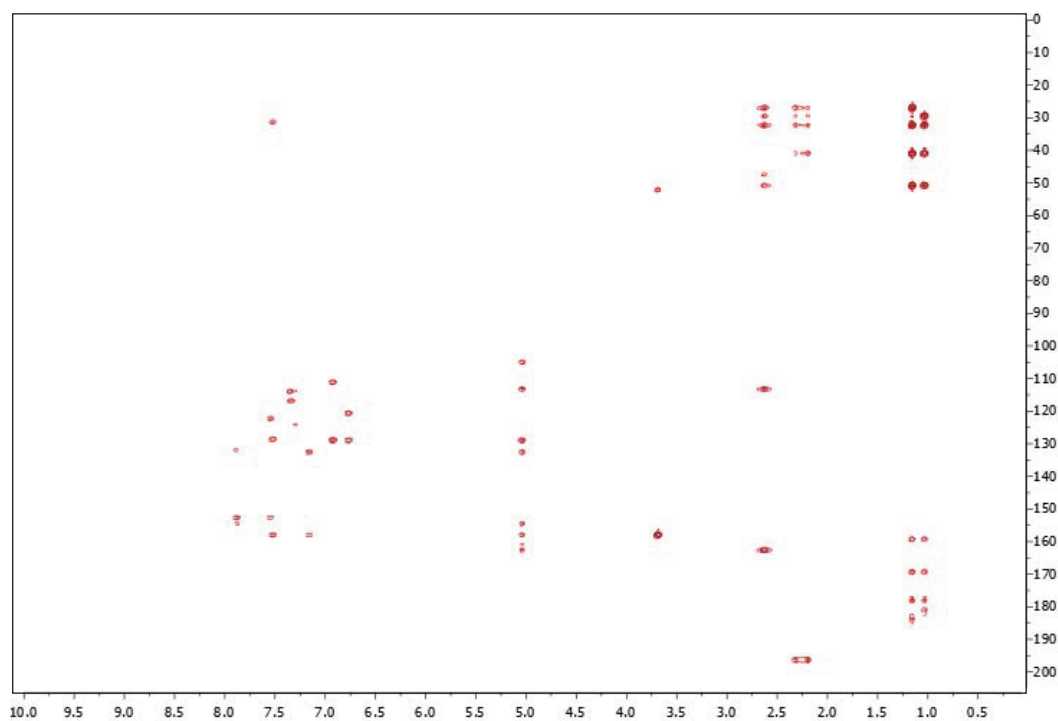


Рис. 6. HMBC спектр 7-(2-метоксифенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-диона (**5a**), CDCl<sub>3</sub>  
 Fig. 6. HMBC spectrum 7-(2-methoxyphenyl)-10,10-dimethyl-7,9,10,11-tetrahydro-6H,8H-chromeno[4,3-b]chromene-6,8-dione (**5a**), CDCl<sub>3</sub>



Таким образом, показана возможность синтеза несимметричных 10,10-диметил-7-арил-7,9,10,11-тетрагидро-6Н,8Н-хромено[4,3-*b*]хромен-6,8-дионов путём трёхкомпонентной конденсации, а также выявлено влияние заместителей в ароматическом альдегиде на выход и время протекания реакции. Показана возможность гетероциклизации в присутствии пропионового ангидрида в хромено-гидрохромендионы.

### Материалы и методы

Элементный анализ проводился на CHNS-анализаторе Elementar Vario Micro cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия). Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  (400 МГц) и  $^{13}\text{C}$  (100 МГц) регистрировались на спектрометре Varian 400 (Varian, США) в  $\text{CDCl}_3$ , внутренний стандарт – ТМС. Контроль за ходом реакции осуществляли методом ТСХ на пластинках Alugram® Sil G UV254 (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Германия), элюент – этилацетат – гексан – хлороформ (1 : 3 : 1).

*4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-метоксифенил)метил)-2Н-хромен-2-он (4a).*

В плоскодонную колбу объемом 50 мл, снабженную обратным холодильником, помещают 0,5 г (3,57 ммоль) димедона (3), 0,58 г (3,57 ммоль) 4-гидрокси-2Н-хромен-2-она (1) и 0,49 г (3,57 ммоль) 2-метоксибензальдегида (2a), приливают 10 мл этанола, добавляют 0,04 г (0,357 ммоль) L-пролина. Реакционную смесь нагревают при постоянном перемешивании в течение 9 часов. Выпавшие бесцветные кристаллы перекристаллизовывают из этанола. Выход 1,1 г (73%), Т. пл. 195–196° С. ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д.: 1.17 (с, 6Н,  $\text{CH}_3$ ), 2.36 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2.45 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 3.63 (с, 3Н,  $\text{OCH}_3$ ), 5.82 (с, 1Н, СН), 6.83–7.99 (м, 8Н, Аг), 11.02 (с, 1Н, ОН), 12.01 (с, 1Н, ОН). ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д.: 202.05, 177.19, 175.59, 172.86, 163.23, 138.16, 131.91, 128.36, 127.96, 124.17, 120.20, 116.37, 110.6, 96.2, 89.8, 88.96, 64.43, 55.43, 31.3, 25.35. Найдено, %: С 71.79; Н 5.29.  $\text{C}_{25}\text{H}_{26}\text{O}_6$ . Вычислено, %: С, 71.42; Н, 5.72.

Аналогично получают соединения **4b-d**.

*4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-нитрофенил)метил)-2Н-хромен-2-он (4b).*

Выход 0,49 г (63%), Т. пл. 209–211° С. ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д.: 1.12 (с, 6Н,  $\text{CH}_3$ ), 2.29 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2.37 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 5.73 (с, 1Н, СН), 6.95–8.14 (м, 8Н, Аг), 11.05 (с, 1Н, ОН), 12.04 (с, 1Н, ОН). ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д.: 202.05, 177.19, 175.59, 172.86, 163.23, 138.16, 131.91, 128.36, 127.96, 124.17,

120.20, 116.37, 110.36, 96.12, 89.82, 88.96, 64.43, 31.31, 25.35. Найдено, %: С 66.20; Н 4.86; N 3.22.  $\text{C}_{24}\text{H}_{21}\text{NO}_7$ . Вычислено, %: С 66.35; Н 4.91; N 3.38.

*4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(4-бром)метил)-2Н-хромен-2-он (4c).*

Выход 0,31 г (37%), Т. пл. 175–177° С. ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д.: 1.19 (с, 6Н,  $\text{CH}_3$ ), 2.31 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2.34 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 5.83 (с, 1Н, СН), 7.15–8.19 (м, 8Н, Аг), 11.15 (с, 1Н, ОН), 12.09 (с, 1Н, ОН). ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д.: 202.15, 176.99, 175.75, 173.12, 163.94, 138.45, 132.16, 128.63, 128.36, 124.71, 120.83, 116.59, 110.63, 96.45, 90.61, 89.35, 64.93, 31.56, 25.83. Найдено, %: С 61.27; Н 4.36; Br 16.72.  $\text{C}_{21}\text{H}_{26}\text{BrO}_5$ . Вычислено, %: С 61.42; Н 4.51; Br 17.03.

*4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(4-гидрокси-3-метоксифенил)метил)-2Н-хромен-2-он (4d).*

Выход 0,2 г (25%), Т. пл. 214–216° С. ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д.: 1.16 (с, 6Н,  $\text{CH}_3$ ), 2.36 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2.49 (с, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 3.68 (с, 3Н,  $\text{OCH}_3$ ), 5.83 (с, 1Н, СН), 6.79–7.98 (м, 7Н, Аг), 10.93 (с, 1Н, ОН), 12.01 (с, 1Н, ОН). ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д.: 202.11, 176.89, 175.30, 173.12, 163.43, 137.92, 131.91, 128.49, 128.32, 124.34, 119.18, 116.82, 109.91, 96.74, 90.82, 87.6, 65.84, 54.93, 30.89, 24.9. Найдено, %: С 68.20; Н 5.86.  $\text{C}_{25}\text{H}_{24}\text{O}_7$ . Вычислено, %: С 68.80; Н 5.54.

*7-(2-метоксифенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6Н,8Н-хромено[4,3-*b*]хромен-6,8-дион (5a).*

В круглодонную колбу объемом 25 мл, снабженную обратным холодильником, помещают 0,3 г (0,75 ммоль) 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(2-метоксифенил)метил)-2Н-хромен-2-она (**4a**), приливают 5 мл пропионового ангидрида. Реакционную смесь нагревают в течение 60 минут. Выпавшие бесцветные кристаллы перекристаллизовывают из этанола. Выход 0,21 г (73%), Т. пл. 178–179° С.

ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м.д.: 1.04 (с, 3Н,  $\text{CH}_3$ ), 1.16 (с, 3Н,  $\text{CH}_3$ ), 2.34–2.14 (м, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 2.69–2.57 (м, 2Н,  $\text{CH}_2$ ), 3.69 (с, 3Н,  $\text{CH}_3$ ), 5.04 (с, 1Н, СН), 6.73–7.83 (м, 8Н Аг). ЯМР  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta$ , м.д.: 195.91, 162.33, 160.48, 157.67, 154.22, 152.38, 132.33, 131.68, 128.77, 128.38, 123.93, 122.02, 120.41, 116.63, 113.75, 113.07, 110.90, 104.83, 55.33, 50.72, 40.95, 32.38, 31.37, 29.54, 26.91. Найдено, %: С 75.13; Н 5.83.  $\text{C}_{25}\text{H}_{24}\text{O}_5$ . Вычислено, %: С 74.61; Н 5.51.





Аналогично получают соединения **5b-d**.

*7-(2-нитрофенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-дион (5b)*.

Выход 0.19 г (67%), Т. пл. 233–235° С. ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м.д.: 0.92 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 1.01 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 2.08 (д, J=16.3 Hz 1H), 2.18 (д, 1H, J=16.3 Hz, 1H), 2.55–2.65 (м, 2H, CH<sub>2</sub>), 4.81 (с, 1H), 7.16–7.99 (м, 8H Ar). ЯМР <sup>13</sup>C, δ, м.д.: 196.13, 162.73, 161.01, 155.11, 152.53, 142.44, 133.83, 130.92, 129.82, 128.77, 128.43, 124.58, 116.91, 115.13, 112.83, 105.92, 51.28, 41.33, 32.74, 28.87, 26.90. Найдено, %: С 69.29; Н 4.28; N 3.49. C<sub>24</sub>H<sub>19</sub>NO<sub>6</sub>. Вычислено, %: С 69.06; Н 4.59; N 3.36.

*7-(4-бромфенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-дион (5c)*.

Выход 0.15 г (52%), Т. пл. 169–171° С. ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м.д.: 1.17 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 1.32 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 2.26 (д, 1H, J=16.2Hz 1H), 2.38 (д, 1H, J=16.2Hz 1H), 2.74–2.65 (м, 2H, CH<sub>2</sub>), 6.15 (с, 1H, CH), 7.24–7.87 (м, 8H Ar) ЯМР <sup>13</sup>C, δ, м.д.: 195.67, 162.35, 161.22, 154.60, 152.82, 142.11, 134.34, 130.44, 129.68, 128.41, 128.08, 124.09, 117.28, 114.77, 113.38, 106.23, 50.90, 40.74, 33.45, 32.50, 29.23, 27.41. Найдено, %: С 61.27; Н 4.36; Br 16.72. C<sub>21</sub>H<sub>24</sub>BrO<sub>4</sub>. Вычислено, %: С 63.87; Н 4.24; Br 17.70.

*7-(4-гидрокси-3-метоксифенил)-10,10-диметил-7,9,10,11-тетрагидро-6H,8H-хромено[4,3-b]хромен-6,8-дион (5d)*.

Выход 0.19г (67%), Т. пл. 271–273° С. ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м.д.: 1.13 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 1.19 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 2.29 (д, J=16.4 Hz, 1H), 2.34 (д, J=16.4 Hz, 1H), 2.66 (д, J=17.6 Hz, 1H), 2.73 (д, J=17.6 Hz, 1H), 3.93 (с, 3H, CH<sub>3</sub>), 4.90 (с, 1H), 5.52 (с, 1H), 6.63–7.87 (м, 7H, Ar). ЯМР <sup>13</sup>C, δ, м.д.: 196.13, 161.81, 160.72, 153.73, 152.64, 146.14, 144.73, 134.80, 132.11, 124.22, 122.43, 120.34, 116.91, 115.33, 114.14, 113.88, 112.63, 107.01, 56.03, 50.82, 40.98, 32.9, 32.30, 29.22, 27.51. Найдено, %: С 72.23; Н 5.54. C<sub>25</sub>H<sub>22</sub>O<sub>6</sub>. Вычислено, %: С 71.76; Н 5.30.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00446).

### Список литературы

1. *Aragno M., Tagliapietra S., Nano G. M., Ugazio G.* Experimental studies on the toxicity of *Ferula communis* in the rat // *Research Communications in Chemical Pathology and Pharmacology*. 1988. Vol. 59, № 3. P. 399–402.
2. *Oketch-Rabah H. A., Lemmich E., Dossaji S. F., Theander T. G., Olsen C. E., Cornett C.* Two new anti-protozoal 5-methylcoumarins from *Vernonia brachycalyx* // *Journal of Natural Products*. 1997. Vol. 60, № 5. P. 458–461. DOI: 10.1021/np970030o
3. *Ikawa M., Stahmann M. A., Link K. P.* Studies on 4-Hydroxycoumarins. V. The Condensation of  $\alpha, \beta$ -Unsaturated Ketones with 4-Hydroxycoumarin I // *Journal of the American Chemical Society*. 1944. Vol. 66, № 6. P. 902–906. DOI: 10.1021/ja01234a019
4. *Cravotto G., Nano G. M., Tagliapietra S., Palmisano G., Pilati T.* A library of pyranocoumarin derivatives via a one-pot three-component hetero diels-alder reaction // *Journal of Heterocyclic Chemistry*. 2001. Vol. 38, № 4. P. 965–971. DOI: 10.1002/jhet.5570380425
5. *Appendino G., Cravotto G., Giovenzana G. B., Palmisano G.* A straightforward entry into polyketide monopennylated furanocoumarins and pyranocoumarins // *Journal of Natural Products*. 1999. Vol. 62, № 12. P. 1627–1631. DOI: 10.1021/np990241o
6. *Bravic G., Gaultier J., Hauw C.* Structure cristalline et moleculaire du dicoumarol // *CR Acad. Sci. Paris, Ser. C*. 1968. Vol. 267. P. 1790–1793.
7. *McEvoy M. T., Stern R. S.* Psoralens and related compounds in the treatment of psoriasis // *Pharmacology & Therapeutics*. 1987. Vol. 34, № 1. P. 75–97.
8. *Ahmed N., Babu B. V.* Efficient route to highly functionalized chalcone-based pyranocoumarins via iodine-promoted Michael addition followed by cyclization of 4-hydroxycoumarins // *Synthetic Communications*. 2013. Vol. 43, № 22. P. 3044–3053.
9. *Joshi P. P., Sandhu P. K.* Manekar-Tilve AJ Chem. Soc. // *Perkin Trans.* 2002. Vol. 1. P. 371–376.
10. *Xie L., Takeuchi Y., Cosentino L. M., McPhail A. T., Lee K. H.* Anti-AIDS agents. 42. Synthesis and anti-HIV activity of disubstituted (3 'R, 4 'R)-3 ', 4 '-Di-O-(S)-camphanoyl-(+)-cis-khellactone analogues // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2001. Vol. 44, № 5. P. 664–671. DOI: 10.1021/jm000070g
11. *Melliou E., Magiatis P., Mitaku S., Skaltsounis A. L., Chinou E., Chinou I.* Natural and synthetic 2, 2-dimethylpyranocoumarins with antibacterial activity // *Journal of Natural Products*. 2005. Vol. 68, № 1. P. 78–82. DOI: 10.1021/np0497447
12. *Galinis D. L., Fuller R. W., McKee T. C., Cardellina J. H. II, Gulakowski R. J., McMahon J. B., Boyd M. R.* Structure-activity modifications of the HIV-1 inhibitors (+)-calanolide A and (-)-calanolide B // *J. Med. Chem.* 1996. Vol. 39. P. 4507–4510.
13. *Chakraborty D. P., Das Gupta A., Bose P. K.* On the anti-fungal action of some natural coumarins // *Ann. Biochem. Exp. Med.* 1957. Vol. 17. P. 59–62.
14. *Brooks G. T., Ottridge A. P., Mace D. W.* The effect of some furochromene and benzochromene analogues of 2,2-dimethyl-7-methoxychromene (precocene I) and benzofuran precursors on *Oncopeltus fasciatus* (dallas) and *Locusta migratoria migratorioides* (R&F) // *Pestic Sci.* 1988. Vol. 22. P. 41–50.



15. Chand N., Diamantis W., Sofia R. D. Modulation of in vitro anaphylaxis of guinea-pig isolated tracheal segments by azelastine, inhibitors of arachidonic acid metabolism and selected antiallergic drugs // *Brit. J. Pharmacol.* 1986. Vol. 87. P. 443–448.
16. Sarda S. R., Puri V. A., Rode A. B., Dalawe T. N., Jadhav W. N., Pawar R. P. Sulfated tin oxides : a suitable reagent for synthesis of 2, 4-diphenyl-4, 6, 7, 8-tetrahydrochromen-5-one // *Arkivoc.* 2007. Vol. 16. P. 246–251. DOI: 10.3998/ark.5550190.0008.g24
17. Montandon J. B., Zijlstra F. J., Wilson J. H., Grandjean E. M., Cicurel L. In-vitro versus in-vivo activities of new 5-lipoxygenase inhibitors with antiinflammatory activity // *International Journal of Tissue Reactions.* 1989. Vol. 11, № 3. P. 107–120.

#### Образец для цитирования:

Кострицкий А. Ю., Наконечникова М. Г., Федотова О. В., Пчелинцева Н. В. Синтез и гетероциклизация 4-гидрокси-3-((2-гидрокси-4,4-диметил-6-оксоциклогекс-1-ен-1-ил)(арил)метил)-2H-хромен-2-онов // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология.* 2020. Т. 20, вып. 4. С. 362–371. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-362-371>

#### Synthesis and Heterocyclization of 4-Hydroxy-3 - ((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl) (aryl) methyl) -2H-chromen-2-ones

A. Y. Kostritskiy, M. G. Nakonechnikova, O. V. Fedotova, N. V. Pchelintseva

Alexander Yu. Kostritskiy, <https://orcid.org/0000-0002-9154-3005>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, alexandrkostritskiy@mail.ru

Marina G. Nakonechnikova, <https://orcid.org/0000-0002-7585-4372>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, mnakonechnikova@mail.ru

Olga V. Fedotova, <https://orcid.org/0000-0002-3657-3156>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, Fedotova\_ov@rambler.ru

Nina V. Pchelintseva, <https://orcid.org/0000-0002-5830-9807>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, PchelintsevaNV555@mail.ru

The possibility of obtaining asymmetric 1,5-diketones based on 4-hydroxy-2H-chromen-2-one and dimedone by three-component condensation in the presence of L-proline as a catalyst is shown. As a result, a series of 4-hydroxy-3 - ((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl) (aryl) methyl) -2H-chromen-2-ones was obtained with a yield of 25 up to 73%. The study revealed that the highest yield was observed for compounds containing fragments of ortho-substituted aldehydes capable of forming a hydrogen bond. For meta- and para-substituted – the lowest yield was observed. In the case of ortho-substitution this can be probably explained due to the stabilization of the intermediate complex by two intramolecular hydrogen bonds, which makes it possible to selectively obtain only one final product – 4-hydroxy-3 - ((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl) (aryl) methyl) -2H-chromen-2-one. The structure of the obtained products was confirmed by  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  NMR, HSQC, HMBC spectroscopy. Considering the 1,5-diketone fragment for the above-described compounds, the possibility of their O-heterocyclization by propionic anhydride was suggested. Boiling 4-hydroxy-3 - ((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl) (aryl) methyl) -2H-chromen-2-ones in anhydride medium for an hour resulted in obtaining a series of 7- (aryl) -10,10-dimethyl-7,9,10,11-tetrahydro-6H, 8H-chromeno [4,3-b] chromene-6,8-diones. Their structure was also confirmed by  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  NMR, HSQC, HMBC spectroscopy.

**Keywords:** 4-hydroxy-2H-chromen-2-one, dimedone, 1,5-diketones, heterocyclization.

Received: 18.08.2020 / Accepted: 26.08.2020 / Published: 30.11.2020

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

**Acknowledgements:** *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-03-00446).*

#### References

1. Aragno M., Tagliapietra S., Nano G. M., Ugazio G. Experimental studies on the toxicity of *Ferula communis* in the rat. *Research Communications in Chemical Pathology and Pharmacology*, 1988, vol. 59, no. 3, pp. 399–402.
2. Oketch-Rabah H. A., Lemmich E., Dossaji S. F., Theander T. G., Olsen C. E., Cornett C. Two new antiprotozoal 5-methylcoumarins from *Vernonia brachycalyx*. *Journal of Natural Products*, 1997, vol. 60, no. 5, pp. 458–461. DOI: 10.1021/np970030o
3. Ikawa M., Stahmann M. A., Link K. P. Studies on 4-Hydroxycoumarins. V. The Condensation of  $\alpha$ ,  $\beta$ -Unsaturated Ketones with 4-Hydroxycoumarin I. *Journal of the American Chemical Society*, 1944, vol. 66, no. 6, pp. 902–906. DOI: 10.1021/ja01234a019
4. Cravotto G., Nano G. M., Tagliapietra S., Palmisano G., Pilati T. A library of pyranocoumarin derivatives via a one-pot three-component hetero diels-alder reaction. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 2001, vol. 38, no. 4, pp. 965–971. DOI: 10.1002/jhet.5570380425
5. Appendino G., Cravotto G., Giovenzana G. B., Palmisano G. A straightforward entry into polyketide monoprenylated furanocoumarins and pyranocoumarins. *Journal of Natural Products*, 1999, vol. 62, no. 12, pp. 1627–1631. DOI: 10.1021/np990241o
6. Bravic G., Gaultier J., Hauw C. Structure cristalline et moleculaire du dicoumarol. *CR Acad. Sci. Paris, Ser. C.*, 1968, vol. 267, pp. 1790–1793.
7. McEvoy M. T., Stern R. S. Psoralens and related compounds in the treatment of psoriasis. *Pharmacology & Therapeutics*, 1987, vol. 34, no. 1, pp. 75–97.



8. Ahmed N., Babu B. V. Efficient route to highly functionalized chalcone-based pyranocoumarins via iodine-promoted Michael addition followed by cyclization of 4-hydroxycoumarins. *Synthetic Communications*, 2013, vol. 43, no. 22, pp. 3044–3053.
9. Joshi P. P., Sandhu P. K. Manekar-Tilve *AJ Chem. Soc. Perkin Trans.*, 2002, vol. 1, pp. 371–376.
10. Xie L., Takeuchi Y., Cosentino L. M., McPhail A. T., Lee K. H. Anti-AIDS agents. 42. Synthesis and anti-HIV activity of disubstituted (3 'R, 4 'R)-3', 4 '-Di-O-(S)-camphanoyl-(+)-cis-khellactone analogues. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2001, vol. 44, no. 5, pp. 664–671. DOI: 10.1021/jm000070g
11. Melliou E., Magiatis P., Mitaku S., Skaltsounis A. L., Chinou E., Chinou I. Natural and synthetic 2, 2-dimethylpyranocoumarins with antibacterial activity. *Journal of Natural Products*, 2005, vol. 68, no. 1, pp. 78–82. DOI: 10.1021/np0497447
12. Galinis D. L., Fuller R. W., McKee T. C., Cardellina J. H., II, Gulakowski R. J., McMahon J. B., Boyd M. R. Structure-activity modifications of the HIV-1 inhibitors (+)-calanolide A and (-)-calanolide B. *J. Med. Chem.*, 1996, vol. 39, pp. 4507–4510.
13. Chakraborty D. P., Das Gupta A., Bose P. K. On the anti-fungal action of some natural coumarins. *Ann. Biochem. Exp. Med.*, 1957, vol. 17, pp. 59–62.
14. Brooks G. T., Ottridge A. P., Mace D. W. The effect of some furochromene and benzochromene analogues of 2,2-dimethyl-7-methoxychromene (precocene I) and benzofuran precursors on *Oncopeltus fasciatus* (dallas) and *Locusta migratoria migratorioides* (R&F). *Pestic Sci.*, 1988, vol. 22, pp. 41–50.
15. Chand N., Diamantis W., Sofia R. D. Modulation of in vitro anaphylaxis of guinea-pig isolated tracheal segments by azelastine, inhibitors of arachidonic acid metabolism and selected antiallergic drugs. *Brit. J. Pharmacol.*, 1986, vol. 87, pp. 443–448.
16. Sarda S. R., Puri V. A., Rode A. B., Dalawe T. N., Jadhav W. N., Pawar R. P. Sulfated tin oxides: a suitable reagent for synthesis of 2, 4-diphenyl-4, 6, 7, 8-tetrahydrochromen-5-one. *Arkivoc*, 2007, vol. 16, pp. 246–251. DOI: 10.3998/ark.5550190.0008.g24
17. Montandon J. B., Zijlstra F. J., Wilson J. H., Grandjean E. M., Cicurel L. In-vitro versus in-vivo activities of new 5-lipoxygenase inhibitors with antiinflammatory activity. *International Journal of Tissue Reactions*, 1989, vol. 11, no. 3, pp. 107–120.

---

**Cite this article as:**

Kostritskiy A. Y., Nakonechnikova M. G., Fedotova O. V., Pchelintseva N. V. Synthesis and Heterocyclization of 4-Hydroxy-3-((2-hydroxy-4,4-dimethyl-6-oxocyclohex-1-en-1-yl)(aryl)methyl)-2H-chromen-2-ones. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 362–371 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-362-371>

---

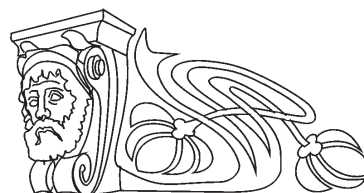




УДК 54.062

## Оптимизация условий определения 2,4-Д и дельтаметрина методом ВЭЖХ

Е. В. Мелихова, О. В. Фарафонова



Мелихова Елена Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, Липецкий государственный технический университет; доцент кафедры дисциплин технологического менеджмента, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), mev80@yandex.ru

Фарафонова Ольга Вячеславовна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, Липецкий государственный технический университет, farafonova.ov@mail.ru

В работе представлены результаты оптимизации условий хроматографического определения 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и дельтаметрина для двух капиллярных колонок (Supelcosil LC-18, Kromasil C-18), выбраны режимы индивидуального хроматографирования пестицидов. Показана и экспериментально доказана несостоятельность применения изократического режима элюирования при совместном присутствии 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и дельтаметрина. Предложены три варианта условий градиентного режима раздельного детектирования аналитов в смеси. Разработанная методика хроматографического раздельного определения 2,4-Д и дельтаметрина при их совместном присутствии апробирована при анализе образцов речной воды и картофеля.

**Ключевые слова:** высокоэффективная жидкостная хроматография, градиентный и изократические режимы элюирования, пестициды.

Поступила в редакцию: 29.04.2020 / Принята: 12.05.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-372-377>

Последние годы активно критикуют ненормируемое применение пестицидов в сельском хозяйстве, изучают куммулятивность экоток-

сикантов, оценивают их негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека [1–4]. Однако экономически выгодная альтернатива гербицидам в настоящее время отсутствует. Наиболее часто лаборатории осуществляют контроль за содержанием остаточных концентраций пестицидов в объектах окружающей среды и продуктах питания методами капиллярного электрофореза [1, 2] и газовой хроматографии [3].

Совершенствование аппаратного обеспечения химических методов анализа [4–6], разработка новых сорбентов и методик пробоподготовки [7], а также необходимость работы с концентрациями токсикантов на уровне ПДК и ниже требуют дополнительных фундаментальных и прикладных исследований в различных областях химических наук. Поэтому целью работы стало изучение условий индивидуального и раздельного определения 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и дельтаметрина (рис. 1) при их совместном присутствии методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

### Материалы и методы

Серию стандартных водных растворов 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) и дельтаметрина готовили путем последовательного разбавления государственного стандартного образца с концентрацией 0,1 мг/мл. В работе также использовали следующие реагенты: деионизованную воду, ацетонитрил (о.с.ч.), уксусную, соляную и фосфорную кислоты, фосфатный буферный раствор (pH = 4,8), гексан (х.ч.), ацетон (ч.д.а.).

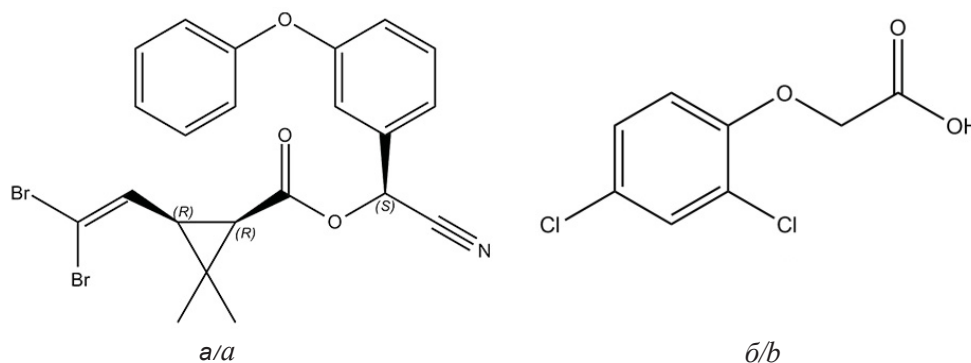


Рис. 1. Структурные формулы: *a* – дельтаметрина; *b* – 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты  
Fig. 1. Structural formulas of deltamethrin (*a*) and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (*b*)



Исследования проводились на высокоэффективном жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Япония) со спектрофотометрическим детектором, регистрирующим светопоглощение в диапазоне 190–800 нм и колонками: 1) Supelcosil LC-18 (длина 25 см, внутренний диаметр 4,6 мм); 2) Kromasil C-18 (длина 12 см, внутренний диаметр 2,1 мм). Основываясь на физико-химических свойствах аналитов и рабочем температурном диапазоне колонок (20–80° С), температуру термостата колонки поддерживали при 30° С.

Отбор проб речной воды и пищевых продуктов производили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51592-2000 и МосМР 2.3.2.006-03 соответственно.

**Пробоподготовка образцов речной воды:** к аликвоте (15 мл) отфильтрованного образца приливают 15 мл смеси гексан – ацетон (1:2), перемешивают, центрифугируют и упаривают до сухого остатка, который в дальнейшем растворяют в элюенте объемом 10 мл.

**Пробоподготовка образцов картофеля:** навеску измельченного картофеля (25 г) помещают в коническую колбу и заливают 100 мл ацетона, встряхивают 15 мин и отфильтровывают через бумажный фильтр. Операцию повторяют дважды, экстракты объединяют и упаривают. К сухому остатку приливают 10 мл ацетонитрила, 5 мл воды и 3 мл концентрированной уксусной кислоты.

**Условия хроматографирования образцов реальных объектов при совместном присутствии пестицидов:** градиентный режим элюирования (табл. 1) смесью ацетонитрил (А) – уксусная кислота (В) (рН = 4) в соотношении 60/40, объем пробы (V) – 10 мкл, длина волны – 230 нм, температура колонки (T<sub>к</sub>) – 30° С, скорость потока (U) – 2 мл/мин.

Таблица 1 / Table 1

**Условия градиентного режима элюирования смеси аналитов**  
**Conditions for the gradient mode of a mixture's elution of analytes**

Время анализа, мин / Analysis time, min	A, %	B, %
0.00	52	48
4.00	55	45
10.00	80	20
15.00	80	20
20.00	90	10
25.00	90	10
30.00	55	45
35.00	Стоп / Stop	

**Результаты и их обсуждение**

Идентификацию пестицидов осуществляли по спектрам, полученным экспериментальным путем при анализе стандартных образцов 2,4-Д и дельтаметрина. Максимальное поглощение зарегистрировано при 230 нм для обоих аналитов.

Эффективность хроматографических колонок Supelcosil LC-18 (колонка 1) и Kromasil C-18 (колонка 2) оценивали традиционным способом по максимальному значению числа теоретических тарелок (N) (табл. 2). Для сравнения использовали данные, полученные при индивидуальном хроматографировании стандартных растворов пестицидов с концентрацией 10 мкг/мл каждый (T<sub>к</sub> = 30° С; U = 2,0 мл/мин; V = 10 мкл).

Таблица 2 / Table 2

**Хроматографические параметры определения 2,4-Д и дельтаметрина (А – ацетонитрил, В – раствор уксусная кислота (рН = 4))**  
**Chromatographic parameters for the determination of 2,4-D and deltamethrin (A – acetonitrile, B – acetic acid solution (рН = 4))**

Состав элюента А/В, % The composition of eluent А/В, %	Колонка 1 / Column 1		Колонка 2 / Column 2	
	t <sub>R</sub> , мин / t <sub>R</sub> , min	N	t <sub>R</sub> , мин / t <sub>R</sub> , min	N
2,4-Д / 2,4-D				
70/30	2,97	3063	2,94	650
<b>60/40</b>	<b>4,65</b>	<b>4897</b>	<b>3,49</b>	<b>675</b>
50/50	2,66	1720	4,22	860
<b>40/60</b>	<b>6,51</b>	<b>3855</b>	<b>6,25</b>	<b>960</b>
30/70	3,22	1234	13,49	1308
Дельтаметрин / Deltamethrin				
90/10	5,75	13189	6,45	2822
80/20	10,84	17170	12,13	4876
<b>70/30</b>	<b>23,74</b>	<b>20367</b>	<b>28,93</b>	<b>7218</b>

При выборе состава элюента учитывали тенденцию минимизации применения органических растворителей, ограничение времени детектирования (не более 30 мин) и разделение пиков при определении аналитов в смеси.

Установлено, что полярный пестицид 2,4-Д на гидрофобизированных силикагелях элюируется с наибольшим значением N как при 40%, так и при 60% содержании ацетонитрила в подвижной фазе. В случае детектирования слабополярного дельтаметрина время удерживания (t<sub>R</sub>) с увеличением доли раствора СН<sub>3</sub>СООН (рН = 4) в составе элюента значительно возрастает. В связи с различной полярностью изучаемых и предполагаемых в реальных объектах пестицидов выбор состава элюента на колонке 1 сделан в пользу



соотношений 60/40 в случае 2,4-Д и 70/30 для дельтаметрина, однако получить оба пика аналитов на хроматограмме в изократическом режиме и заданных условиях не удалось.

Параллельно для увеличения элюирующей способности ацетонитрила был проведен сравнительный анализ добавок – фосфатный буферный раствор с pH = 4,8 фосфорная кислота (pH = 3) по отношению к результатам, полученным с уксусной кислотой (табл. 3). Установлено, что только присутствие уксусной кислоты в

составе подвижной фазы позволяет с максимальными значениями  $N$  получить достаточно симметричные пики. Для уменьшения значений коэффициента асимметрии ( $As$ ) при хроматографическом определении 2,4-Д варьировали pH уксусной кислоты (табл. 4). Однако лучшие результаты в заданном диапазоне зафиксированы при pH = 4. В случае дельтаметрина значение кислотности элюента не повлияло на время выхода пика и другие хроматографические характеристики.

Таблица 3 / Table 3

**Значения хроматографических характеристик определения 2,4-Д на колонке 1**  
**Values of the chromatographic characteristics of the 2,4-D determination in column 1**

A/B	Фосфатный буферный раствор / Phosphate buffer solution			Фосфорная кислота / Phosphoric acid			Уксусная кислота / Acetic acid		
	$t_{R, \text{ мин}} / t_{R, \text{ min}}$	$N$	$As$	$t_{R, \text{ мин}} / t_{R, \text{ min}}$	$N$	$As$	$t_{R, \text{ мин}} / t_{R, \text{ min}}$	$N$	$As$
2,4-Д / 2,4-D									
60/40	6,59	2461	1,4	4,12	3079	1,8	4,65	4897	1,2
Дельтаметрин / Deltamethrin									
70/30	9,67	11950	0,9	13,5	14435	1,0	23,74	20367	1,0

Таблица 4 / Table 4

**Влияние pH уксусной кислоты на эффективность определения 2,4-Д в условиях:**  
**колонка 1, элюент ацетонитрил/уксусная кислота в соотношении 60/40,  $T_c = 30^\circ \text{C}$ ;**  
 **$U = 2,0$  мл/мин;  $V = 10$  мкл**

**The effect of the pH of acetic acid on the efficiency of the determination of 2,4-D under the conditions:**  
**column 1, eluent acetonitrile/acetic acid in the ratio 60/40,  $T_c = 30^\circ \text{C}$ ;**  
 **$U = 2,0$  ml/min;  $V = 10 \mu\text{l}$**

pH	$t_{R, \text{ мин}} / t_{R, \text{ min}}$	$N$	$As$
3,1	4,33	3188	0,7
3,5	4,04	4113	1,4
<b>4,0</b>	<b>4,65</b>	<b>4897</b>	<b>1,2</b>
5,0	7,14	2726	0,7

Таким образом, для индивидуального определения 2,4-Д и дельтаметрина в изократическом режиме рекомендованы следующие условия: колонка Supelcosil LC-18 при  $T_c = 30^\circ \text{C}$ ;  $U = 2,0$  мл/мин;  $V = 10$  мкл, элюент ацетонитрил/ $\text{CH}_3\text{COOH}$  (pH = 4) в соотношении 60/40 и 70/30 соответственно.

Раздельное определение аналитов при их совместном присутствии в вышеперечисленных условиях увеличивает время анализа более чем в 2,5 раза, поэтому в работе изучены три режима градиентного элюирования, основные характеристики которых приведены в табл. 5.

Таблица 5 / Table 5

**Условия градиентных режимов раздельного определения 2,4-Д и дельтаметрина, при их совместном присутствии в смеси стандартных растворов на колонке 1, элюент ацетонитрил (A)/уксусная кислота (pH = 4) (B)**  
**Conditions for gradient modes of separate determination of 2,4-D and deltamethrin, with their joint presence in a mixture of reference solutions in column 1, eluent acetonitrile (A)/acetic acid (pH = 4) (B)**

Время анализа, мин / Analysis time, min	Режим 1 / Mode 1		Режим 2 / Mode 2		Режим 3 / Mode 3	
	A, %	B, %	A, %	B, %	A, %	B, %
0.00	45	55	50	50	52	48
4.00	80	20	80	20	55	45
10.00	80	20	80	20	80	20
15.00	90	10	90	10	80	20
20.00	90	10	90	10	90	10
25.00	45	55	50	50	90	10
30.00	Стоп / Stop				55	45
35.00					Стоп / Stop	





Сравнительный анализ полученных хроматограмм показал, что все режимы могут быть применены для анализа смеси пестицидов, но наиболее ровный дрейф фоновой линии отмечается для режима 3 (рис. 2), хроматографические параметры которого приведены в табл. 6. Полу-

ченные результаты свидетельствуют о высокой эффективности колонки в заданном режиме.

Метрологические характеристики градуировочных графиков раздельного хроматографирования смеси стандартных растворов 2,4-Д и дельтаметрина в выбранных условиях приведены в табл. 7.

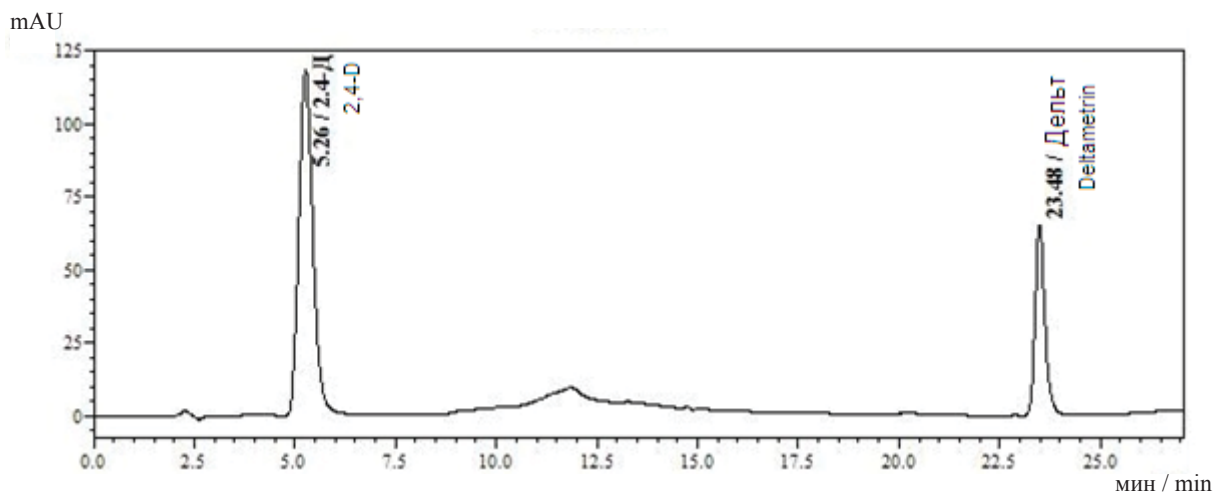


Рис. 2. Хроматограмма анализа смеси 2,4-Д и дельтаметрина с концентрацией 10 мкг/мл каждого в градиентном режиме на колонке Supelcosil LC-18 с  $T_c$  30° С, скорость потока 2 мл/мин

Fig. 2. Chromatogram of analysis of a mixture's 2,4-D and deltamethrin with the concentration of 10  $\mu\text{g/ml}$  of each in gradient mode on a Supelcosil LC-18 column with a  $T_c$  of 30° C, the flow rate is 2 ml/min

Таблица 6 / Table 6

**Хроматографические характеристики раздельного определения аналитов в смеси**  
**Chromatographic characteristics of separate determination of analytes in a mixture**

Пестицид / Pesticide	$t_{R_s}$ мин / $t_{R_s}$ min	$N$	$As$
2,4-Д / 2,4-D	5,26	1064	1,1
Дельтаметрин / Deltamethrin	23,49	45135	1,1

Таблица 7 / Table 7

**Метрологические характеристики градуировочных графиков раздельного хроматографирования пестицидов при их совместном присутствии в градиентном режиме ( $n = 3, P = 0,95$ )**

**Metrological characteristics of calibration graphs for separate chromatography of pesticides in their joint presence in the gradient mode ( $n = 3, P = 0,95$ )**

Аналит / Analyte	Уравнение градуировочного графика / Equation of the calibration graph	Линейный диапазон, мкг/мл / The linear range, $\mu\text{g/ml}$	$C_{\min}$ , мкг/мл / $C_{\min}$ , $\mu\text{g/ml}$	$s_r$	$R^2$
2,4-Д / 2,4-D	$y = 242018x + 16756$	5–10	0,1	0,01	0,99
Дельтаметрин / Deltamethrin	$y = 95804x - 14781$	5–10	0,3	0,01	0,99

Предварительно на стандартных растворах 2,4-Д и дельтаметрина проведены исследования и рассчитаны степени извлечения, которые составили 76 и 74% соответственно.

Разработанная методика хроматографического определения 2,4-Д и дельтаметрина в смеси апробирована при анализе образцов речной воды (образец 1) (р. Воронеж с. Ленино, Липецкий

район) и картофеля (с. Двуречки, Грязинский район). Правильность определения аналитов контролировали методом «введено-найдено», результаты эксперимента представлены в табл. 8.

Проверка полученных данных по критерию Стьюдента и сравнение рассчитанных значений  $t_{\text{эксп}}$  с  $t_{\text{крит}} = 4,3$  показало сходимость данных и отсутствие систематической ошибки.



Таблица 8 / Table 8

Результаты апробации разработанной методики при анализе образцов реальных объектов:  
 речная вода (образец 1) и клубни картофеля (образец 2) ( $n = 3, P = 0,95$ )  
 The results of testing the developed method for analyzing samples of real objects:  
 river water (sample 1) and potato tubers (sample 2) ( $n = 3, P = 0,95$ )

Пестицид / Pesticide	Образец / Sample	Введено, мкг/мл / Introduced, µg/ml	Найдено, мкг/мл / Found, µg/ml	Рассчитано, мкг/мл / Calculated, µg/ml	$s_r$	$t_{эксп} / t_{exp}$
2,4-Д / 2,4-D	1	10	9,3 ± 0,5	Не найден / Not found	0,02	3,2
	2	10	9,2 ± 0,6	Не найден / Not found	0,03	3,0
Пестицид / Pesticide	1	10	9,4 ± 0,4	Не найден / Not found	0,02	3,8
	2	10	9,1 ± 0,5	Не найден / Not found	0,03	4,0

Таким образом, предложенные методики раздельного хроматографического определения 2,4-Д и дельтаметрина при индивидуальном и совместном их присутствии в водных средах характеризуются хорошей прецизионностью и могут быть рекомендованы для лабораторий санитарно-эпидемиологического контроля.

#### Список литературы

1. *Большаков Д. С., Амелин В. Г.* Определение пестицидов в объектах окружающей среды и продуктах питания методом капиллярного электрофореза // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71, № 10. С. 1011–1060. DOI: 10.7868/S0044450216100029
2. *Большаков Д. С., Амелин В. Г., Третьяков А. В.* Определение гербицидов и их метаболитов в природных водах методом капиллярного зонного электрофореза в сочетании с дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракцией и on-line концентрированием // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69, № 1. С. 77–88. DOI: 10.7868/S0044450213110042
3. *Farina Y., Pauzi Bin Abdullah, Bibi N.* Extraction Procedures in Gas Chromatographic Determination of Pesticides // Journal of Analytical Chemistry. 2016. Vol. 71, № 4. P. 339–350. DOI: 10.1134/S1061934816040092
4. *Еремин С. А., Бородулева А. Ю.* Определение 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты в зерне хлебных злаков методом поляризационного флуоресцентного иммуноанализа // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71, № 9. С. 988–994. DOI: 10.7868/S0044450216090048
5. *Амелин В. Г., Андоралов А. М.* Высокоэффективная жидкостная хроматография-времяпролетная масс-спектрометрия в идентификации и определении 111 пестицидов в пищевых продуктах, кормах, воде и почве // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71, № 1. С. 85–97. DOI: 10.7868/S0044450215120038
6. *Амелин В. Г., Большаков Д. С., Андоралов А. М.* Скрининг и определение пестицидов различных классов в природной воде без пробоподготовки методом ультра взжх-квадруполь-времяпролетной масс-спектрометрии высокого разрешения // Журн. аналит. химии. 2018. Т. 73, № 3. С. 214–223. DOI: 10.7868/S0044450218030064
7. *Большаков Д. С., Амелин В. Г., Третьяков А. В.* Определение полярных пестицидов в почве методом мицеллярной электрокинетической хроматографии с использованием пробоподготовки QUECHERS // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69, № 1. С. 94–104. DOI: 10.7868/S0044450214010058

#### Образец для цитирования:

*Мелихова Е. В., Фарафонова О. В.* Оптимизация условий определения 2,4-Д и дельтаметрина методом ВЭЖХ // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 372–377. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-372-377>

#### Optimization of the Conditions for Determining 2,4-D and Deltamethrin by HPLC

**E. V. Melikhova, O. V. Farafonova**

Elena V. Melikhova, <https://orcid.org/0000-0002-6256-2848>, Lipetsk State Technical University, 30 Moskovskaya St., Lipetsk 398055, Russia; Moscow State University of Technology and Management, K. G. Razumovsky (First Cossack University), 73 Earth Shaft St., Moscow 109004, Russia, [mev80@yandex.ru](mailto:mev80@yandex.ru)

Olga V. Farafonova, <https://orcid.org/0000-0002-2234-9321>, Lipetsk State Technical University, 30 Moskovskaya St., Lipetsk 398055, Russia, [farafonova.ov@mail.ru](mailto:farafonova.ov@mail.ru)

The paper presents the results of optimizing the conditions for the chromatographic determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and deltamethrin for two capillary columns (Supelcosil LC-18, Kromasil C-18). The modes of individual chromatography of pesticides were selected. The use of the isocratic elution mode in the joint presence of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and deltamethrin was



shown and experimentally proved to be invalid. Three options were proposed for the conditions of the gradient mode of the separate detection of analytes in a mixture. The developed technique for the chromatographic separate determination of 2,4-D and deltamethrin with their joint presence was tested via analysis of river water and potato samples.

**Keywords:** high-performance liquid chromatography, gradient and isocratic modes, pesticides.

Received: 29.04.2020 / Accepted: 12.05.2020 / Published: 30.11.2020

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

## References

1. Bol'shakov D. S., Amelin V. G. Determination of pesticides in environmental materials and food products by capillary electrophoresis. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 71, no. 10, pp. 965–1013 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061934816100026
2. Bol'shakov D. S., Amelin V. G., Tret'yakov A. V. Determination of herbicides and their metabolites in natural waters by capillary zone electrophoresis combined with dispersive liquid-liquid microextraction and on-line preconcentration. *Journal of Analytical Chemistry*, 2014, vol. 69, no. 1, pp. 72–82 (in Russian). DOI: 10.1134/S106193481311004X
3. Farina Y., Pauzi Bin Abdullah, Bibi N. Extraction Procedures in Gas Chromatographic Determination of Pesticides. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 71, no. 4, pp. 339–350. DOI: 10.1134/S1061934816040092
4. Eremin S. A., Boroduleva A. Yu. Determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in cereals by fluorescence polarization immunoassay. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 71, no. 9, pp. 949–954 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061934816090045
5. Amelin V. G., Andoralov A. M. High-performance liquid chromatography–time-of-flight mass spectrometry in the identification and determination of 111 pesticides in food, feed, water, and soil. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 71, no. 1, pp. 82–93 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044450215120038
6. Amelin V. G., Bol'shakov D. S., Andoralov A. M. Screening and determination of pesticides from various classes in natural water without sample preparation by ultra hplc–high-resolution quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2018, vol. 73, no. 3, pp. 257–265 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061934815120035
7. Bol'shakov D. S., Amelin V. G., Tret'yakov A. V. Determination of polar pesticides in soil by micellar electrokinetic chromatography using QUECHERS sample preparation. *Journal of Analytical Chemistry*, 2014, vol. 69, no. 1, pp. 89–97 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061934814010055

## Cite this article as:

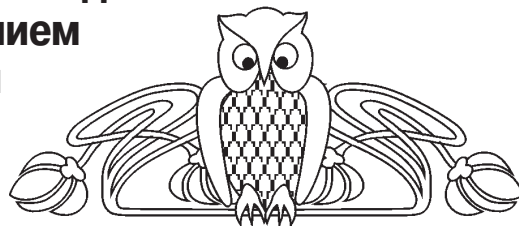
Melikhova E. V., Farafonova O. V. Optimization of the Conditions for Determining 2,4-D and Deltamethrin by HPLC. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 372–377 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-372-377>





УДК 543.645:543.054:543.544.943.3

## Хроматографическое определение мельдония с предварительным концентрированием методом твердофазной экстракции на наночастицах магнетита



Е. Г. Сумина, И. С. Решетникова, В. З. Углонова, Н. А. Юрасов

Сумина Елена Германовна, доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, suminaeg@yandex.ru

Решетникова Ирина Сергеевна, кандидат химических наук, эксперт технико-технологической экспертизы музейных экспонатов, Саратовский государственный художественный музей имени А. Н. Радищева, Irkasar@yandex.ru

Углонова Варсения Загидовна, кандидат химических наук, доцент кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, uglanovav@mail.ru

Юрасов Николай Александрович, кандидат химических наук, заведующий мобильной экологической лабораторией Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, nik-yurasov@yandex.ru

В проведенном исследовании разработан комплексный метод определения мельдония, основанный на сочетании магнитного твердофазного концентрирования аналита на наночастицах магнетита, модифицированного катионами бромида цетиламмония (ЦТАБ) и последующего его определения методом тонкослойной хроматографии (ТСХ). Изучено влияние ряда факторов: pH, массы сорбента, времени сорбции и перемешивания на сорбцию мельдония и определены оптимальные условия извлечения. Установлено, что количественная сорбция протекает за 20 мин со степенью извлечения мельдония 88%. Найден элюент – этанол, позволяющий на 95% десорбировать аналит. Проведено сравнение градуировочных зависимостей, построенных без концентрирования и при концентрировании мельдония. Установлено, что применение концентрирования двумя мг наномангнетита, модифицированного ЦТАБ, в 5 раз уменьшает нижнюю границу определяемых содержаний мельдония в 25 мл раствора.

**Ключевые слова:** мельдоний, магнитная твердофазная экстракция, магнетит, наночастицы, тонкослойная хроматография.

Поступила в редакцию: 28.06.2020 / Принята: 08.07.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-378-386>

### Введение

Мельдоний ((3-(2,2,2-триметилгидразиния) пропионат) относится к классу четвертичных аммониевых соединений и находит широкое применение в терапевтической практике для лечения нарушений мозгового и сердечного кровообращения, ишемической болезни сосудов головного мозга, хронической сердечной недостаточности [1–3], ранее использовался в спортивной медицине [1]. Это приводит к необходимости его определения как в фармацевтических препаратах, так и в биологических жидкостях.

Для определения мельдония в основном используют высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ) в тандеме с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС/МС) на обращенной фазе в подвижных фазах ацетонитрил–вода [4–12]. Из электрохимических методов можно отметить вольтамперометрию [13–15], а из электрофоретических – капиллярный электрофорез [16].

Однако для прямого определения низких содержаний мельдония в сложной матрице чувствительности этих методов недостаточно. В этом случае нужно использовать концентрирование, например жидкостно-жидкостную или твердофазную экстракцию (ТФЭ). Последний метод, основанный на использовании различных твердых сорбентов, пришел в аналитическую практику в конце XX в. [17–21]. В последнее десятилетие появился его новый вариант – магнитная твердофазная экстракция (МТФЭ), основанная на использовании для извлечения (сорбции) аналита коллоидного раствора магнитного наносорбента, который отделяют от жидкой матрицы с помощью внешнего магнитного поля, заменяя, таким образом, традиционные приемы центрифугирования и фильтрации. Основные преимущества этого метода охарактеризованы в работах [22–29].

Согласно литературным данным [27, 30, 31], в качестве сорбентов в методе МТФЭ используют различные магнитные наночастицы (МНЧ), чаще всего магнетит  $Fe_3O_4$ , поверхность которого модифицируют неорганическими и органическими соединениями для предотвращения агрегации,



увеличения эффективности и селективности сорбции различных веществ. Сорбционное концентрирование мельдония с использованием магнитных наночастиц не описано.

В связи с этим цель настоящей работы состояла в комплексном использовании концентрирования мельдония МНЧ и последующем его определении методом тонкослойной хроматографии, разработанным нами ранее [32].

### Материалы и методы

**Реагенты.** Использовали мельдоний (Мд) – раствор для инъекций «Милдронат» (*Grindex*, Латвия), с содержанием Мд 100 мг/мл.

Исходный водный раствор Мд (20 мг/мл) готовили разбавлением раствора для инъекций, рабочие растворы – разбавлением исходных непосредственно перед использованием. До проведения эксперимента растворы исследуемого вещества хранили в холодильной камере.

Магнетит синтезировали в деионизированной воде смешиванием  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (99,8%, *Aldrich*) с гидроксидом натрия (99,8%, *Fluka*) [33]. Для создания инертной среды через раствор пропускали азот. Магнетит стабилизировали и модифицировали катионным поверхностно-активным веществом (ПАВ) – бромидом цетилтриметиламмония (ЦТАБ), по методике [34].

Для приготовления подвижной фазы в ТСХ использовали мицеллярный водный раствор хлорида цетилпиридиния (ЦПХ) (*НПО «Синтез ПАВ»*, Россия). Препарат ПАВ содержал не менее 96% основного вещества.

Использовали ацетатно-аммиачные буферные растворы (ААБ), которые готовили смешиванием необходимых количеств 2 М растворов уксусной кислоты и аммиака согласно методике [35].

**Аппаратура.** Измерение дзета-потенциала частиц гидрозоля в растворах магнетита проводили на анализаторе *Zetasizer Nano-Z (Malvern Instruments Ltd, Великобритания)*. Размеры наночастиц магнетита и толщину покрытия ЦТАБ определяли методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием просвечивающего электронного микроскопа *Libra 120 (Carl Zeiss, Германия)* при ускоряющем напряжении 120 кВ.

Количественное определение Мд проводили методом восходящей ТСХ на коммерческих пластинках *Сорбфил* на полимерной подложке (ПП), в мицеллярной подвижной фазе на основе ЦПХ [32]. Детектирование и количественные измерения хроматограмм в ТСХ проводили на видеоденситометре *Сорбфил (Сорбполимер, Россия)*.

### Результаты и их обсуждение

Анализ публикаций, посвященных применению магнитных наночастиц, показал, что МНЧ, как правило, обладают низкой агрегативной устойчивостью [31]. Для них характерно быстрое межчастичное взаимодействие и укрупнение, с последующей агрегацией в растворе. В связи с этим при синтезе МНЧ их поверхность стабилизировали и модифицировали катионами ЦТАБ [25, 26].

Результаты анализа синтезированных частиц согласуются с ранее опубликованными данными литературы [34]. Так, наночастицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4@$ ЦТАБ в основном имеют сферическую форму со средним диаметром  $8 \pm 2$  нм и толщиной оболочки  $1,0 \pm 0,1$  нм и также агрегированы в более крупные структуры. Установлено, что  $\zeta$ -потенциал на их поверхности максимален в кислой среде и при pH 3,2 составляет +43 мВ [25]. Это свидетельствует о наибольшей устойчивости коллоидного раствора МНЧ в этой области pH, поэтому можно полагать, что максимальная сорбция мельдония также будет лучше проходить в слабокислой среде.

#### Сорбция мельдония на магнитных наночастицах, модифицированных ЦТАБ

Эффективность сорбции изучали, определяя методом ТСХ содержание мельдония в растворе после отделения наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  магнетитом. Значения степени извлечения ( $R$ , %) рассчитывали по формуле (1):

$$R, \% = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100, \quad (1)$$

Значения степени десорбции ( $R_d$ , %) рассчитывали по формуле (2):

$$R_d, \% = \frac{C_{p-p}}{C_0 - C_{p-p}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $C_{p-p}$  – концентрация десорбированного мельдония, рассчитанная по уравнению градуировочной зависимости ( $M$ ),  $C_0$  – исходная концентрация вещества в растворе ( $M$ ).

Известно, что на сорбцию и концентрирование веществ на МНЧ оказывают влияние различные факторы: pH среды, масса сорбента, время сорбции, а также время и способ перемешивания раствора. Поэтому при выборе оптимальных условий сорбции Мд проводили их варьирование.

Полученные результаты представлены на рис. 1. Влияние pH исследовали в интервале pH 3–10 ААБ (см. рис. 1, а). Установлено, что максимальное значение  $R$ , равное 88 % Мд, достигается при pH 5,0. Это связано с электростатическим взаимодействием диссоциированной в этой области карбоксильной группы аналита и положительно



заряженной поверхности сорбента. В более кислой области Мд не сорбировался вследствие значительного уменьшения этого взаимодействия.

Влияние массы сорбента на степень извлечения показано на рис. 1, б. Видно, что при

постоянном значении pH 5,0 и увеличении массы сорбента от 0,5 до 2,5 мг значения  $R$  также увеличивались. При концентрации мeldonия в растворе 20 мг/мл для его количественного извлечения со значением  $R = 88\%$  достаточно 2 мг магнетита.

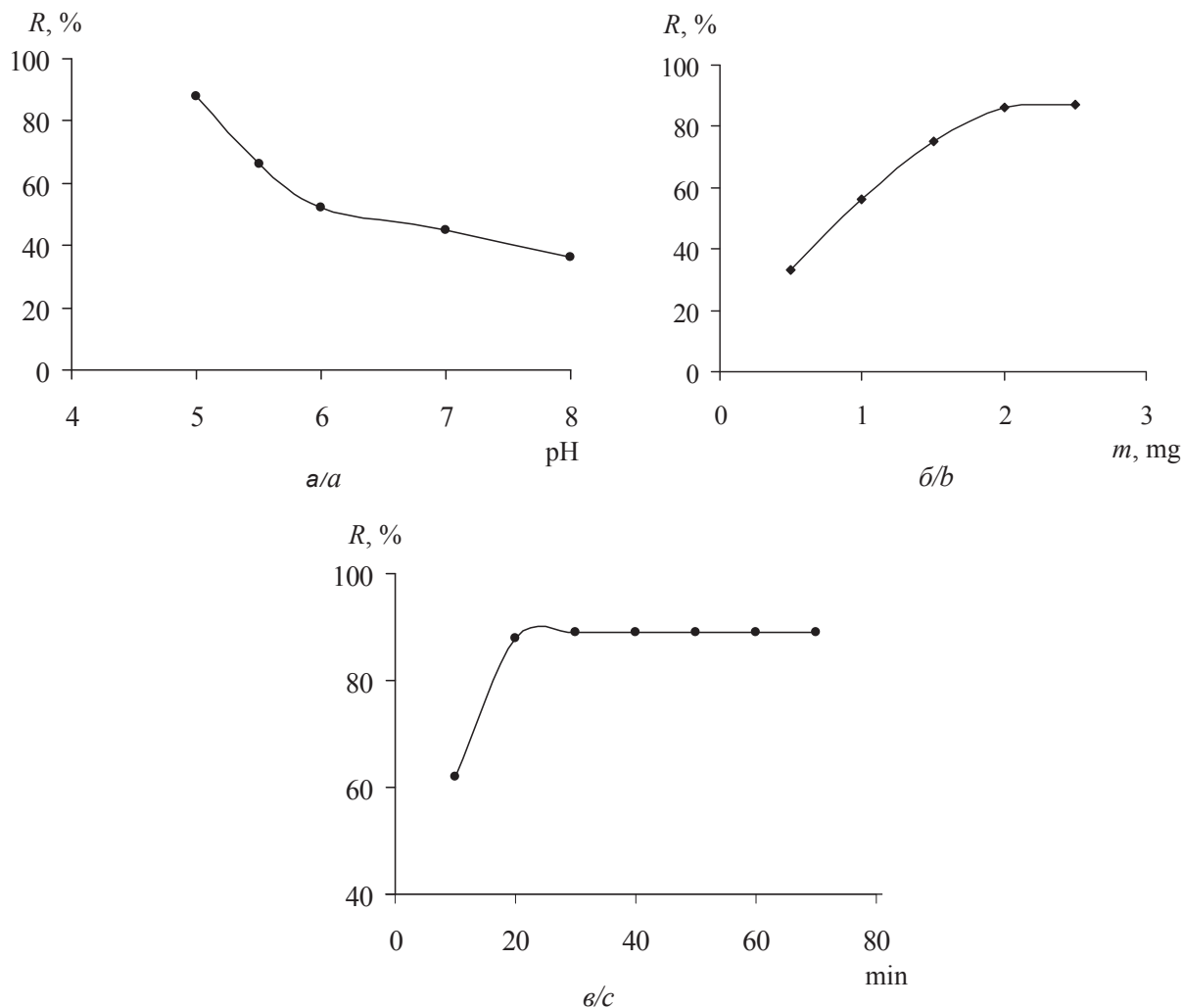


Рис. 1. Зависимость степени извлечения мeldonия на  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ЦТАБ$  от pH среды (а), массы сорбента (б), времени перемешивания (в). pH 5 ААБ, механическое перемешивание.  $C_{\text{Мд}} = 20$  мг/мл

Fig. 1. The dependence of the extraction degree of meldonium on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@CTAB$  on the pH of the medium (a), sorbents mass (b), and mixing time (c). pH 5 ААБ, mechanical stirring.  $C_{\text{Mд}} = 20$  mg/ml

**Влияние времени перемешивания.** Исследуемый раствор объемом 5 мл, полученный путём смешивания ААБ pH 5 и 2,0 мг магнитных наночастиц, модифицированных ЦТАБ, механически перемешивали в течение 3; 5; 10; 15; 30; 45; 60; 75 мин (см. рис. 1, в). Установлено, что сорбционное равновесие для мeldonия достигается за 20 мин, а степень извлечения в этом случае также составляет 88%.

Анализ представленных рисунков позволил найти оптимальные условия сорбции из 25 мл раствора Мд с концентрацией 20 мг/мл.

Сорбция максимальна ( $88 \pm 1$ ) % при pH 5,0, механическом перемешивании 20 мин и массе сорбента 2 мг.

#### Десорбция мeldonия с поверхности магнитных наночастиц, модифицированных ЦТАБ

При выборе условий десорбции апробировали этанол, ацетонитрил и их смеси с уксусной кислотой. Оптимальным оказался этанол, объем которого варьировали от 1,0 до 5,0 мл.

Установлено, что максимальная степень десорбции ( $R_{\text{д}} = 95\%$ ) Мд достигается уже при ис-





пользовании 1 мл этанола (рис. 2, а). С увеличением объема элюента  $R_D$  линейно уменьшается до 10%.

Для оптимизации условий десорбции также варьировали время механического перемешивания (см. рис. 2, б) от 1 до 60 мин. Из рис. 2, б следует, что при использовании 1 мл этанола и механическом перемешивании в течение 20 мин количественная десорбция Мд составляет 95%.

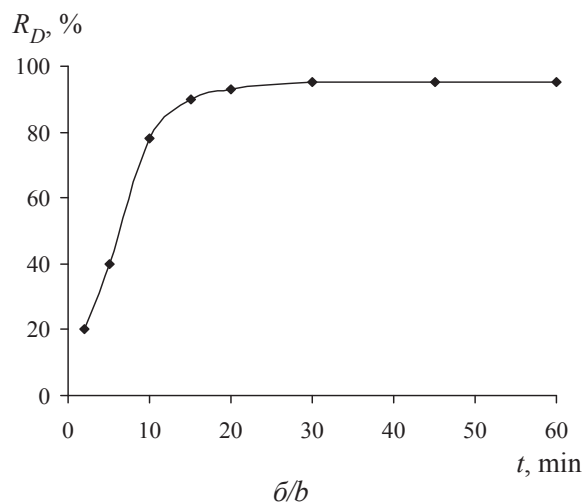
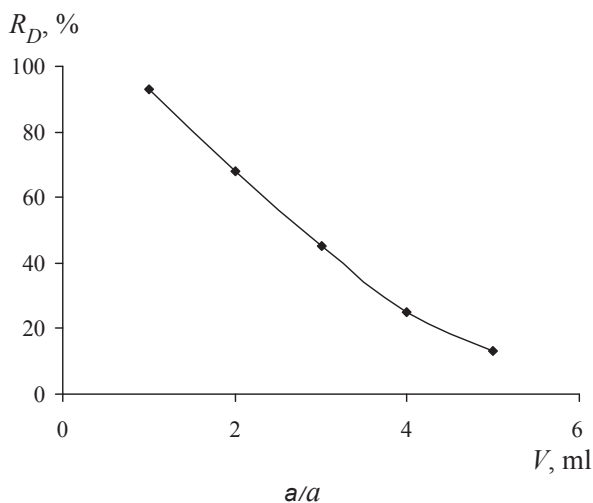


Рис. 2. Зависимость степени десорбции мельдония от объема этанола (а) и времени перемешивания (б). рН 5 ААБ, механическое перемешивание.  $m_{\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ЦТАБ}} = 2$  мг.  $C_{\text{Мд}} = 20$  мг/мл

Fig. 2. The dependence of the desorption degree of meldonium on the volume of ethanol (a) and the mixing time (b). pH 5 ААБ, mechanical stirring.  $m_{\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CTAB}} = 2$  mg.  $C_{\text{Md}} = 20$  mg/ml

На основании сравнения интервалов линейности градуировочных зависимостей ТСХ-определения Мд без концентрирования и при наномангнитном концентрировании из 25 мл водного раствора установлено, что при-

менение концентрирования позволило в 5 раз уменьшить нижнюю границу определяемых содержаний Мд с 2,0 до 0,4 мг/мл и уменьшить предел обнаружения более чем в 4,5 раза (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Метрологические характеристики определения мельдония без концентрирования (1) и при концентрировании наномангнетитом (2) из объема 25 мл раствора Мд, масса сорбента 2 мг, рН 5,0**  
**Metrological characteristics of the determination of meldonium with(1) and without concentration by nanomagnetite (2) from a volume of 25 ml of Md solution, sorbent mass 2 mg, pH 5,0**

Аналит / Analyte	Условия / Conditions	Диапазон определяемых содержаний, мг/мл / The range of the designated contents, mg/ml	$R^2$	Уравнение градуировочной зависимости / The equation of the calibration dependence
Мд / Md	1	2,0–16,0	0,993	$y = 314,7x + 949,8$
	2	0,4–1,9	0,992	$y = 1487,5x + 1020,5$

**Количественное определение мельдония в фармацевтическом препарате методом тонкослойной хроматографии**

Для определения Мд был использован препарат «Кардионат», содержащий 250,0 мг Мд. В связи с высоким содержанием мельдония последовательно проводили разбавление препарата в 100 раз. С помощью микродозатора отбирали аликвотные доли (1 мкл) полученного раствора и наносили на стартовую линию хроматографических пластин Сорбфил (ПП).

Хроматографический процесс осуществляли без предварительного насыщения камер водно-

мицеллярной подвижной фазой на основе ЦПХ ( $C_{\text{ЦПХ}} = 8 \cdot 10^{-4}$  моль/л). После хроматографирования пластины сушили на воздухе в течение 3–5 мин, затем в сушильном шкафу при температуре 90–100° С до полного удаления элюента (~5 мин). Затем пластину опрыскивали свежеприготовленным раствором перманганата калия ( $C_{\text{KMnO}_4} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  М). После опрыскивания пластины снова помещали в сушильный шкаф на 5 мин до проявления хроматографических зон, окрашенных в желтый цвет (рис. 3).

Установлено, что величины подвижности Мд в индивидуальном препарате и объекте



Рис. 3. Хроматограммы мeldonия в стандартном растворе (1) и исследуемом объекте «Кардионат» (2). НФ: Сорбфил (ПП). ПФ: ЦПХ ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  М) – вода

Fig. 3. Chromatograms of meldonium in standard solutions (1) and the studied object «Cardionate» (2). SP: Sorbfil (PP). MP: CPCh ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  M) – water

совпадают, что является основой надежной идентификации и количественного определения мeldonия (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что найденное содержание мeldonия соответствует паспортному. Правильность определения контролировали методом «введено-найдено» (табл. 3).

### Заключение

Методом магнитной твердофазной экстракции изучена сорбция мeldonия на наночастицах магнетита, модифицированных бромидом цетилтриметиламмония  $Fe_3O_4@CTAB$ . Показано, что наибольшая степень извлечения мeldonия (88%) из объема 25 мл достигается при pH 5,0, времени механического перемешивания 20 мин и массе сорбента 2,0 мг, время десорбции составляет 30 мин ( $R_d = 95\%$ ). Сочетание метода МТФЭ с ТСХ может быть

Таблица 2 / Table 2

**Результаты определения мeldonия в препарате «Кардионат» методом ТСХ. НФ: Сорбфил (ПП). ПФ: ЦПХ ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  М) – вода,  $n = 3, P = 0,95$**   
**The results of the determination of meldonium in the preparation «Cardionate» by TLC. SP: Sorbfil (PP). MP: CPCh ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  M) – water,  $n = 3, P = 0,95$**

№ опыта / No. experience's	Найдено Мд, мг/мл / Found Md, mg/ml	$x \pm \Delta x$ , мг/мл / $x \pm \Delta x$ , mg/ml	$S_r$	Содержание Мд в капсуле, мг / Md content in a capsule, mg	
				Найдено / Found	Паспортные данные / Passport information
1	9,8	$9,8 \pm 0,2$	0,07	245	250
2	9,8				
3	9,7				

Таблица 3 / Table 3

**Результаты определения мeldonия методом «введено-найдено» с помощью мицеллярной ТСХ. НФ: Сорбфил (ПП). ПФ: ЦПХ ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  М) – вода,  $n = 3, P = 0,95$**   
**The results of the determination of meldonium using the method of «entered-found» using micellar TLC. SP: Sorbfil (PP). MP: CPCh ( $8,0 \cdot 10^{-4}$  M) – water,  $n = 3, P = 0,95$**

Введено, Мд, мг/мл / Introduced, Md, mg/ml	Найдено, Мд, мг/мл / Found, Md, mg/ml	$S_r$
5	$5,0 \pm 0,2$	0,10
7	$7,1 \pm 0,3$	0,12
9	$8,9 \pm 0,1$	0,03

применено для определения низких содержаний Мд в исследуемых образцах. При высоком содержании Мд определение аналита возможно только методом ТСХ с относительной погрешностью, не превышающей 10%.

### Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю гранта доктору химических наук, профессору, заслуженному деятелю науки Российской Федерации Сергею Николаевичу Штыкову за ценные консультации при освоении метода магнитной твердофазной экстракции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-03-01029а).

### Список литературы

- Горбунова А. А., Киреев С. Ю., Рашевская И. В. Мельдоний : связь строения, структуры и свойств // Вестник Пенз. гос. ун-та. 2017. № 2 (17). С. 92–99.
- Верткин А. Л., Ховасова Н. О., Пишеничникова В. В., Алексеев М. А., Абдулаева А. У. Мельдоний : эффективные точки применения // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2013. Т. 12, № 2. С. 94–97.
- Самородская И. В. Мельдоний : обзор результатов исследований // РМЖ. 2013. Т. 21, № 6. С. 1818–1822.



4. Сапрыкин Л. В., Сердан А. А., Сапрыкина Л. В. Прямой анализ бетаинов в биологических жидкостях методом ВЭЖХ // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6, вып. 1. С. 114–122.
5. Азарян А. А., Темердашев А. З., Дмитриева Е. В. Определение мельдония в моче человека методом ВЭЖХ с tandemным масс-спектрометрическим детектированием // Журн. аналит. химии. 2017. Т. 72, № 10. С. 885–889.
6. Lv Y.-F., Hu X., Bi K.-S. Determination of mildronate in human plasma and urine by liquid chromatography-tandem mass spectrometry // J. Chromatogr. B. 2007. Vol. 852. P. 35–39.
7. Cai L.-J., Zhang J., Peng W.-X., Zhu R.-H., Yang J., Cheng G., Wang X.-M. Determination of Mildronate in Human Plasma and Urine by UPLC-Positive Ion Electrospray Tandem Mass Spectrometry // Chromatogr. 2011. Vol. 73. P. 659–665.
8. Сорокоумов П. Н., Савельева Е. И., Каракашев Г. В., Копейкин В. А., Радилов А. С. Определение мельдония, гамма-бутиробетаина и карнитина в плазме крови методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-селективным детектированием // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2016. № 1 (14). С. 176–183.
9. Пат. 217.015.F80B, 29.12.2017. Азарян А. А., Темердашев А. З., Киселева Н. В. Способ определения мельдония в моче человека.
10. Ye Peng, Jing Yang, Zhirui Wang, Jingwen Wang, Yu Liu, Zhuo-Jing Luo, Aidong Wen. Determination of mildronate by LC-MS/MS and its application to a pharmacokinetic study in healthy Chinese volunteers // J. Chromatogr. B. Analytical technologies in the biomedical and life sciences 2010. Vol. 878. P. 551–556. DOI: 10.1016/j.jchromb.2009.12.030
11. Wang J., Hu X.-J., Ni K.-Y. Determination of netilmicin sulfate and its related substances by HPLC-ELSD and HPLC-MSn // Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences. 2006. Vol. 41. P. 1268–1271.
12. Vaz F. M., Melegh B., Bene J., Cuebas D., Gage D. A., Bootsma A., Vreken P., Gennip A. H. van, Bieber L. L., Wanders R. J. A. Analysis of carnitine biosynthesis metabolites in urine by HPLC-electrospray tandem mass spectrometry // Clin. Chem. 2002. № 48. P. 826–834. DOI: 10.1093/clinchem/48.6.826
13. Мезенцева О. Л., Слепченко Г. Б. Использование модифицированных углеродсодержащих электродов для определения мельдония в биологических объектах // Аналитика Сибири и Дальнего Востока : материалы X Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Барнаул, 12–17 сентября 2016 г.). Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2016. С. 80–81.
14. Мезенцева О. Л., Крюковский В. П. Определение и распознавание мельдония и L-карнитина с использованием графитового электрода, модифицированного арендиазоном // Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XX Всерос. науч.-практ. конф. им. проф. Л. П. Кулѣва студентов и молодых ученых с междунар. участием. Томск : ТПУ, 2019. С. 313.
15. Mezentseva O. L., Slepchenko G. B., Cybikova S. B. The possibility of voltammetric determination of meldonium on carbon-containing electrodes // Theoretical and experimental chemistry : Abstracts of the VIth Intern. sci. conf. Karaganda : Publ. House of KSU, 2017. P. 39.
16. Гаврилин М. В., Мудрецова Ю. В., Сенченко С. П., Рожнова С. А. Разработка методики количественного определения холина альфосцерата и мельдония методом капиллярного электрофореза // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2012. Т. 10, № 4. С. 12–17.
17. Andreu V., Blasco C., Picom Y. Analytical strategies to determine quinolone residues in food and the environment // Trends Anal. Chem. 2007. Vol. 26, № 6. P. 534–556. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2007.01.010>
18. Bailac S., Ballesteros O., Jiménez-Lozano E., Barrón D., Sanz-Nebot V., Navalov A., Vilchez J. L., Barbosa J. Determination of quinolones in chicken tissues by liquid chromatography with ultraviolet absorbance detection // J. Chromatogr. A. 2004. Vol. 1029. P. 145–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2003.11.110>
19. Czyrski A. Analytical Methods for determining third and fourth generation fluoroquinolones: A review // Chromatographia. 2017. Vol. 80, № 2. P. 181–200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10335>
20. Watabe S., Yokohama Y., Nakazawa K., Shinozaki K., Hiraoka R., Takeshita K., Suzuki Y. Simultaneous measurement of pazufloxacin, ciprofloxacin, and levofloxacin in human serum by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection // J. Chromatogr. B. 2010. Vol. 878. P. 1555–1561. DOI: 10.1016/j.jchromb.2010.04
21. Федотов П. С., Малофеева Г. И., Савонина Е. Ю., Спиваков Б. Я. Твердофазная экстракция органических веществ: нетрадиционные методы и подходы // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74, № 3. С. 163–172. DOI: 10.1134/S0044450219030046
22. Lucena R., Simonet B. M., Cárdenas S., Valcárcel M. Potential of nanoparticles in sample preparation // J. Chromatogr. A. 2011. Vol. 1218, № 4. P. 620–637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.11.042>
23. Aguilar-Arteaga K., Rodríguez J. A., Barrado E. Magnetic solids in analytical chemistry: A review // Anal. Chim. Acta. 2010. Vol. 674, № 2. P. 157–165. DOI: 10.1016/j.aca.2010.06.043
24. Wierucka M., Biziuk M. Application of magnetic nanoparticles for magnetic solid-phase extraction in pre-paring biological, environmental and food samples // Trends Anal. Chem. 2014. Vol. 59. P. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.04.007>
25. Егунова О. Р., Константинова Т. А., Штыков С. Н. Магнитные наночастицы магнетита в разделении и концентрировании // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2014. Т. 14, вып. 4. С. 27–34.
26. Xie L., Jiang R., Zhu F., Liu H., Ouyang G. Application of functionalized magnetic nanoparticles in sample preparation // Anal. Bioanal. Chem. 2014. Vol. 406, № 2. P. 377–399. DOI: 10.1007/s00216-013-7302-6





27. Толмачева В. В., Аяри В. В., Кочук Е. В., Дмитриенко С. Г. Магнитные сорбенты на основе наночастиц оксидов железа для выделения и концентрирования органических соединений // Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71, № 4. С. 339–356. DOI: 10.7868/S0044450216040071
28. Dzhaneloda R. K., Petrov D. G., Shkinev V. M., Spivakov B. Y. DNA recovery from environmental samples on suspension columns under a combined action of ultrasound and magnetic fields followed by polymerase chain reaction detection // Mend. Comm. 2017. Vol. 27, № 3. P. 302–303. DOI: 10.1016/j.mencom.2017.05.029
29. Егунова О. Е., Штыков С. Н. Концентрирование некоторых антибиотиков фторхинолонового ряда методом магнитной твердофазной экстракции на наночастицах магнетита // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18, № 6. С. 825–835. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/610>
30. Пряжников Д. В., Киселева М. С., Кубракова И. В. Поверхностно-модифицированный магнитный наноразмерный сорбент для МТФЭ-ВЭЖХ-УФ определения 4-нонилфенола в природных водных объектах // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19, № 3. С. 220–229. DOI: <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2015.19.3.006>
31. Толмачева В. В., Аяри В. В., Ибрагимова Б. Н., Кочук Е. В., Дмитриенко С. Г., Золотов Ю. А. Полимерный магнитный сорбент на основе наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и сверхсшитого полистирола для концентрирования антибиотиков тетрациклинового ряда // Журн. аналит. химии. 2015. Т. 70, № 11. С. 1149–1157. DOI: 10.7868/S004445021511016X
32. Садов А. А., Сумина Е. Г., Сорокина О. Н., Углонова В. З. Хроматографическое определение мельдония и карнитина методом ТСХ с водно-органическими и мицеллярными подвижными фазами // Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: межвуз. сб. науч. тр. XII Всерос. конф. молодых ученых с междунар. участием (Саратов, 1–2 октября 2017 г.). Саратов: Саратовский источник, 2017. С. 103–104.
33. Егунова О. П., Решетникова И. С., Герман С. В., Казмирова К. О., Хабибуллин В. Р., Желобицкая Е. А., Штыков С. Н. Сорбционно-флуориметрическое определение энрофлоксацина с применением наночастиц магнетита, модифицированных полиэтиленгликолем // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, вып. 1. С. 48–52. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-1-48-52
34. Егунова О. П., Решетникова И. С., Казмирова К. О., Штыков С. Н. Магнитная твердофазная экстракция и флуориметрическое определение некоторых фторхинолонов // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75, № 1. С. 31–42. DOI: 10.31857/S0044450220010065
35. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 456 с.

#### Образец для цитирования:

Сумина Е. Г., Решетникова И. С., Углонова В. З., Юрасов Н. А. Хроматографическое определение мельдония с предварительным концентрированием методом твердофазной экстракции на наночастицах магнетита // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 378–386. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-378-386>

#### Chromatographical Analysis of Meldonium with Preliminary Concentration by Solid-Phase Extraction on Magnetite Nanoparticles

E. G. Sumina, I. S. Reshetnikova,  
V. Z. Uglanova, N. A. Yurasov

Elena G. Sumina, <https://orcid.org/0000-0002-7310-9459>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [suminaeg@mail.ru](mailto:suminaeg@mail.ru)

Irina S. Reshetnikova, <https://orcid.org/0000-0002-1240-5991>, Saratov State Art Museum named after A. N. Radishchev, 41 Radishchev St., Saratov 410000, Russia, [Irkasar@ya.ru](mailto:Irkasar@ya.ru)

Varseniya Z. Uglanova, <https://orcid.org/0000-0002-6638-4508>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [uglanovavz@mail.ru](mailto:uglanovavz@mail.ru)

Nikolay A. Yurasov, <https://orcid.org/0000-0003-0620-4680>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [nik-yurasov@yandex.ru](mailto:nik-yurasov@yandex.ru)

A comprehensive method for meldonium analysis, based on a combination of magnetic solid-phase concentration of the analyte on magnetite nanoparticles modified with cetylammmonium bromide (CTAB) cations

and its subsequent analysis by thin-layer chromatography (TLC) were developed in the process of study. The influence of a number of factors on meldonium sorption was studied, namely: pH, sorbent mass, sorption and mixing times; optimal extraction conditions were determined. It was found that quantitative sorption proceeded in 20 min with a meldonium extraction degree of 88%. Ethanol was found to be an eluent to desorb the analyte by 95%. The calibration dependences plotted with and without concentration of meldonium were compared. It was established that the use of concentration on two mg of CTAB-modified nanomagnetite reduces the lower limit of the analyzed contents of meldonium in 25 ml of solution by 5 times.

**Keywords:** meldonium, magnetic solid-phase extraction, magnetite, nanoparticles, thin-layer chromatography.

Received: 28.06.2020 / Accepted: 08.07.2020 / Published: 30.11.2020

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

**Acknowledgments:** *The authors are sincerely grateful to the research supervisor of the grant, Doctor of Chemical Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation Professor Sergey N. Shtykov for his valuable advice in their mastering of magnetic solid-phase extraction.*

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-03-01029a).*



## Reference

- Gorbunova A. A., Kireev S. Yu., Rashevskaya I. V. Meldonium: relationship of structure, structure and properties. *Vestnik of Penza State University*, 2017, no. 2 (17), pp. 92–99 (in Russian).
- Vertkin A. L., Khavasova N. O., Pshenichnikova V. V., Alekseev M. A., Abdullaeva A. U. Meldonium: effective action points. *Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2013, vol. 12, no. 2, pp. 94–97 (in Russian).
- Samorodskaya I. V. Meldonium: review of research results. *Russian Medical Journal*, 2013, vol. 21, no. 6, pp. 1818–1822 (in Russian).
- Saprykin L. V., Serdan A. A., Saprykina L. V. Direct analysis of betaines in biological fluids by HPLC. *Sorption and Chromatography Processes*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 114–122 (in Russian).
- Azaryan A. A., Temerdashev A. Z., Dmitrieva E. V. Determination of Meldonium in human urine by HPLC with tandem mass spectrometric detection. *Journal of Analytical Chemistry*, 2017, vol. 72, no. 10, pp. 1057–1060 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044450217100048
- Lv Y.-F., Hu X., Bi K.-S. Determination of mildronate in human plasma and urine by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. B*, 2007, vol. 852, pp. 35–39. DOI: 10.1016/j.jchromb.2006.12.031
- Cai L.-J., Zhang J., Peng W.-X., Zhu R.-H., Yang J., Cheng G., Wang X.-M. Determination of Mildronate in Human Plasma and Urine by UPLC-Positive Ion Electrospray Tandem Mass Spectrometry. *Chromatogr.*, 2011, vol. 73, pp. 659–665. DOI: 10.1007/s10337-010-1839-8
- Sorokoumov P. N., Savelieva E. I., Karakashev G. V., Kopeikin V. A., Radilov A. S. Determination of meldonium, gamma-butyrobetaine and carnitine in blood plasma by high-performance liquid chromatography with mass-selective detection. *Drug Development and Registration*, 2016, no. 1 (14), pp. 176–183 (in Russian).
- Azaryan A. A., Temerdashev A. Z., Kiseleva N. V. *Sposob opredeleniya mel'doniya v moche cheloveka* [Method for meldonium determination in human urine]. Patent RF № 217.015.F80B, 29.12.2017 (in Russian).
- Ye Peng, Jing Yang, Zhirui Wang, Jingwen Wang, Yu Liu, Zhuo-Jing Luo, Aidong Wen. Determination of mildronate by LC-MS/MS and its application to a pharmacokinetic study in healthy Chinese volunteers. *J. Chromatogr. B. Analytical technologies in the biomedical and life sciences*, 2010, vol. 878, pp. 551–556. DOI: 10.1016/j.jchromb.2009.12.030
- Wang J., Hu X.-J., Ni K.-Y. Determination of netilmicin sulfate and its related substances by HPLC-ELSD and HPLC-MSn. *Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences*, 2006, vol. 41, pp. 1268–1271.
- Vaz F. M., Melegh B., Bene J., Cuebas D., Gage D. A., Bootsma A., Vreken P., Gennip A. H. van, Bieber L. L., Wanders R. J. A. Analysis of carnitine biosynthesis metabolites in urine by HPLC-electrospray tandem mass spectrometry. *Clin. Chem.*, 2002, no. 48, pp. 826–34. DOI: 10.1093/clinchem/48.6.826
- Mezentseva O. L., Slepchenko G. B. Ispol'zovaniye modifitsirovannykh uglerodsoderzhashchikh elektrodov dlya opredeleniya mel'doniya v biologicheskikh ob'yektakh [Use of modified carbon-containing electrodes for the determination of Meldonium in biological objects]. *Analitika Sibiri i Dal'nego Vostoka: materialy X Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Analytics of Siberia and the Far East: materials of the X all-Russian scientific conference with international participation]. September 12–17, Barnaul, 2016. Barnaul, Izd-vo AltGU, 2016, pp. 80–81 (in Russian).
- Mezentseva O. L., Kryukovsky V. P. Opredeleniye i raspoznavaniye mel'doniya i L-karnitina s ispol'zovaniyem grafitovogo elektroda, modifitsirovannogo arendiazoniym [Determination and recognition of Meldonium and L-carnitine using a graphite electrode modified with arendiazonium]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XX Vseros. nauch.-prakt. konf. im. prof. L. P. Kul'eva studentov i molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiyem* [Chemistry and chemical technology in the XXI century: materials of the XX all-Russian scientific and practical conference named after Professor L. P. Kulev of students and young scientists with international participation]. Tomsk, TPU, 2019, pp. 313 (in Russian).
- Mezentseva O. L., Slepchenko G. B., Cybikova S. B. The possibility of voltammetric determination of meldonium on carbon-containing electrodes. *Theoretical and experimental chemistry: Abstracts of the VIth international scientific conf.* Karaganda, Publ. House of KSU, 2017, pp. 39.
- Gavrilin M. V., Mudretsova Yu. V., Senchenko S. V., Rozhnova S. A. Development of quantification method for determination of choline alfoscerate and meldonium by capillary electrophoresis. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 12–17 (in Russian).
- Andreu V., Blasco C., Pico Y. Analytical strategies to determine quinolone residues in food and the environment. *Trends Anal. Chem.*, 2007, vol. 26, no. 6, pp. 534–556. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2007.01.010>
- Bailac S., Ballesteros O., Jiménez-Lozano E., Barrón D., Sanz-Nebot V., Navalov A., Vilchez J. L., Barbosa J. Determination of quinolones in chicken tissues by liquid chromatography with ultraviolet absorbance detection. *J. Chromatogr. A*, 2004, vol. 1029, pp. 145–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2003.11.110>
- Czyrski A. Analytical Methods for determining third and fourth generation fluoroquinolones: A review. *Chromatographia*, 2017, vol. 80, no. 2, pp. 181–200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10335>
- Watabe S., Yokohama Y., Nakazawa K., Shinozaki K., Hiraoka R., Takeshita K., Suzuki Y. Simultaneous measurement of pazufloxacin, ciprofloxacin, and levofloxacin in human serum by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *J. Chromatogr. B.*, 2010, vol. 878, pp. 1555–1561. DOI: 10.1016/j.jchromb.2010.04
- Fedotov P. S., Malofeeva G. I., Savonina E. Y., Spivakov B. Y. Solid-Phase Extraction of Organic Substances:



- Unconventional Methods and Approaches. *Journal of Analytical Chemistry*, 2019, vol. 74, no. 3, pp. 205–212 (in Russian). DOI: 10.1134/S0044450219030046
22. Lucena R., Simonet B. M., Cárdenas S., Valcárcel M. Potential of nanoparticles in sample preparation. *J. Chromatogr. A*, 2011, vol. 1218, no. 4, pp. 620–637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.11.042>
23. Aguilar-Arteaga K., Rodriguez J. A., Barrado E. Magnetic solids in analytical chemistry: A review. *Anal. Chim. Acta*, 2010, vol. 674, no. 2, pp. 157–165. DOI: 10.1016/j.aca.2010.06.043
24. Wierucka M., Biziuk M. Application of magnetic nanoparticles for magnetic solid-phase extraction in pre-paring biological, environmental and food samples. *Trends Anal. Chem.*, 2014, vol. 59, pp. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.04.007>
25. Egunova O. R., Konstantinova T. A., Shtykov S. N. Magnetic nanoparticles in separation and preconcentration. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2014, vol. 14, iss. 4, pp. 27–34 (in Russian).
26. Xie L., Jiang R., Zhu F., Liu H., Ouyang G. Application of functionalized magnetic nanoparticles in sample preparation. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2014, vol. 406, no. 2, pp. 377–399. DOI: 10.1007/s00216-013-7302-6
27. Tolmacheva V. V., Apyari V. V., Kochuk T. V., Dmitrienko S. G. Magnetic adsorbents based on iron oxide nanoparticles for the extraction and preconcentration of organic compounds. *J. Analyt. Chem.*, 2016, vol. 71, no. 4, pp. 339–356. DOI: 10.7868/S0044450216040071
28. Dzheloda R. K., Petrov D. G., Shkinev V. M., Spivakov B. Y. DNA recovery from environmental samples on suspension columns under a combined action of ultrasound and magnetic fields followed by polymerase chain reaction detection. *Mend. Comm.*, 2017, vol. 27, no. 3, pp. 302–303. DOI: 10.1016/j.mencom.2017.05.029
29. Egunova O. R., Shtykov S. N. Preconcentration of some fluoroquinolone antibiotics by magnetic solid-phase extraction using magnetite nanoparticles. *Sorption and Chromatography Processes*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 825–835 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/610>
30. Pryazhnikova D. V., Kiseleva M. S., Rubrakova I. V. Magnetik surface-modified nanosized sorbents for MSPE-HPLC-UV determination in natural waters. *Analytics and Control*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 220–229 (in Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2015.19.3.006>
31. Tolmacheva V. V., Apyari V. V., Ibragimova B. N., Kochuk E. V., Dmitrienko S. G., Zolotov Y. A. A polymeric magnetic adsorbent based on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and hypercrosslinked polystyrene for the preconcentration of tetracycline antibiotics. *Journal of Analytical Chemistry*, 2015, vol. 70, no. 11, pp. 1149–1157. DOI: 10.7868/S004445021511016X
32. Sadov A. A., Sumina E. G., Sorokina O. N., Uglanova V. Z. Khromatograficheskoye opredeleniye mel'doniya i karnitina metodom T·SKH s vodno-organicheskimi i mitsellyarnymi podvizhnymi fazami [Chromatographic determination of Meldonium and carnitine by TLC with water-organic and micellar mobile phases]. *Sovremennyye problemy teoreticheskoy i eksperimental'noy khimii: mezhevuz. sb. nauch. tr. XII Vseros. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiyem* (1–2 oktyabrya 2017, Saratov) [Modern problems of theoretical and experimental chemistry. Intercollegiate collection of scientific papers of the XII all-Russian conference of young scientists with international participation]. Saratov, Saratovskiy istochnik Publ., 2017, pp. 103–104 (in Russian).
33. Egunova O. R., Reshetnikova I. S., German S. V., Kazimirova K. O., Khabibullin V. R., Zhelobitskaya E. A., Shtykov S. N. Sorption-fluorimetric Determination of Enrofloxacin with Magnetite Nanoparticles Modified by Polyethylenimin. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2016, vol. 16, iss. 1, pp. 48–52 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-1-48-52
34. Egunova O. R., Reshetnikova I. S., Kazimirova K. O., Shtykov S. N. Magnetic solid-phase extraction and fluorimetric definition of some ftorkhinolon. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 75, no. 1, pp. 31–42 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044450220010065
35. Lurye Yu. Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of analytical chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 456 p. (in Russian).

---

**Cite this article as:**

Sumina E. G., Reshetnikova I. S., Uglanova V. Z., Yurasov N. A. Chromatographical analysis of meldonium with preliminary concentration by solid-phase extraction on magnetite nanoparticles. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 378–386 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-378-386>

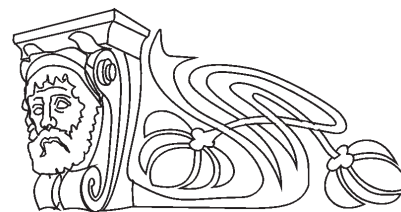
---





УДК 547.458:537.9+539.211

## Изучение поверхности пленок хитозана и его солей с органическими кислотами методом атомно-силовой микроскопии



Д. А. Руденко, Д. Н. Браташов, А. Б. Шиповская

Руденко Дарья Андреевна, кандидат химических наук, ведущий инженер Образовательно-научного института наноструктур и биосистем, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, darudenko@mail.ru.

Браташов Даниил Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инноватики на базе АО «САПКОН-НЕФТЕМАШ», Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dn2010@gmail.com

Шиповская Анна Борисовна, доктор химических наук, заведующий кафедрой полимеров на базе ООО «АКРИПОЛ» Института химии, начальник отдела высокомолекулярных соединений Образовательно-научного института наноструктур и биосистем, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, shipovskayaab@yandex.ru

Приведены результаты исследования морфологии и рельефа поверхности пленок хитозана солевой (С-) и основной (О-) химической формы методом атомно-силовой микроскопии. Пленки формировали из раствора полимера в уксусной, молочной, лимонной и янтарной кислотах. Для проведения химической реакции соль→основание хитозана использовали NaOH и триэтаноламин. Получены томограммы поверхности, определены основные морфологические характеристики и параметры шероховатости пленочных образцов. Установлено, что морфология, степень упорядоченности, среднеквадратичная шероховатость и высота неровностей поверхностного рельефа определяются химической формой полимера, природой используемой кислоты и реагентом реакции полимераналогичного превращения. Поверхность пленок хитозана С-формы характеризуется фибриллярным структурным упорядочением (для сукцината хитозана – еще и дендритообразованием), О-формы – глобулярным. Наименьший размер поверхностных надмолекулярных элементов реализуется для пленок хитозана С-формы, а наибольшая шероховатость – для пленок хитозана О-формы. Варьирование реагента химической реакции С→О-форма хитозана не влияет на морфологические характеристики пленок, однако отражается на шероховатости микрорельефа. Формирование более однородной основной пленки хитозана реализуется в среде органического основания. Высказано предположение, что формирование фибриллярных надмолекулярных структур обусловлено разворачиванием и распрямлением макроцепей вследствие отталкивания одноименно заряженных мономерных звеньев, глобулярных – сворачиванием и уплотнением макро клубков после нейтрализации совокупного заряда макроцепи.

**Ключевые слова:** хитозан, пленки, атомно-силовая микроскопия, морфология поверхности, параметры шероховатости.

Поступила в редакцию: 12.06.2020 / Принята: 22.06.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-387-394>

В настоящее время пленки хитозана находят широкое применение в качестве биомедицинских покрытий раневых поверхностей, ткане-инженерных конструкций, упаковочных материалов пищевых продуктов, биосенсоров различного назначения и др. [1–3]. Эффективность использования пленок хитозана для решения данных практических задач во многом определяется структурой их поверхности. Среди физико-химических методов визуализации топографических особенностей и анализа морфологического рельефа поверхности пленочных образцов наиболее распространенной является атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Традиционно пленки хитозана С- и О-формы получают из его растворов в уксусной кислоте. Морфологическая структура поверхности таких пленочных образцов достаточно детально изучена. Методом АСМ установлено, что рельеф поверхности пленок зависит от молекулярной массы и степени деацетилирования (СД) хитозана [4–7], концентрации исходного раствора для формирования пленочного образца [8, 9], химической формы полимера [4–17]. Так, свежеформованные пленки ацетата хитозана (С-форма) имеют практически равномерную и гладкую поверхность со среднеквадратичной шероховатостью  $R_a = 0.3–2.8$  нм [4, 8–13]. После перевода полимера в О-форму поверхность пленок становится менее однородной и значение  $R_a$  увеличивается до 5–24 нм [14–17]. Изменение топологии поверхности с увеличением коэффициента шероховатости наблюдается и для композитных пленок хитозана, получаемых из его смесей с природными (крахмал, целлюлоза, поли-L-лизин) или синтетическими полимерами (поливиниловый спирт, полиэтиленоксид) [10, 17–20], полиэлектролитных комплексов (с гиалуроновой кислотой или альгинатом) [21, 22], либо при введении добавок наночастиц (графен, наноглина) [9, 23–25],





жирных кислот (олеиновая, линолевая) [26], поверхностно-активных веществ (Твин 20, Твин 80) [26], ионов щелочных или щелочноземельных металлов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) [8].

Известны также исследования морфологии поверхности пленок хитозана, полученных из раствора полимера в одноосновных (муравьиной, молочной), двухосновных (щавелевой, малоновой, адипиновой, азелаиновой) и гидроксикарбоновых кислотах (гликолевой) [26–28]. При этом характер изменения топографии поверхности с увеличением параметра шероховатости пленок при переводе хитозана из С- в О-форму аналогичен пленкам, для формирования которых использовали уксусную кислоту. Исключение составляют пленки, отлитые из раствора хитозана в муравьиной кислоте, для которых перевод полимера в О-форму сопровождается сглаживанием поверхностного рельефа [27]. Отмечается, что пленки лактата и малоната хитозана показывают более гладкую поверхность и меньшее значение  $R_a$  по сравнению с пленкой из ацетата хитозана. Термообработка солевых пленок, полученных из раствора полимера в гликолевой кислоте, не влияет на структурную однородность их поверхности. Использование для растворения хитозана водных растворов дикарбоновых кислот значительно улучшает свойства пленочных образцов [28].

В настоящем исследовании для получения пленок хитозана выбраны молочная, лимонная, и янтарная кислоты. Они включены в государственную фармакопею РФ и применяются в медицине, косметологии, производстве пищевых продуктов. Для сравнения использовали пленки, полученные из растворов хитозана в уксусной кислоте.

*Цель данной работы* – исследование морфологии и рельефа поверхности пленок хитозана и его солей с уксусной, молочной, лимонной и янтарной кислотами методом атомно-силовой микроскопии.

### Материалы и методы

Объектами исследования являлись пленки хитозана С- и О-формы. Для их получения использовали порошкообразный хитозан со средневязкостной молекулярной массой  $M_n = 200$  кДа, СД = 82.0 мольн.% производства ЗАО «Биопрогресс» и водные растворы 2% уксусной (УксК), 4% лимонной (ЛимК), 2% молочной (МолК) и 1.5% янтарной (ЯнтК) кислот. Пленки формировали поливом 1.2 мас.% водно-кислотного раствора полимера на полиэтилентерефталатную подложку с последующим удалением жидкой

фазы при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении в течение 3–4 (ацетат и сукцинат хитозана) и 7–9 сут (цитрат и лактат хитозана). Получение готовой пленки фиксировали визуально по откреплению пленочного образца от подложки. Полимер в свежесформованных пленках находился в С-форме. Для перевода хитозана в О-форму пленочные образцы выдерживали в водных растворах 4% NaOH или 50% триэтаноламина (ТЭА) при модуле ванны 1:10 в течение часа, промывали дистиллированной водой до pH=7 и сушили на воздухе.

Влажность ( $W$ , %) пленочных образцов определяли гравиметрическим методом на аналитических весах OHAUS Discovery DV 215 CD (Швейцария), точность взвешивания  $\pm 0.0001$  г. Толщину ( $d$ , мкм) измеряли микрометром с ценой деления 10 мкм. Измерения проводили несколько раз на различных участках пленки и рассчитывали среднеарифметическое значение.

Поверхность пленок анализировали методом АСМ на установке NTEGRA Spectra (NTMDT-SI, г. Зеленоград) в полуконтактном режиме. Использовали кантилевер NSG 10 (Tipsnano) с жесткостью 2.5–10 Н/м, резонансной частотой 115–190 кГц и радиусом острия не более 10 нм. Перед измерением пленочные образцы приклеивали на двухсторонний скотч на стеклянную подложку. Обработку данных для удаления фона и артефактов проводили в программе Gwyddion [29]. По данным АСМ рассчитывали среднеквадратичную шероховатость ( $R_a$ ) поверхности пленочных образцов и определяли максимальную высоту неровностей ( $R_h$ ).

### Результаты и их обсуждение

Методом АСМ-микроскопии проведены оценки морфологического рельефа поверхности 12 пленок хитозана С- и О-формы, полученных из растворов в УксК, МолК, ЛимК и ЯнтК. Фазово-контрастные изображения топографии поверхности исследованных пленочных образцов представлены на рис. 1. Физико-химические характеристики пленок и описание поверхностных надмолекулярных элементов (морфология, размер) приведены в таблице. Сравнительный анализ основных параметров шероховатости поверхности образцов приведен на рис. 2.

Рассмотрим АСМ-топограммы пленок хитозана солевой формы. Поверхность пленки ацетата хитозана представлена фибриллярными надмолекулярными элементами диаметром  $\sim 1$  нм (см. рис. 1, а, таблица) и характеризуется сравнительно

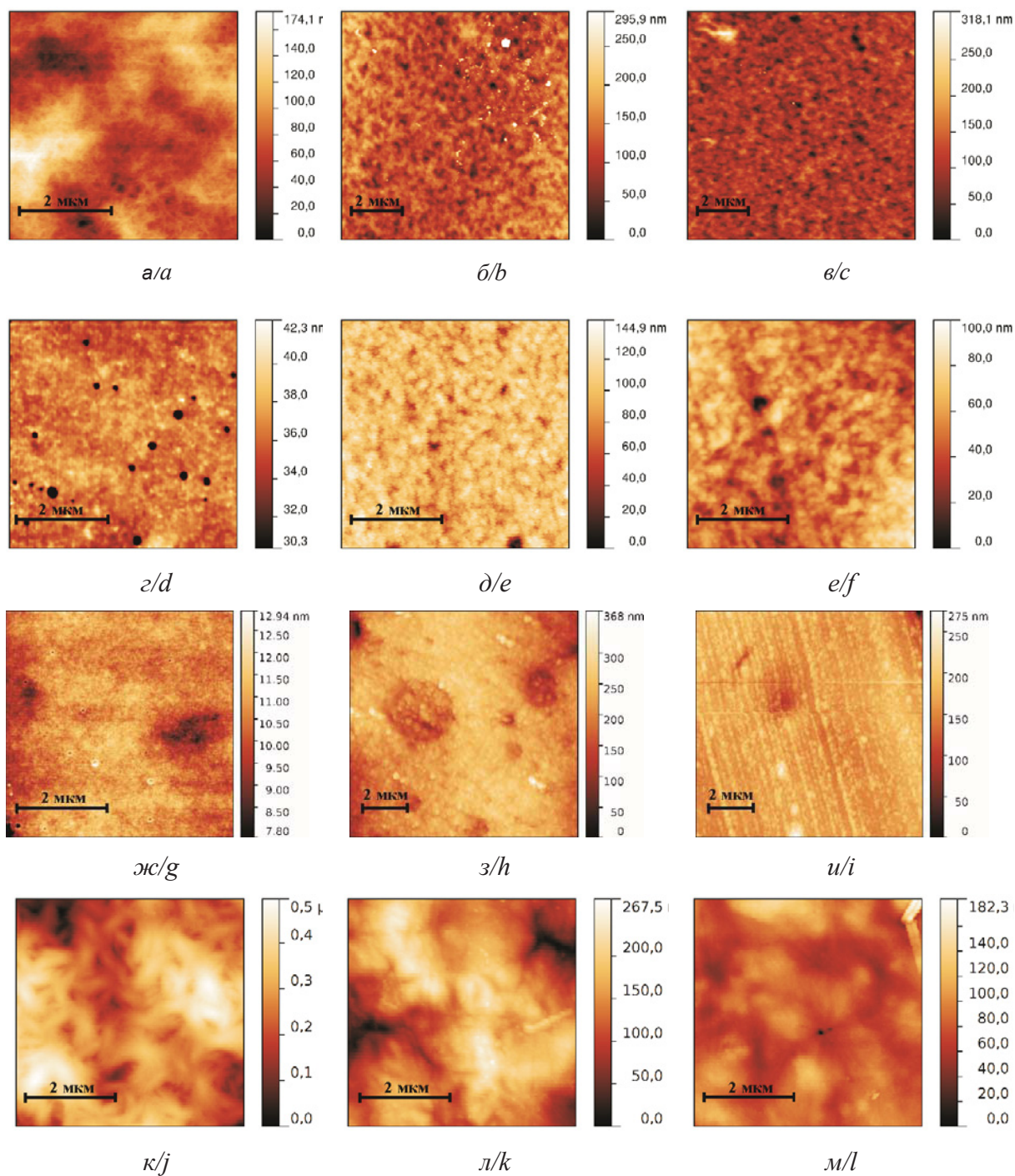


Рис. 1. АСМ-топограммы поверхности пленок хитозана солевой (а, г, ж, к) и основной формы, полученной в среде NaOH (б, д, з, л) и ТЕА (в, е, и, м). Здесь и на рис. 2 пленки сформированы из раствора полимера в УксК (а, б, в), МолК (г, д, е), ЛимК (ж, з, и) и ЯнтК (к, л, м)

Fig. 1. AFM topograms of the surface of chitosan films of the salt (a, d, g, j) and basic form obtained in a medium of NaOH (b, e, h, k) and TEA (c, f, i, l). Here and in Fig. 2 the films were formed from a polymer solution in AcA (a, b, c), LacA (d, e, f), CitA (g, h, i), and SucA (j, k, l)

гладкой поверхностью с невысокими значениями  $R_a$  и  $R_h$  (см. рис. 2). Поверхность пленок лактата и цитрата хитозана имеет аналогичную морфологию (см. рис. 1, г, ж), с той лишь разницей, что

наблюдается увеличение размера поверхностных надмолекулярных элементов (до ~100 и ~500 нм соответственно) и сглаживание микрорельефа образцов (см. рис. 2, таблица).



**Физико-химические характеристики пленок хитозана и описание надмолекулярных элементов их поверхности (по данным АСМ-топограмм)**  
**Physico-chemical characteristics of chitosan films and the description of the supramolecular elements of their surface (according to AFM topograms)**

Кислота / Acid	Химическая форма хитозана / Chemical form of chitosan	Реагент реакции С→О-форма хитозана / Chitosan S→B reagent	Влажность / Moisture content, W, %	Толщина, d, мкм / Thickness, d, μm	Поверхностные надмолекулярные элементы / Surface supramolecular elements	
					Морфология / Morphology	Размер, нм / Size, nm
УксК / AcA	C- / S-	–	20±2	50±5	Фибриллярная / Fibrillar	~1
	O- / B-	NaOH	15±1	83±3	Глобулярная / Globular	~100
ТЭА / TEA		16±2	70±5			
МолК / LacA	C- / S-	–	23±3	93±7	Фибриллярная / Fibrillar	~100
	O- / B-	NaOH	19±2	115±5	Глобулярная / Globular	~200–500
ТЭА / TEA		20±2	110±5			
ЛимК / CitA	C- / S-	–	25±4	75±5	Фибриллярная / Fibrillar	~500
	O- / B-	NaOH	21±2	100±5	Глобулярная / Globular	~500–700
ТЭА / TEA		20±2	100±5			
ЯнтК / SucA	C- / S-	–	17±2	50±5	Фибриллярно-ламеллярная дендритоподобная / Fibrillar-lamellar dendritic	~500
	O- / B-	NaOH	14±2	100±5	Глобулярная / Globular	~1000

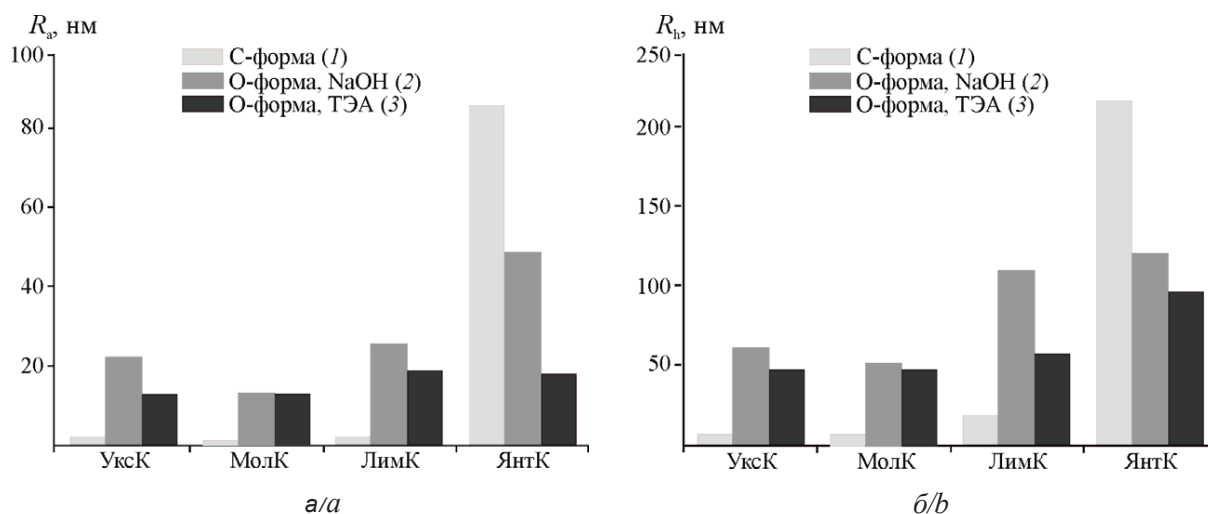


Рис. 2. Среднеквадратичная шероховатость (а) и максимальная высота неровностей (б), оцененные по данным АСМ-топограмм и профиля шероховатости поверхности, пленок хитозана солевой (1) и основной формы (2, 3), полученной в среде NaOH (2) и ТЭА (3)

Fig. 2. Root mean-square roughness (a) and the maximum height of irregularities (b), estimated according to AFM topograms and the surface roughness profile, chitosan films of the salt (1) and the basic form (2, 3) obtained in the medium of NaOH (2) and TEA (3)

Несколько другая структура наблюдается для пленки, сформированной из раствора полимера в ЯнтК (см. рис. 1, κ). Поверхность пленки сукцината хитозана представлена фибриллярно-ламеллярными дендритоподобными структурами размером ~500 нм и имеет высокую шероховатость (см.

рис. 2, таблица). Отметим, что подобные структуры наблюдались для пленок низкомолекулярного хитозана ( $M_n = 20$  кДа) [30] и его смесей с плуроником F-127 [31], а также пленок хитозана, полученных из раствора в бензойной кислоте [32]. Известно, что дендритообразование характерно





для веществ, имеющих большую склонность к кристаллизации, и реализуется при лимитированной диффузии реагентов. Учитывая кристаллическую природу хитозана и высокую температуру плавления ЯнтК ( $183^\circ\text{C}$ ) можно предположить, что формирование пленочного образца сукцината хитозана протекает в условиях, когда скорость кристаллизации полимерной системы обусловлена диффузионным массопереносом. Это не только способствует формированию дендритоподобных структур, но и отражается на параметрах шероховатости поверхностного слоя пленочного образца. Так, по сравнению с пленками ацетата, лактата и цитрата хитозана, значение среднеквадратичной шероховатости поверхности пленки сукцината хитозана возрастает в  $\sim 100$  раз, а максимальной высоты неровностей профиля поверхности – в  $\sim 10$  раз.

После проведения реакции полимераналогичного превращения соль  $\rightarrow$  основание хитозана морфология поверхности пленок приобретает специфичную глобулярную (зернистую) структуру с «зернами» практически круглой формы (см. рис. 1, б, в, д, е, з, и, л, м). Аналогичные результаты получены в работе [30] для пленок хитозана с  $\overline{M}_n = 250$  кДа, сформированных из раствора 0.3% УксК, структура поверхности которых состоит из глобул («зерен») диаметром  $\sim 30\text{--}300$  нм.

Размер «зерноподобных» поверхностных надмолекулярных элементов пленок хитозана О-формы существенно выше размера фибриллярных надмолекулярных образований пленок хитозана С-формы, полученных из растворов соответствующих кислот, и варьируется в зависимости от типа используемой кислоты (см. таблицу). Наименьший размер «зерен»,  $\sim 100$  нм, наблюдается для пленок, полученных с использованием УксК. Размер аналогичных надмолекулярных элементов пленки, полученной из раствора хитозана в МолК, увеличивается до  $\sim 200\text{--}500$  нм. Для пленочных образцов, сформированных из растворов полимера в ЛимК и ЯнтК, размер «зерен» составляет  $\sim 0.5\text{--}0.7$  и  $\sim 1$  мкм. Интересно, что для образцов, полученных из растворов в ЛимК, «зерна» ориентированы преимущественно в одном направлении (см. рис. 1, з, и).

Как и следовало ожидать, значения параметров шероховатости увеличиваются по сравнению с  $R_a$  и  $R_n$  солевых пленок, в среднем в  $\sim 10\text{--}20$  раз (см. рис. 2). Не соответствуют данной закономерности лишь пленки хитозана О-формы, полученные из ЯнтК, для которых наблюдается сглаживание макрорельефа, как и в случае пленок, полученных из муравьиной кислоты [27]. Такой характер изменения параметров шероховатости при переводе полимера из С- в О-форму

согласуется с высказанным предположением, что лимитирующей стадией формирования сукцината хитозана является диффузионный массоперенос.

Варьирование реагента химической реакции С $\rightarrow$ О-форма хитозана практически не влияет на морфологию и размер поверхностных надмолекулярных элементов, однако отражается на шероховатости поверхностного рельефа (см. рис. 2). Пленки хитозана О-формы, полученные с использованием NaOH, имеют более высокие значения среднеквадратичной шероховатости и максимальной высоты неровностей, по сравнению с образцами, полученными в среде ТЭА. При этом наиболее ярко выраженное «сглаживание» в случае использования ТЭА по сравнению с NaOH наблюдается для пленок, сформированных из растворов хитозана в ЛимК и ЯнтК.

Исходя из полученных экспериментальных данных можно предположить два варианта формирования надмолекулярных структур в исследованных пленочных образцах. Первый вариант реализуется в пленках хитозана солевой формы (см. рис. 1, а, г, ж, к). При растворении хитозана в водно-кислотной среде происходит солеобразование вследствие протонирования  $-\text{NH}_2$  групп макроцепи. Одноименно заряженные мономерные звенья, с одной стороны, вследствие эффекта отталкивания способствуют разбуханию макромолекулярных клубков, а с другой – препятствуют формированию сетки внутри- и межмолекулярных контактов. По мере испарения растворителя макромолекулы разворачиваются и формируют удлиненные фибриллярные надмолекулярные структуры. Во втором варианте, пленки основной формы (см. рис. 1, б, в, д, е, з, и, л, м), нейтрализация совокупного заряда макроцепи способствует сворачиванию и уплотнению макроклубков, что приводит к формированию надмолекулярных структурных элементов в виде «зерен» круглой формы. Размер и пространственное упорядочение последних определяется типом кислоты, используемой для растворения полимера при получении пленочного образца.

Таким образом, можно констатировать, что морфология, степень упорядоченности, среднеквадратичная шероховатость и высота неровностей поверхностного рельефа пленок хитозана определяются не только химической формой полимера, но и природой используемой для его растворения кислоты и реагентом реакции нейтрализации протонированных аминокрупп макроцепи. Полученные характеристики поверхностного рельефа пленочных образцов могут быть использованы для создания новых хитозансодержащих материалов биомедицинского назначения.





## Список литературы

1. Сливкин Д. А., Лапенко В. Л., Сафонова О. А., Суслина С. Н., Беленова А. С. Хитозан для фармации и медицины // Вестн. ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2011. № 2. С. 214–232.
2. Dutta P. K., Tripathi S., Mehrotra G. K., Dutta J. Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications // Food Chemistry. 2009. Vol. 114, № 4. P. 1173–1182.
3. Muthusankar E., Ragupathy D. Chitosan Based Nanocomposite Biosensors: A Recent Review // Sensor Letters. 2018. Vol. 16, № 2. P. 81–91.
4. Чудинова Ю. В., Коновалова М. В., Ильина А. В., Варламов В. П. Влияние физико-химических характеристик хитозана на структуру тонких пленок // Изв. УНЦ РАН. 2016. № 3. С. 103–106.
5. Жуйкова Ю. В. Пути формирования и молекулярная структура тонких пленок на основе природных полисахаридов : дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 162 с.
6. Zhong Y., Zhuang C., Gu W., Zhao Y. Effect of molecular weight on the properties of chitosan films prepared using electrostatic spraying technique // Corb. Pol. 2019. Vol. 212. P. 197–205.
7. Zhuang C., Zhong Y., Zhao Y. Effect of deacetylation degree on properties of Chitosan films using electrostatic spraying technique // Food Control. 2019. Vol. 97. P. 25–31.
8. Wang Z., Fei S., Kong W., Xiao Q., Zhu J. Effects of metal ions on the self-assembly of chitosan molecules investigated with atomic force microscopy // Intern. J. of Food Properties. 2018. Vol. 21, № 1. P. 1986–1994.
9. Lewandowska K., Sionkowska A., Kaczmarek B., Furtos G. Characterization of chitosan composites with various clays // Intern. J. Biol. Macromol. 2014. Vol. 65. P. 534–541.
10. Li J., Zivanovic S., Davidson P. M., Kit K. Production and characterization of thick, thin and ultra-thin chitosan/PEO films // Corb. Pol. 2011. Vol. 83, № 2. P. 375–382.
11. Ferreira A. S., Nunes C., Castro A., Ferreira P., Coimbra M. A. Influence of grape pomace extract incorporation on chitosan films properties // Corb. Pol. 2014. Vol. 113. P. 490–499.
12. Kara F., Aksoy E. A., Yuksekdag Z., Hasirci N., Aksoy S. Synthesis and surface modification of polyurethanes with chitosan for antibacterial properties // Corb. Pol. 2014. Vol. 112. P. 39–47.
13. Ko Y. G., Yu S. M., Park S. J., Chun H. J., Kim C. H. Characterization of surface properties and cytocompatibility of ionetched chitosan films // Langmuir. 2012. Vol. 28, № 18. P. 7223–7232.
14. Karakeçili A. G., Satriano C., Gümüşderelioğlu M., Marletta G. Surface characteristics of ionically crosslinked chitosan membranes // J. Appl. Surf. Sci. 2007. Vol. 106. P. 3884–3888.
15. Arzate-Vázquez I., Chanona-Pérez J. J., Calderín-Domínguez G., Terres-Rojas E., Garibay-Febles V., Martínez-Rivas A., Gutiérrez-López G. F. Microstructural characterization of chitosan and alginate films by microscopy techniques and texture image analysis // Carbohydr. Polym. 2012. Vol. 87, № 1. P. 289–299.
16. Lei J., Yang L., Zhan Y., Wang Y., Ye T., Li Y., Deng H., Li B. Polyethylene terephthalate/polypropylene films assembled with chitosan and various preservatives for antimicrobial food packaging // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2014. Vol. 114. P. 60–66.
17. Morgado D. L., Frollini E., Castellan A., Rosa D. S., Coma V. Biobased films prepared from NaOH/thiourea aqueous solution of chitosan and linter cellulose // Cellulose. 2011. Vol. 18, № 3. P. 699–712.
18. Mathew S., Abraham T. E. Characterisation of ferulic acid incorporated starch–chitosan blend films // Food Hydrocoll. 2008. Vol. 22. P. 826–835.
19. Zheng Z., Zhang L., Kong L., Wang A., Gong Y., Zhang X. The behavior of MC3T3-E1 cells on chitosan/poly-L-lysine composite films: Effect of nanotopography, surface chemistry, and wettability // J. Biomed. Mater. Res. A. 2008. Vol. 89, № 2. P. 453–465.
20. Lewandowska K. Surface studies of microcrystalline chitosan/poly(vinyl alcohol) mixtures // Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 263, № 15. P. 115–123.
21. Xu H., Ma L., Shi H., Gao C., Han G. Chitosan-hyaluronic acid hybrid film as a novel wound dressing: in vitro and in vivo studies // Polym. Adv. Technol. 2007. Vol. 18. P. 869–875.
22. Yan X.-L., Khor E., Lim L.-Y. Chitosan-Alginate Films Prepared with Chitosans of Different Molecular Weights // J. Biomed. Mater. Res. 2001. Vol. 58, № 4. P. 358–365.
23. Mazaheri M., Akhavan O., Simchi A. Flexible bactericidal graphene oxide–chitosan layers for stem cell proliferation // Appl. Surf. Sci. 2014. Vol. 301. P. 456–462.
24. Xu Y., Ren X., Hanna M. A. Chitosan/clay nanocomposite film preparation and characterization // J. Appl. Surf. Sci. 2006. Vol. 99. P. 1684–1691.
25. Wang S., Jing Y. Effects of formation and penetration properties of biodegradable montmorillonite/chitosan nanocomposite film on the barrier of package paper // Appl. Clay Sci. 2017. Vol. 138. P. 74–80.
26. Cárdenas G., Anaya P., Rio R. D., Schreiber R., Plesing C., Schneider M. Scanning electron microscopy and atomic force microscopy of chitosan composite films // J. Chil. Chem. Soc. 2010. Vol. 55, № 3. P. 352–358.
27. Богомолова Т. Б., Козлова Н. В., Чвалун С. Н. Модификация хитозана прививкой гликолевой кислоты с ее последующей поликонденсацией в процессе термообработки // Высокомолекул. соед. Б. 2009. Т. 51, № 9. С. 1695–1703.
28. Ghosh A., Ali M. A. Studies on physicochemical characteristics of chitosan derivatives with dicarboxylic acids // J. Mater. Sci. 2012. Vol. 47. P. 1196–1204.
29. Nečas D., Klapetek P. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis // Cent. Eur. J. Phys. 2012. Vol. 10, № 1. P. 181–188.
30. Аксенова Н. А., Тимофеева В. А., Роговина С. З., Тимашев П. С., Глаголев Н. Н., Соловьева А. Б. Особенности фотокаталитических свойств и структуры порфирина-содержащих систем на основе хитозана // Высокомолекул. соед. Б. 2010. Т. 52, № 2. С. 314–320.
31. Шаталова О. В., Аксенова Н. А., Соловьева А. Б., Кривандин А. В., Роговина С. З., Сидохин Ф. А. Особенности



кристаллизации хитозана с различной молекулярной массой и его смесей с плюронином F-127 по данным атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифракции // Поверхность. Рентгеновские, синхротрон-

ные и нейтронные исследования. 2011. № 5. С. 50–56.

32. Федосеева Е. Н., Федосеев В. Б. Взаимодействие хитозана и бензойной кислоты в растворе и пленках // Высокомолекулярные соединения А. 2011. Т. 53, № 11. С. 1900–1907.

#### Образец для цитирования:

Руденко Д. А., Браташов Д. Н., Шиповская А. Б. Изучение поверхности пленок хитозана и его солей с органическими кислотами методом атомно-силовой микроскопии // Изв. Саратовского государственного университета. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 387–394. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-387-394>

#### Atomic Force Microscopy Study of the Surface of Films of Chitosan and Its Salts with Organic Acids

D. A. Rudenko, D. N. Bratashov, A. B. Shipovskaya

Darya A. Rudenko, <https://orcid.org/0000-0001-5502-0867>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, DARudenko@mail.ru

Daniil N. Bratashov, <https://orcid.org/0000-0002-2096-4478>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dn2010@gmail.com

Anna B. Shipovskaya, <https://orcid.org/0000-0003-1916-4067>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, ShipovskayaAB@yandex.ru

The results of the study of the morphology and surface topography of chitosan films of the salt (S-) and basic (B-) chemical form by atomic force microscopy are presented. The films were cast from polymer solutions in acetic, lactic, citric and succinic acid. NaOH and triethanolamine were used for the salt → chitosan base reaction. Surface tomograms were obtained; the main morphological characteristics and roughness parameters of the film samples were estimated. It was found that the morphology, the degree of order, root-mean-square roughness and the height of the surface roughness were determined by the polymer chemical form, the nature of the acid used and the reagent of the polymer-like conversion reaction. The surface of the S-form chitosan films is characterized by fibrillar structural ordering (also dendritic for chitosan succinate), and that of the B-form is globular. The smallest size of surface supramolecular elements was observed for the S-form chitosan films, while the greatest roughness was for the B-form ones. Changing the reagent of the chitosan S → B reaction did not affect the morphological characteristics of the films; however, it affected the microrelief roughness. A more uniform basic chitosan film is formed in an organic base environment. It was suggested that the formation of fibrillar supramolecular structures was due to the unfolding and straightening of macrochains because of the repulsion of the same charged monomer units, while the globular ones were formed due to the folding and densification of macrocoils after neutralizing the total charge of the macrochain.

**Keywords:** chitosan, films, atomic force microscopy, surface morphology, roughness parameters.

Received: 12.06.2020 / Accepted: 22.06.2020 / Published: 30.11.2020

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

#### References

1. Slivkin D. A., Lapenko V. L., Safonova O. A., Suslina S. N., Belenova A. S. Chitosan for pharmacy and medicine. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2011, iss. 2, pp. 214–232 (in Russian).
2. Dutta P. K., Tripathi S., Mehrotra G. K., Dutta J. Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications. *Food Chemistry*, 2009, vol. 114, iss. 4, pp. 1173–1182.
3. Muthusankar E., Ragupathy D. Chitosan Based Nanocomposite Biosensors: A Recent Review. *Sensor Letters*, 2018, vol. 16, iss. 2, pp. 81–91.
4. Chudinova Yu. V., Konovalova M. V., Il'ina A. V., Varlamov V. P. Influence of the chitosan physical and chemical characteristics on the thin films structure. *Proceeding of the RAS Ufa Scientific Center*, 2016, iss. 3, pp. 103–106 (in Russian).
5. Zhuykova Yu. V. *Puti formirovaniya i molekulyarnaya struktura tonkikh plenok na osnove prirodnikh polisakharidov* [Formation pathways and molecular structure of thin films based on natural polysaccharides]. Thesis Dis. Cand. Sci. (Biol.). Moscow, 2018. 162 p. (in Russian).
6. Zhong Y., Zhuang C., Gu W., Zhao Y. Effect of molecular weight on the properties of chitosan films prepared using electrostatic spraying technique. *Corb. Pol.*, 2019, vol. 212, pp. 197–205.
7. Zhuang C., Zhong Y., Zhao Y. Effect of deacetylation degree on properties of Chitosan films using electrostatic spraying technique. *Food Control*, 2019, vol. 97, pp. 25–31.
8. Wang Z., Fei S., Kong W., Xiao Q., Zhu J. Effects of metal ions on the self-assembly of chitosan molecules investigated with atomic force microscopy. *International Journal of Food Properties*, 2018, vol. 21, iss. 1, pp. 1986–1994.
9. Lewandowska K., Sionkowska A., Kaczmarek B., Furtos G. Characterization of chitosan composites with various clays. *Intern. J. Biol. Macromol.*, 2014, vol. 65, pp. 534–541.
10. Li J., Zivanovic S., Davidson P. M., Kit K. Production and characterization of thick, thin and ultra-thin chitosan/PEO films. *Corb. Pol.*, 2014, vol. 83, iss. 2, pp. 375–382.
11. Ferreira A. S., Nunes C., Castro A., Ferreira P., Coimbra M. A. Influence of grape pomace extract incorporation on chitosan films properties. *Corb. Pol.*, 2014, vol. 113, pp. 490–499.



12. Kara F., Aksoy E. A., Yuksekdog Z., Hasirci N., Aksoy S. Synthesis and surface modification of polyurethanes with chitosan for antibacterial properties. *Corb. Pol.*, 2014, vol. 112, pp. 39–47.
13. Ko Y. G., Yu S. M., Park S. J., Chun H. J., Kim C. H. Characterization of surface properties and cytocompatibility of ionetched chitosan films. *Langmuir*, 2012, vol. 28, iss. 18, pp. 7223–7232.
14. Karakeçili A. G., Satriano C., Gümüşderelioglu M., Marletta G. Surface characteristics of ionically crosslinked chitosan membranes. *J. Appl. Surf. Sci.*, 2007, vol. 106, pp. 3884–3888.
15. Arzate-Vbquez I., Chanona-Pérez J. J., Calderyn-Domínguez G., Terres-Rojas E., Garibay-Febles V., Martínez-Rivas A., Gutiérrez-López G. F. Microstructural characterization of chitosan and alginate films by microscopy techniques and texture image analysis. *Carbohydr. Polym.*, 2012, vol. 87, iss. 1, pp. 289–299.
16. Lei J., Yang L., Zhan Y., Wang Y., Ye T., Li Y., Deng H., Li B. Polyethylene terephthalate/polypropylene films assembled with chitosan and various preservatives for antimicrobial food packaging. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2014, vol. 114, pp. 60–66.
17. Morgado D. L., Frollini E., Castellan A., Rosa D. S., Coma V. Biobased films prepared from NaOH/thiourea aqueous solution of chitosan and linter cellulose. *Cellulose*, 2011, vol. 18, iss. 3, pp. 699–712.
18. Mathew S., Abraham T. E. Characterisation of ferulic acid incorporated starch–chitosan blend films. *Food Hydrocoll.*, 2008, vol. 2, pp. 826–835.
19. Zheng Z., Zhang L., Kong L., Wang A., Gong Y., Zhang X. The behavior of MC3T3-E1 cells on chitosan/poly-L-lysine composite films: Effect of nanotopography, surface chemistry, and wettability. *J. Biomed. Mater. Res. A*, 2008, vol. 89, iss. 2, pp. 453–465.
20. Lewandowska K. Surface studies of microcrystalline chitosan/poly(vinyl alcohol) mixtures. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, vol. 263, iss. 15, pp. 115–123.
21. Xu H., Ma L., Shi H., Gao C., Han G. Chitosan-hyaluronic acid hybrid film as a novel wound dressing: in vitro and in vivo studies. *Polym. Adv. Technol.*, 2007, vol. 18, pp. 869–875.
22. Yan X.-L., Khor E., Lim L.-Y. Chitosan-Alginate Films Prepared with Chitosans of Different Molecular Weights. *J. Biomed. Mater. Res.*, 2001, vol. 58, iss. 4, pp. 358–365.
23. Mazaheri M., Akhavan O., Simchi A. Flexible bactericidal graphene oxide–chitosan layers for stem cell proliferation. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 301, pp. 456–462.
24. Xu Y., Ren X., Hanna M. A. Chitosan/clay nanocomposite film preparation and characterization. *J. Appl. Surf. Sci.*, 2006, vol. 99, pp. 1684–1691.
25. Wang S., Jing Y. Effects of formation and penetration properties of biodegradable montmorillonite/chitosan nanocomposite film on the barrier of package paper. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 138, pp. 74–80.
26. Cárdenas G., Anaya P., Rio R. D., Schreiber R., Plessing C., Schneider M. Scanning electron microscopy and atomic force microscopy of chitosan composite films. *J. Chil. Chem. Soc.*, 2010, vol. 55, iss. 3, pp. 352–358.
27. Bogomolova T. B., Kozlova N. V., Chvalun S. N. Modification of chitosan via grafting of glycolic acid followed by polycondensation during heat treatment. *Polymer Science. Series B*, 2009, vol. 51, iss. 9, pp. 1695–1703 (in Russian).
28. Ghosh A., Ali M. A. Studies on physicochemical characteristics of chitosan derivatives with dicarboxylic acids. *J. Mater. Sci.*, 2012, vol. 47, pp. 1196–1204.
29. Nečas D., Klapetek P. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis. *Cent. Eur. J. Phys.*, 2012, vol. 10, iss. 1, pp. 181–188.
30. Aksenova N. A., Timofeeva V. A., Rogovina S. Z., Timashev P. S., Glagolev N. N., Solov'eva A. B. Photocatalytic properties and structure of chitosan-based porphyrin-containing systems. *Polymer Science. Series B*, 2010, vol. 52, iss. 2, pp. 314–320 (in Russian).
31. Shatalova O. V., Aksenova N. A., Solov'eva A. B., Krivandin A. V., Rogovina S. Z., Sidokhin F. A. Crystallization peculiarities of chitosan with different molecular mass and its mixtures with pluronic F-127 according to atomic force microscopy and X-ray diffraction data. *Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011, iss. 5, pp. 50–56 (in Russian).
32. Fedoseeva E. N., Fedoseev V. B. Interaction of chitosan with benzoic acid in solution and films. *Polymer Science. Series A*, 2011, vol. 53, iss. 11, pp. 1900–1907 (in Russian).

**Cite this article as:**

Rudenko D. A., Bratashov D. N., Shipovskaya A. B. Atomic force microscopy study of the surface of films of chitosan and its salts with organic acids. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 387–394 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-387-394>





## БИОЛОГИЯ

УДК 581.3:581.466

### Репродуктивная стратегия *Poa bulbosa* L. в степных сообществах Нижнего Поволжья

Э. И. Кайбелева, Е. А. Архипова, О. И. Юдакова, М. Ю. Воронин

Кайбелева Эльмира Исмаиловна, ассистент кафедры генетики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kaybeleva-elmira@mail.ru

Архипова Екатерина Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и экологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, arhipovaea@mail.ru

Юдакова Ольга Ивановна, доктор биологических наук, заведующий кафедрой генетики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, yudakovaoi66@gmail.com

Воронин Максим Юрьевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры морфологии и экологии животных, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, voroninmj@yandex.ru

*Poa bulbosa* L. является аборигенным знаком европейской и средиземноморской флоры и инвазивным видом в Северной Америке. Изучение его репродуктивной стратегии в различных природно-климатических условиях важно для разработки эффективных методов локализации и предотвращения инвазий. В данной статье представлены результаты цитозембриологического исследования растений двух ценопопуляций *P. bulbosa* и морфологического анализа генеративных структур 175 гербарных образцов, собранных во флоре Нижнего Поволжья с 1919 по 2017 г. Установлено, что в степных фитоценозах Нижнего Поволжья *P. bulbosa* размножается преимущественно вегетативно за счет базальных лукович и псевдовивипарных луковичек (бульбочек). Редко осуществляется семенное размножение посредством факультативного апомиксиса. Не обнаружено какой-либо зависимости способа репродукции (псевдовивипария / семенное размножение) от даты начала вегетационного периода и от средней температуры в период от начала вегетационного периода до цветения. Из-за аридности климата Нижнего Поволжья эффективность псевдовивипарии низкая. Бульбочки, как правило, прорастают в соцветиях, а затем высыхают. Это сдерживает распространение *P. bulbosa* в исследуемом регионе.

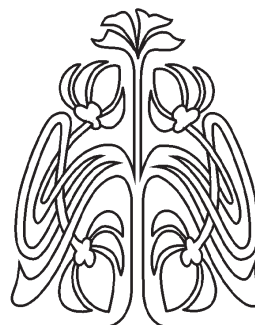
**Ключевые слова:** псевдовивипария, апомиксис, семенное размножение, пыльца, зародышевые мешки, *Poa bulbosa*.

Поступила в редакцию: 26.04.2020 / Принята: 12.05.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-395-403>

В настоящее время одной из составляющих глобальных природных изменений является инвазия чужеродных видов в аборигенные экосистемы. Часто она влечет за собой негативные последствия, поскольку инвазивные виды могут приносить на осваиваемые территории инфекции, вытеснять местные растения из экосистем и, в конечном итоге, уменьшать биологическое разнообразие. Кроме того, инвазивные виды, многие из которых относятся к сорнякам, способны наносить значительный экономический ущерб, существенно снижая урожай сельскохозяйственных культур.



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ







Скорость и масштаб инвазии определяются экологической пластичностью и высокой скоростью размножения адвентивных видов. При этом в пределах основного ареала их «агрессивные» способности сдерживаются присутствующими там специфическими биотическими и абиотическими факторами. Знание данных факторов и репродуктивной стратегии адвентивных видов необходимо для разработки эффективных методов сдерживания и предотвращения инвазий. Кроме того, в эпоху глобального изменения климата такие знания могут быть использованы для прогнозирования поведения адвентивных видов как на оккупированной ими территории, так и в пределах их естественного ареала.

*Poa bulbosa* L. – эфемероидный аборигенный злак европейской и средиземноморской флоры, после случайного заноса в 1906 г. в восточные штаты США проявил себя как высококонкурентный, агрессивный инвазивный вид, быстро распространившись до западного побережья Северной Америки [1–3]. К числу многих факторов, способствующих экспансии злака на новой территории, относится его сложная репродуктивная стратегия. Он может размножаться семенами посредством амфимиксиса и апомиксиса, а также вегетативно-базальными луковичками, развивающимися в основании вегетативных побегов, и луковичками (бульбочками), образующимися в соцветиях при псевдовивипарии [4–11].

Нижнее Поволжье является для *P. bulbosa* частью его естественного ареала. Здесь он приурочен, как правило, к степным фитоценозам [12], но может также доминировать в сообществах на антропогенно нарушенных территориях. В условиях Нижнего Поволжья *P. bulbosa* имеет короткий вегетационный период с середины апреля до конца мая. Нередко наблюдается повторная вегетация.

Несмотря на то что размножение *P. bulbosa* неоднократно служило предметом исследований [4–11], его репродукция в условиях Нижнего Поволжья не изучалась. В данной работе представлены результаты анализа репродуктивных особенностей растений *P. bulbosa* в степных фитоценозах севера Нижнего Поволжья.

### Материалы и методы

Материалом исследования послужили растения *P. bulbosa* из Воскресенского, Краснокутского, Ртищевского и Саратовского районов Саратовской области, собранные в 2017 г., а также гербарные экземпляры из коллекции Гербария СГУ имени Н. Г. Чернышевского (SARAT), собранные в Нижнем Поволжье с 1919 по 2017 г.

Нормально цветущие растения *P. bulbosa*, обнаруженные в 2017 г. в Краснокутском и Ртищевском районах, были изучены эмбриологически. В каждой ценопопуляции в разгар цветения 20 растений были зафиксированы ацетоалкоголем (3:1). В ходе цитозембриологического анализа изучали качество пыльцы, соотношение количества пыльцевых зерен к количеству семязачатков (*P/O ratio*), структуру семязачатков и зародышевых мешков. Исследование женской генеративной сферы проводили на препаратах, приготовленных с использованием метода просветления растительных тканей [13, 14]. Препараты анализировали с помощью микроскопа «AxioStar Plus» (C. Zeiss, Германия). Количество и качество пыльцы в пыльниках определяли на препаратах, окрашенных акридиновым оранжевым. Их анализ осуществляли с помощью люминесцентного микроскопа «AxioScop» (C. Zeiss, Германия).

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы «STATISTICA».

### Результаты и их обсуждение

В 2017 г. изученные ценопопуляции *P. bulbosa* в Краснокутском и Ртищевском районах состояли только из нормально цветущих (семенных) растений, а ценопопуляции в Воскресенском и Саратовском районах – только из псевдовивипарных (живородящих).

Вегетация растений в ценопопуляциях из Краснокутского и Ртищевского районов началась в первой декаде мая. Ко второй декаде у растений сформировались колоски с полноценными цветками, содержащими один пестик и три тычинки. Пыльцевые зерна характеризовались типичным для злаков строением. В пределах пыльников наблюдалось значительное варьирование их по размеру (средний размер  $29,56 \pm 10,54$  мкм,  $CV = 35,6\%$ ). Более 20% пыльцевых зерен имели признаки плазмолитиза или были полностью дегенерировавшими (табл. 1). Соотношение количества пыльцы к количеству семязачатков (*P/O ratio*) составило 4224, что позволяет отнести *P. bulbosa* к облигатным аллогамам [15].

На стадии спорогенеза во многих семязачатках рядом с тетрадами мегаспор были обнаружены крупные одно- и двудерные клетки (см. табл. 1). Около 20% зрелых семязачатков содержали два, реже три зародышевых мешка. Их морфология соответствовала морфологии мегагаметофитов Polygonum-типа. В большинстве зрелых зародышевых мешков присутствовал проэмбрио при интактных полярных ядрах. В единичных зародышевых мешках зарегистрировано двойное оплодотворение.



Таблица 1 / Table 1

**Качество пыльцы и состояние женской генеративной сферы у изученных растений *P. bulbosa***  
**Pollen quality and condition of the female generative sphere in the studied plants *P. bulbosa***

Район сбора материала / Material collection area	Средняя степень дефектности пыльцы, % / The average degree of defective pollen, %	Количество семязачатков на стадии мегаспорогенеза / The number of ovules at the stage of megasporogenesis		Количество зрелых семязачатков / The number of mature ovules		Количество зрелых зародышевых мешков / The number of mature embryo sacs	
		Всего / total	С апоспорическими инициалами, % / With aposporous initials, %	Всего / total	С несколькими зародышевыми мешками, % / With some embryo sacs, %	Всего / Total	С проэмбрио и интактными полярными ядрами, % / With proembryo and intact polar nuclei, %
Краснокутский район / Krasnokutsky district	26,7	152	30,2	105	27,6	134	7,4
Ртищевский район / Rtishchevsky district	20,6	140	41,4	98	21,4	119	31,9

У злаков, для которых характерен одноклеточный археспорий, присутствие в семязачатке нескольких зародышевых мешков является маркерным признаком апоспории [16]. При этой форме апомиксиса возможно одновременное развитие редуцированного женского гаметофита из мегаспоры и одного или нескольких нередуцированных мегагаметофитов из соматических клеток нуцеллуса. Выявленные эмбриологические особенности (низкое качество пыльцы, присутствие в нуцеллусе инициальных клеток и множественных зародышевых мешков, опережающий эмбриогенез) свидетельствуют о том, что у растений *P. bulbosa* из ценопопуляций Краснокутского и Ртищевского районов семенное размножение реализуется в форме факультативного апомиксиса (апоспории и псевдогамии).

В ценопопуляциях Воскресенского и Саратовского районов в 2017 г. растения не размножались семенами. Их вегетация началась в последней декаде апреля. К концу первой декады мая в соцветиях вместо цветков сформировались бульбочки, которые затем проросли непосредственно на растении. К концу мая надземные части растений полностью высохли. Поскольку бульбочки не опадали и не укоренялись, возобновление растений на следующий год осуществлялось только за счет базальных лукович.

В Нижнем Поволжье у *P. bulbosa* нередко наблюдается повторная вегетация, причем она может происходить как в любой из летних месяцев, так и в начале сентября. Наличие в Гербарии СГУ имени Н. Г. Чернышевского (SARAT) большой коллекции образцов *P. bulbosa* флоры Нижнего Поволжья позволило нам провести анализ состоя-

ния генеративной сферы растений в разные сроки вегетации. Всего было изучено 175 гербарных образцов, собранных с 1919 по 2017 г.

В коллекции преобладали образцы из ценопопуляций, в которых либо все растения были псевдовивипарными, либо наряду с живородящими растениями также встречались нормально цветущие (рис. 1). 17 (29,7%) гербарных образцов были собраны в популяциях, представленных только семенными растениями. Большинство (68,1%) псевдовивипарных растений гербарной коллекции *P. bulbosa* содержали проросшие на них бульбочки.

Псевдовивипарные и нормально цветущие экземпляры присутствовали в разных популяциях как во время первичной вегетации в апреле-мае при коротком фотопериоде (около 14:00 ч), так и при повторных вегетациях в конце июня и начале июля, когда световой день имел максимальную для региона продолжительность (max 16:30 ч). Для выявления возможного влияния длины светового дня на стратегию размножения *P. bulbosa* все гербарные образцы были разделены на две выборки: 1) только с нормально сформированными цветками; 2) имеющие бульбочки. Каждое растение (рис. 2) обозначалось датой на момент сбора. Сравнение медиан дат двух выборок с использованием *U*-критерия Манна – Уитни показало отсутствие зависимости способа репродукции (псевдовивипария / семенное размножение) от сроков вегетации растения.

Среди имеющихся в гербарии образцов *P. bulbosa* 70 были собраны в окрестностях г. Саратова в период с 1936 по 1960 г. (табл. 2). Наличие архива погоды для этих точек сбора позволило нам провести анализ температур, при



Рис. 1. Растения *P. bulbosa* из одной ценопопуляции: а – с проросшими бульбочками; б – с нормально развитыми цветками  
Fig. 1. The *P. bulbosa* plants from same cenopopulation: a – with germinated bulblets; b – with normally developed flowers

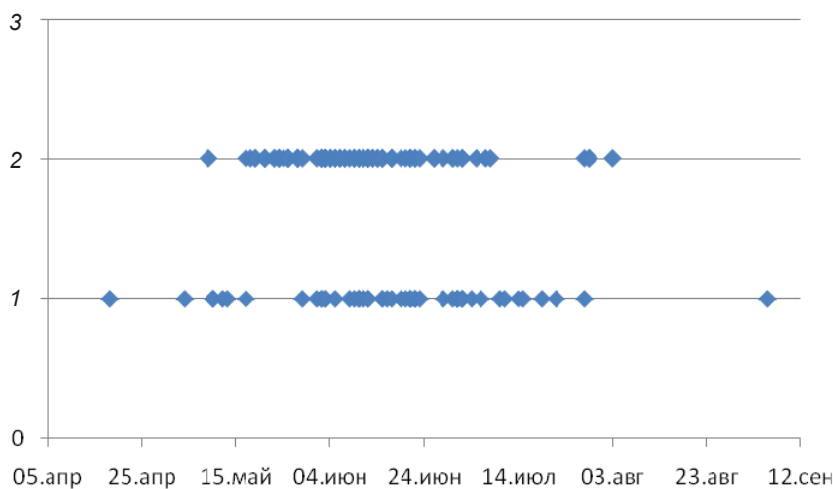


Рис. 2. Наличие полноценных цветков (1) и бульбочек (2) у гербарных образцов *P. bulbosa* в разные сроки вегетации (ось X – дата сбора гербарного образца; Y – репродуктивные структуры (1 – цветки, 2 – бульбочки); точками обозначены гербарные образцы)  
Fig. 2. The presence of normal flowers (1) and bulblets (2) in the *P. bulbosa* herbarium specimens at different dates of vegetation periods beginning (X axis – the date of collection of the herbarium specimen; Y axis – the reproductive structures (1 – flowers, 2 – bulblets); dots indicate herbarium specimens)

которых происходило развитие псевдовивипарных и нормально цветущих растений. Для гербарных образцов разных лет было проведено сравнение среднего значения температуры в течение периода от начала вегетации до начала цветения (у *P. bulbosa* он в среднем длится 7–10 сут.). Сравнение

выборок растений с бульбочками и цветками по U-критерию Манна – Уитни не выявило статистически достоверных отличий ( $U = 496,5$ ;  $p = 0,58$ ) температур, при которых они развивались. На диаграмме распределения видно наложение выборок растений с цветками и с бульбочками (рис. 3).



Таблица 2 / Table 2

Состояние генеративных структур у гербарных образцов *P. bulbosa*, собранных в окрестностях г. Саратова  
в разные годы

The state of generative structures in the *P. bulbosa* herbarium specimens collected in the neighborhood of Saratov  
in different years

№	Генеративные структуры / Generative structures	Дата сбора / Date of collection	Средняя температура за неделю до сбора образца, °С / The average temperature in the week before the collection of herbarium specimen, °C	№	Генеративные структуры / Generative structures	Дата сбора / Date of collection	Средняя температура за неделю до сбора образца, °С / The average temperature in the week before the collection of herbarium specimen, °C
1	бп / bp	21.05.36	15,3	36	цв / flow	23.06.53	25,3
2	бн / bn	03.06.36	26,2	37	бп / bp	03.06.54	19,2
3	бн / bn	10.06.36	22,7	38	бп / bp	03.06.54	19,2
4	бп / bp	10.06.36	22,7	39	бп / bp	03.06.54	19,2
5	бп / bp	14.06.36	23,2	40	бн / bn	19.06.54	21,6
6	бп / bp	29.07.36	20,5	41	бн / bn	02.06.55	13,8
7	бп / bp	28.05.38	19,9	42	бн / bn	02.06.55	14,3
8	бн / bn	15.06.38	18,6	43	бн / bn	02.06.55	14,3
9	бн / bn	15.06.38	18,6	44	бп / bp	02.06.55	14,3
10	цв / flow	15.06.38	18,7	45	бп / bp	02.06.55	14,3
11	бп / bp	15.06.39	14	46	бп / bp	12.06.55	15,2
12	цв / flow	03.06.41	11,6	47	бп / bp	12.06.55	19,1
13	цв / flow	10.05.42	8,8	48	цв / flow	12.06.55	19,1
14	бп / bp	21.05.47	12	49	цв / flow	12.06.55	19,1
15	бп / bp	10.06.47	15,8	50	бн / bn	15.06.55	19,1
16	бп / bp	10.06.47	15,8	51	цв / flow	15.06.55	21,5
17	бн / bn	14.06.47	11	52	бн / bn	21.06.55	17,6
18	бн / bn	07.06.49	23,4	53	цв / flow	21.06.55	18,9
19	цв / flow	18.04.51	12,6	54	цв / flow	21.06.55	18,9
20	бп / bp	05.06.51	13,2	55	цв / flow	21.06.55	18,9
21	бп / bp	03.06.52	13,9	56	бп / bp	22.06.55	17,6
22	бп / bp	05.06.52	16	57	бп / bp	28.06.55	16,9
23	бп / bp	06.06.52	16	58	цв / flow	28.06.55	16,9
24	бп / bp	17.06.52	18,8	59	бн / bn	30.06.55	21,1
25	бп / bp	17.06.52	18,8	60	бп / bp	30.06.55	21,1
26	бп / bp	17.06.52	18,8	61	цв / flow	28.07.55	17,9
27	бп / bp	17.06.52	18,8	62	бп / bp	28.07.55	23,4
28	бн / bn	02.07.52	26,5	63	бп / bp	11.06.56	22,1
29	цв / flow	02.07.52	26,5	64	бп / bp	11.06.56	22,7
30	цв / flow	02.07.52	26,5	65	бн / bn	26.06.56	27,9
31	цв / flow	02.07.52	26,5	66	цв / flow	01.07.57	17,9
32	цв / flow	02.06.53	13,8	67	цв / flow	01.07.57	17,9
33	цв / flow	21.06.53	23,8	68	цв / flow	06.07.57	25,3
34	бп / bp	22.06.53	25,3	69	цв / flow	04.05.59	13,2
35	цв / flow	22.06.53	25,3	70	бп / bp	01.07.60	17,4

Примечание. цв – цветки; бп – бульбочки, проросшие на растении; бн – бульбочки, непроросшие на растении.  
Note. flow – flowers; bp – bulblets germinated on a plant; bn – non-germinated bulblets.



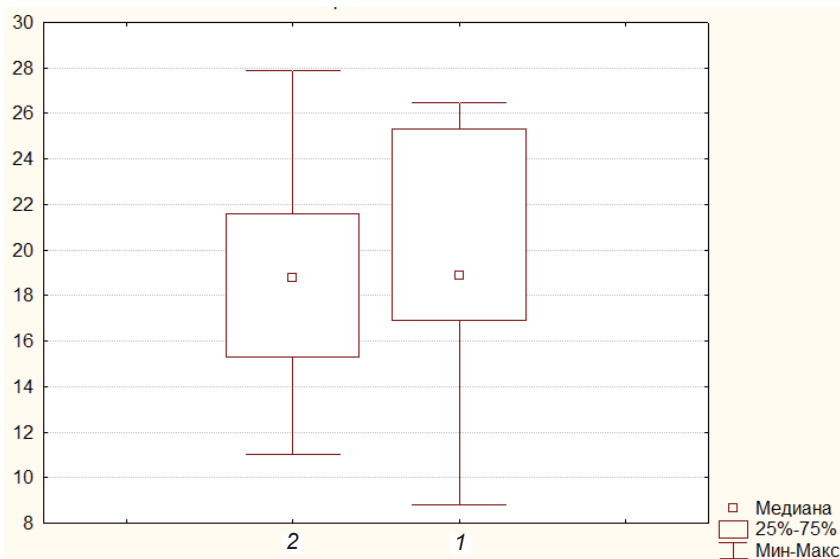


Рис. 3. Распределение гербарных образцов с цветками (1) и бульбочками (2) в зависимости от средней температуры в период от начала вегетации растений до начала цветения

Fig. 3. Distribution of herbarium specimens with flowers (1) and bulblets (2) depending on the average temperature during the period from the beginning of plant vegetation to flowering

Статистический анализ был продублирован с использованием логистической регрессии, связывающей количественный показатель (средняя температура от начала вегетации до начала цветения) с категориальными (цветки / бульбочки). Достоверной зависимости способа репродукции (семенное размножение / псевдовивипария) от средней температуры в период развития генеративных органов также не установлено (Хи-квадрат = 0,38;  $p = 0,54$ ).

Система репродукции *P. bulbosa* включает разные варианты вегетативного и семенного размножения. Вегетативное размножение осуществляется с помощью базальных лукович и псевдовивипарии, семенное – посредством факультативного апомиксиса, при котором зародыши могут развиваться как без оплодотворения (апомиксис), так и в результате оплодотворения (амфимиксис) [4–11]. Три из этих четырех возможных способов репродукции являются унипарентальными (с одним родителем). Считается, что унипарентальные типы репродукции наиболее выгодны в стабильных условиях среды. Они позволяют клонировать адаптированные генотипы, снижая или даже полностью исключая вероятность их разрушения при рекомбинации [17, 18]. Имеющиеся в арсенале *P. bulbosa* унипарентальные способы размножения дополняют друг друга. Ежегодное производство базальных лукович обеспечивает

латеральное увеличение площади, занимаемой популяцией, а отделившиеся от материнского растения бульбочки и апомиктичные семена способствуют расселению растений на более дальние расстояния [19].

Вместе с тем, за счет сохранения при факультативном апомиксисе способности к половому воспроизводству и перекрестному опылению вид имеет возможность производить небольшой процент семян с зиготическими (гибридными) зародышами, генотипы которых отличаются от родительских иным сочетанием генов. Таким образом, вид сохраняет шанс для выживания при изменении условий окружающей среды.

Среди видов, которые считаются успешными колонизаторами, широко распространены унипарентальные репродуктивные системы [17, 18]. Они обеспечивают не только присутствие комплекса адаптивных генов у всех особей популяции, но и возможность производить потомство в отсутствие мужских особей и независимо от опылителей. Достаточно одного растения, чтобы дать начало новой колонии или инвазии [17, 20]. Именно сложной репродуктивной стратегией, по мнению ряда исследователей [19], объясняется способность *P. bulbosa* к инвазии и быстрой экспансии новых территорий.

Псевдовивипария обычно свойственна арктическим и альпийским травам, но иногда она



встречается и у растений умеренных широт [21]. Полагают, что в этом случае ее проявление может быть ответной реакцией растения на чрезмерную влажность почвы, затенение или другие неблагоприятные условия во время случайного повторного цветения [22]. Результаты исследований ряда псевдовивипарных видов указывают на то, что факультативная псевдовивипария находится под генетическим и экологическим контролем [23], и баланс между живорождением и семенным размножением контролируется в основном длиной фотопериода и температурой окружающей среды [8, 24–26]. Короткий световой день и низкая температура индуцируют псевдовивипарию, а длинный день и более высокая температура – нормальное цветение и завязывание семян [8, 25].

В степных фитоценозах Нижнего Поволжья у *P. bulbosa* реализуются все свойственные ему типы репродукции, но в дилемме «семенное размножение или псевдовивипария» первенство принадлежит последней. Однако, как показало проведенное исследование, проявление псевдовивипарии отличается от описанных выше закономерностей. Во-первых, живорождение наблюдалось у растений *P. bulbosa* как во время первого цветения, так и при повторных вегетациях. Во-вторых, не обнаружено каких-либо корреляций между типом репродуктивных органов (бульбочек и нормальных цветков), фотопериодом и средней температурой во время их развития. И, наконец, несмотря на то что псевдовивипария встречается чаще семенного размножения, она мало эффективна. Бульбочки, как правило, прорастают в соцветии, а затем погибают, высыхая вместе с надземными частями растений после окончания короткого периода вегетации.

В Нижнем Поволжье лето жаркое и засушливое, в среднем выпадает около 150 мм осадков. Зачастую вся месячная сумма осадков складывается из одного-двух обильных дождей. Вероятнее всего, сочетание высоких температур и недостатка влаги в летние месяцы является лимитирующим фактором, снижающим эффективность псевдовивипарии. Вследствие того, что семенное размножение встречается редко, а псевдовивипария неэффективна, основным способом размножения *P. bulbosa* в Нижнем Поволжье следует считать вегетативное размножение базальными луковицами.

Несмотря на то что условия Нижнего Поволжья не благоприятствуют размножению *P. bulbosa* посредством псевдовивипарии, растения из года в год продолжают упорно выбирать именно данный способ репродукции в качестве приоритетного над семенным. Причем, как показали результаты проведенных статистических анализов, на этот

выбор не оказывает влияние ни средняя температура во время развития репродуктивных органов (бульбочек / цветков), ни астрономический срок вегетации, а следовательно, и фотопериод. Не исключено, что роль внешних факторов в инициации псевдовивипарии несколько преувеличена, и она в большей степени, чем принято считать, определяется генотипом растения.

Молекулярно-генетический механизм этого явления до сих пор остается неизвестным. Обнаружено два MADS-box транскрипционных фактора, мутации которых приводят к стабильной псевдовивипарии [27]. Кроме того, псевдовивипарные виды являются либо полиплоидами, либо анеуплоидами. Для *Deschampsia alpina* было показано, что диплоидные растения ( $2n = 26$ ) размножались семенами, но с увеличением числа хромосом от 39 до 49 у них возрастала тенденция к псевдовивипарии [28]. *P. bulbosa* также характеризуется варьированием числа хромосом ( $2n = 28, 35, 42$ ) [3]. Связь псевдовивипарии с плоидностью и варьирование числа хромосом у растений может объяснить существование ценопопуляций, в которых независимо от факторов внешней среды присутствуют либо только нормально цветущие растения, либо только псевдовивипарные. Несомненно, что решение вопроса генетической детерминации псевдовивипарии требует более детальных исследований.

#### Список литературы

1. Youngner V. B. Environmental control of initiation of the inflorescence, reproductive structures and proliferations in *Poa bulbosa* // American Journal of Botany. 1960. № 47. P. 753–757.
2. Harrison R. D., Chatterton N. J., Page R. J., Curto M., Asay K. H., Jensen K. B., Horton W. H. Competition, biodiversity, invasion and wildlife use of selected introduced grass in the Columbia and Great Basins // Research Report. 1996. Vol. 155. P. 32–54.
3. Novak S. J., Welfley A. Y. Genetic diversity in the introduced clonal grass *Poa bulbosa* (Bulbous bluegrass) // Northwest Science. 1997. Vol. 71, № 4. P. 271–280.
4. Пополнина Т. Г. Морфологические особенности формирования органов плодоношения у *Poa bulbosa* L. // Бот. журн. 1960. Т. 45, № 7. С. 1032–1039.
5. Heyn C. C. Study of bulbous *Poa* in Palestine. I. The agamic complex of *Poa bulbosa* // Bulletin of the Research Council of Israel. 1962. Vol. 11D. P. 117–126.
6. Heyn C. C. Biosystematic approaches to the solution of taxonomic problems in Israel // Plant life of South-West Asia / eds. P. H. Davis, P. C. Harper, I. C. Hedge. Edinburgh: Botanical Society of Edinburgh, 1971. P. 181–193.
7. Кордюм Е. Л. Апомиксис в роде *Poa* L. // Апомиксис и селекция: сб. ст. М.: Наука, 1970. С. 141–149.



8. *Ofir M., Kigel J.* Variation in onset of summer dormancy and flowering capacity along an aridity gradient in *Poa bulbosa* L., a geophytic perennial grass // *Annals of Botany*. 2003. Vol. 91, № 3. P. 391–400.
9. *Ofir M., Kigel J.* Opposite effects of day length and temperature on flowering and summer dormancy of *Poa bulbosa* // *Annals of Botany*. 2006. Vol. 97. P. 659–666.
10. *Ofir M., Kigel J.* Regulation of summer dormancy by water deficit and ABA in *Poa bulbosa* ecotypes // *Annals of Botany*. 2007. Vol. 99. P. 293–299.
11. *Ofir M., Kigel J.* Temporal and intracolonial variation of flowering and pseudovivipary in *Poa bulbosa* // *Annals of Botany*. 2014. Vol. 113. P. 1249–1256. DOI: 10.1093/aob/mcu037
12. *Еленевский А. Г., Буланый Ю. И., Радыгина В. И.* Конспект флоры Саратовской области. Саратов : ИЦ «Наука», 2008. 232 с.
13. *Herr J. J. M.* A new clearing-squash technique for study of ovule, development in angiosperms // *Amer. J. Bot.* 1971. Vol. 20, № 8. P. 785–790.
14. *Юдакова О. И., Гуторова О. В., Беляченко Ю. А.* Методы исследования репродуктивных структур и органов растений : учеб.-метод. пособие. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2012. 38 с.
15. *Cruden R. W.* Pollen-ovule ratios : a conservative indicator of breeding systems in flowering plants // *Evolution*. 1977. Vol. 31. P. 32–46.
16. *Хохлов С. С., Зайцева М. И., Курянов П. Г.* Выявление апомиктичных форм во флоре цветковых растений СССР. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 224 с.
17. *Stebbins G. I.* Self-fertilization and population variability in the higher plants // *Am. Nat.* 1951. Vol. 91. P. 337–354.
18. *Грант В.* Видообразование у растений. М. : Мир, 1984. 528 с.
19. *Sheffer E., Meron E., Shachak M.* Self-organization and vegetation pattern formation: *Poa bulbosa* L. as a model species // *Israel Journal of Ecology and Evolution*. 2007. Vol. 52. P. 159–204.
20. *Barrett S. C. H., Richardson B. J.* Genetic attributes of invading species // *Ecology of biological invasions : an Australian perspective* / eds. R. H. Groves, J. J. Burdon. Canberra : Australian Academy of Sciences, 1986. P. 21–33.
21. *Pierce S., Stirling C. M., Baxter R.* Pseudoviviparous reproduction of *Poa alpina* var. *vivipara* L. (Poaceae) during long-term exposure to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> // *Annals of Botany*. 2003. Vol. 91. P. 613–622. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg067>
22. *Martínez Crovetto R.* Algunos casos teratológicos en gramíneas (3a contribución) // *Darwiniana*. 1947. Vol. 7, № 3. P. 346–358. <http://www.jstor.org/stable/23211609>
23. *Chiurugwi T., Beaumont M. A., Wilkinson M. J., Battey N. H.* Adaptive divergence and speciation among sexual and pseudoviviparous populations of *Festuca* // *Heredity*. 2011. Vol. 106. P. 854–861.
24. *Junttila O.* Experimental control of flowering and vivipary in timothy (*Phleum pratense*) // *Physiologia Plantarum*. 1985. Vol. 63. P. 35–42.
25. *Heide O. M.* Environmental modification of viviparous proliferation in *Festuca vivipara* and *F. ovina* // *Oikos*. 1988. Vol. 51. P. 171–178.
26. *Heide O. M.* Environmental control of flowering and viviparous proliferation in seminiferous and viviparous arctic populations of two *Poa* species // *Arctic and Alpine Research*. 1989. Vol. 21. P. 305–315.
27. *Wang K., Tang D., Hong L., Xu W., Huang J., Li M., Gu M., Xue Y., Cheng Z.* DEP and AFO regulate reproductive habit in Rice // *PLoS Genetics*. 2010. Vol. 6, № 1. P. e1000818.
28. *Nygren A.* Studies on vivipary in the genus *Deschampsia* // *Hereditas*. 1949. Vol. 35. P. 27–32.

#### Образец для цитирования:

Кайбелева Э. И., Архипова Е. А., Юдакова О. И., Воронин М. Ю. Репродуктивная стратегия *Poa bulbosa* L. в степных сообществах Нижнего Поволжья // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 395–403. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-395-403>

#### The *Poa bulbosa* L. Reproductive Strategy in the Steppe Phytocenoses of the Lower Volga Region

E. I. Kaybeleva, E. A. Arkhipova,  
O. I. Yudakova, M. Yu. Voronin

Elmira I. Kaybeleva, <https://orcid.org/0000-0002-4986-5449>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [kaybeleva-elmira@mail.ru](mailto:kaybeleva-elmira@mail.ru)

Ekaterina A. Arkhipova, <https://orcid.org/0000-0002-1946-4628>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [arhipovaea@mail.ru](mailto:arhipovaea@mail.ru)

Olga I. Yudakova, <https://orcid.org/0000-0003-1391-6803>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [yudakovaoi@info.sgu.ru](mailto:yudakovaoi@info.sgu.ru)

Maxim Yu. Voronin, <https://orcid.org/0000-0001-7992-4502>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [voroninmj@yandex.ru](mailto:voroninmj@yandex.ru)

*Poa bulbosa* L. is a native cereal of the European and Mediterranean flora and an invasive species in North America. The study of its reproductive strategy in different environmental and climatic conditions is important for the development of effective methods of containment and prevention of invasions. Plants of two coenopopulations were investigated embryologically. In addition, the morphology of reproductive organs was analyzed in 175 herbarium specimens collected in the flora of the Lower Volga region from 1919 to 2017. It was found that in the steppe phytocenoses of the Lower Volga region *P. bulbosa* reproduce mainly vegetatively by basal bulbs and pseudoviviparous bulblets. Rarely, seed mode reproduction in the form of facultative apomixis is realized. There was no dependence of the mode of reproduction (pseudovivipary / seed reproduction) on the date of growing season beginning and on the average temperature in the period from the beginning of the growing season to flowering. The



effectiveness of pseudovivipary is low due to the aridity of the Lower Volga region climate. Bulblets germinate in inflorescences and then dry. This holds back the *P. bulbosa* wider distribution in the studied region. **Keywords:** reproductive strategy, pseudoviviparium, apomixis, seed propagation, pollen, embryo sacs, *Poa bulbosa*.

Received: 26.04.2020 / Accepted: 12.05.2020 / Published: 30.11.2020

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

## References

- Youngner V. B. Environmental control of initiation of the inflorescence, reproductive structures and proliferations in *Poa bulbosa*. *Amer. J. Bot.*, 1960, no. 47, pp. 753–757.
- Harrison R. D., Chatterton N. J., Page R. J., Curto M., Asay K. H., Jensen K. B., Horton W. H. Competition, biodiversity, invasion and wildlife use of selected introduced grass in the Columbia and Great Basins. *Research Report.*, 1996, no. 155, pp. 32–54.
- Novak S. J., Welfley A. Y. Genetic diversity in the introduced clonal grass *Poa bulbosa* (*Bulbous bluegrass*). *Northwest Science*, 1997, vol. 71, no. 4, pp. 271–280.
- Popolina T. G. Morphological features of the fruiting organs formation in *Poa bulbosa* L. *Botanicheskii Zhurnal*, 1960, vol. 45, no. 7, pp. 1032–1039 (in Russian).
- Heyn C.C. Study of bulbous *Poa* in Palestine. I. The agamic complex of *Poa bulbosa*. *Bulletin of the Research Council of Israel*, 1962, vol. 11D, pp. 117–126.
- Heyn C. C. Biosystematic approaches to the solution of taxonomic problems in Israel. In: P. H. Davis, P. C. Harper, I. C. Hedge, eds. *Plant life of South-West Asia*. Edinburgh, Botanical Society of Edinburgh, 1971, pp. 181–193.
- Kordyum E. L. Apomixis v rode *Poa* L. [Apomixis in genus *Poa* L.]. In: *Apomixis i selekciya: sb. st.* [Apomixis and Selection: coll. of works]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 141–149 (in Russian).
- Ofir M., Kigel J. Variation in onset of summer dormancy and flowering capacity along an aridity gradient in *Poa bulbosa* L., a geophytic perennial grass. *Annals of Botany*, 2003, vol. 91, no. 3, pp. 391–400.
- Ofir M., Kigel J. Opposite effects of day length and temperature on flowering and summer dormancy of *Poa bulbosa*. *Annals of Botany*, 2006, vol. 97, pp. 659–666.
- Ofir M., Kigel J. Regulation of summer dormancy by water deficit and ABA in *Poa bulbosa* ecotypes. *Annals of Botany*, 2007, vol. 99, pp. 293–299.
- Ofir M., Kigel J. Temporal and intraclonal variation of flowering and pseudovivipary in *Poa bulbosa*. *Annals of Botany*, 2014, vol. 113, pp. 1249–1256. DOI: 10.1093/aob/mcu037
- Elenevskij A. G., Bulanyj Yu. I., Radygina V. I. *Konspekt flory Saratovskoj oblasti* [Abstract of the Saratov region flora]. Saratov, ITs "Nauka" Publ., 2008. 232 p. (in Russian).
- Herr J. J. M. A new clearing-squash technique for study of ovule, development in angiosperms. *Amer. J. Bot.*, 1971, vol. 20, no. 8, pp. 785–790.
- Yudakova O. I., Gutorova O. V., Belyachenko Yu. A. *Metody issledovaniya reproduktivnykh struktur i organov rasteniy* [Methods of investigation of reproductive plant structures and organs]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2012. 38 p. (in Russian).
- Cruden R. W. Pollen-ovule ratios: a conservative indicator of breeding systems in flowering plants. *Evolution*, 1977, vol. 31, pp. 32–46.
- Khokhlov S. S., Zaitseva M. I., Kupriyanov P. G. *Vyavlenie apomiktichnyx form vo flore cvetkovyx rastenij SSSR* [Identification of apomictic forms in the flowering plants flora of the USSR]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. 224 p. (in Russian).
- Stebbins G. I. Self-fertilization and population variability in the higher plants. *Am. Nat.*, 1951, vol. 9, pp. 337–354.
- Grant V. *Vidoobrazovanie u rastenij* [Speciation in Plants]. Moscow, Mir Publ., 1984. 528 p. (in Russian).
- Sheffer E., Meron E., Shachak M. Self-organization and vegetation pattern formation: *Poa bulbosa* L. as a model species. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 2007, vol. 52, pp. 159–204.
- Barrett S. C. H., Richardson B. J. Genetic attributes of invading species. In: R. H. Groves, J. J. Burdon, eds. *Ecology of Biological Invasions: An Australian Perspective*. Canberra, Australian Academy of Sciences, 1986, pp. 21–33.
- Pierce S., Stirling C.M., Baxter R. Pseudoviviparous reproduction of *Poa alpina* var. *vivipara* L. (Poaceae) during long-term exposure to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annals of Botany*, 2003, vol. 91, pp. 613–622. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg067>
- Martínez Crovetto R. Algunos casos teratológicos en gramíneas (3a contribución). *Darwiniana*, 1947, vol. 7, no. 3, pp. 346–358. <http://www.jstor.org/stable/23211609>
- Chiurugwi T., Beaumont M. A., Wilkinson M. J., Battey N. H. Adaptive divergence and speciation among sexual and pseudoviviparous populations of *Festuca*. *Heredity*, 2011, vol. 106, pp. 854–861.
- Junttila O. Experimental control of flowering and vivipary in timothy (*Phleum pratense*). *Physiologia Plantarum*, 1985, vol. 63, pp. 35–42.
- Heide O.M. Environmental modification of viviparous proliferation in *Festuca vivipara* and *F. ovina*. *Oikos*, 1988, vol. 51, pp. 171–178.
- Heide O. M. Environmental control of flowering and viviparous proliferation in seminiferous and viviparous arctic populations of two *Poa* species. *Arctic and Alpine Research*, 1989, vol. 21, pp. 305–315.
- Wang K., Tang D., Hong L., Xu W., Huang J., Li M., Gu M., Xue Y., Cheng Z. DEP and AFO regulate reproductive habit in Rice. *PLoS Genetics*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. e1000818. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000818>
- Nygren A. Studies on vivipary in the genus *Deschampsia*. *Hereditas*, 1949, vol. 35, pp. 27–32.

## Cite this article as:

Kaybелева E. I., Arkhipova E. A., Yudakova O. I., Voronin M. Yu. The *Poa bulbosa* L. Reproductive Strategy in the Steppe Phytocenoses of the Lower Volga Region. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 395–403 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-395-403>





УДК 581.92

## Зависимость таксономических параметров флор от размеров выборки

А. В. Иванова, Н. В. Костина, М. А. Аристова



Иванова Анастасия Викторовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории проблем фиторазнообразия, Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, Тольятти, nastia621@yandex.ru

Костина Наталья Викторовна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и управления экосистемами, Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, Тольятти, knva2009@yandex.ru

Аристова Маргарита Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории моделирования и управления экосистемами, Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, Тольятти, margo.aristova2016@yandex.ru

Среди вопросов изучения флоры немаловажным считается проблема оценки полноты ее выявления. Предлагаемый в работе подход основан на оценке комплекса параметров таксономических спектров флор (родовых и семейственных). В качестве модельного объекта рассмотрена флора Сокского физико-географического района, расположенного в Заволжье Самарской области. Для решения данной задачи использовано 124 исходных флористических списков и их комбинаций (более 400). В зависимости от увеличения числа видов по параметрам таксономических спектров определены основные уровни флористической выборки, которые определяют достоверную характеристику флоры, соответствующую эколого-географическим условиям. Установлено, что в спектре семейств первая триада лидирующих семейств (*Asteraceae* – *Rosaceae* – *Fabaceae*) устанавливается после 700 видов в выборке. Четвертое место в спектре занимает семейство *Rosaceae*, а пятое, обозначенное нами как лидирующее *Brassicaceae*, стабильно занимает свое место лишь при 1000 видах в выборке. Содержание видов в десятке ведущих семейств стремится к величине 61–60% при 800 видов и более. В составе флоры Сокского района среди семейств, содержащих один вид, имеется 80% семейств, которые для данной территории мы можем считать действительно одновидовыми. Формирование спектра родов происходит несколько медленнее, чем спектра семейств. Ведущие роды (*Carex*, *Galium*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Astragalus*, *Salix*) появляются в составе спектра при численности выборок уже от 300 видов и выше и стабильно присутствуют в его составе. Однако все они перемещаются в головную часть спектра лишь после достижения объема выборки 1100 видов.

**Ключевые слова:** спектры семейств и родов флоры, таксономические параметры, ведущие рода, ведущие семейства, флористическая выборка, Самарское Заволжье, Сокский физико-географический район.

Поступила в редакцию: 11.03.2020 / Принята: 16.04.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-404-416>

Среди вопросов изучения флоры немаловажным считается проблема оценки полноты ее выявления, т.е. составление полного списка видов растений в топографическом контуре, который представляет собой естественный или искусственный выдел [1]. Исследователь постоянно пополняет список флоры, как правило, интуитивно понимая, насколько его исследования приближают к поставленной цели. Флора как совокупность видов является сложной системой, имеющей ряд признаков, отличающих ее от других, географически удаленных систем такого рода. Используя эти признаки как критерии, возможно оценить полноту инвентаризации. Кроме того, для целей сравнительной флористики необходимы сопоставимые выборки, которые были бы минимальными (с точки зрения числа видов) и в то же время характеризовались бы признаками флор (а не их частей). Такая минимальная величина выявления могла бы обеспечить изучение флористических особенностей локальных территорий. Серия такого рода выборок могла бы дать информацию о разнообразии (своеобразной мозаике) флор территории, каждая из которых, отличаясь собственными признаками, могла бы продемонстрировать и свою индивидуальность. Решение таких задач на местном уровне может стать важным звеном для познания закономерностей территориального распределения флор по географическому градиенту.

Важнейшей характеристикой флоры является ее таксономическая структура, которая считается комплексом консервативных признаков. Благодаря этому обстоятельству А. И. Толмачев выдвигал ее на положение «одного из существеннейших диагностических признаков» [2], определяющих принадлежность флоры к той или иной флористической области. В пределах естественных флористических областей наблюдается определенное постоянство таксономической



структуры достаточно крупных (региональных) флор. Отмечается важная роль данной структуры как существенного признака всякой флоры [3].

Для работ по сравнительной флористике в региональных или глобальных масштабах необходим материал, сравнение которого давало бы корректные результаты. Для этого флористические выборки должны преподноситься в едином ключе. На этот счет существует целый ряд мнений, например, о необходимом равенстве площади сравниваемых флор. Однако, если рассматривать данную проблему в региональных масштабах и более, то ни равенство площадей, ни тем более одинаковое число видов не гарантирует подбор корректного материала для сравнимости флор.

Нами предлагается подход использования ряда признаков (параметров, критериев), которые бы в комплексе оценивали степень полноты описания флоры. Используя его, можно было бы оценить любую флористическую выборку с точки зрения «пригодности» для сравнения. Сложность подхода заключается в том, что такого рода исследования для выработки признаков

(параметров, критериев) необходимы в каждой географической местности (природной зоне).

Для максимального соблюдения однородности территории рассмотрим этот вопрос на примере Сокского физико-географического района [4], расположенного в Заволжье Самарской области. Физико-географический район представляет собой определенную природно-экологическую целостность. Полученные данные достоверно применимы для оценок полноты флористической выборки лесостепной зоны Самаро-Ульяновского Заволжья. Для получения аналогичных данных в других регионах требуются аналогичные исследования.

### Материалы и методы

Изучаемая территория Сокского физико-географического района принадлежит лесостепной провинции Высокого Заволжья (рис. 1) и Средне-европейской флористической области [5]. Район расположен в северо-западной части Самарской области и имеет площадь 12,6 тыс. кв. км, занимая 23,5% ее территории.

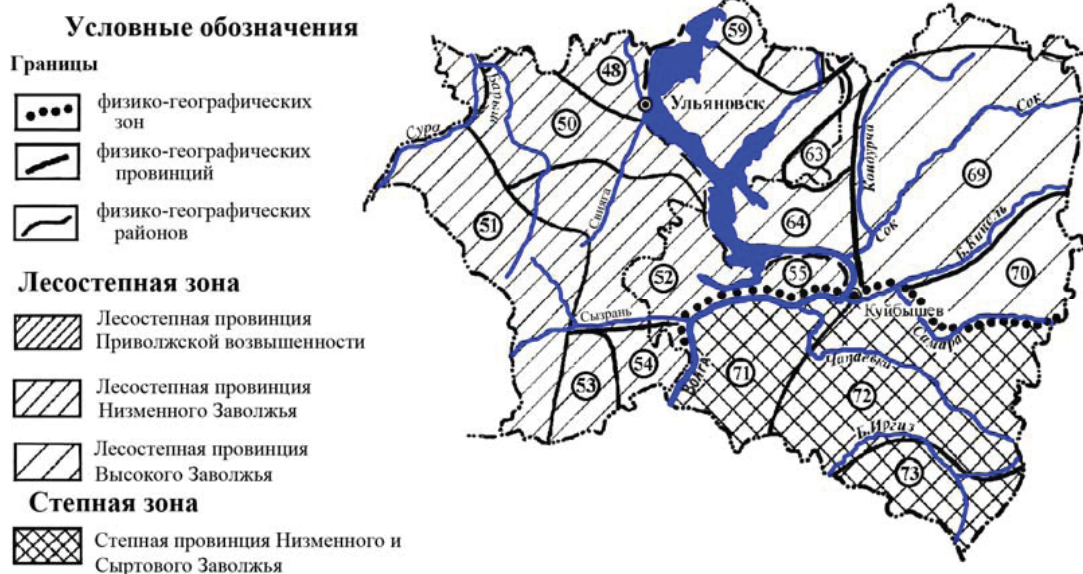


Рис. 1. Физико-географические районы Самаро-Ульяновского Поволжья (по [4])  
 Fig. 1. Physical-geographical areas of Samara-Ulyanovsk Volga region (according to [4])

В геоморфологическом отношении Сокский физико-географический район (см. рис. 1 номер 69) представляет собою волнистую возвышенную равнину, расчлененную глубокими и широкими речными долинами. Особенностью рельефа является вертикальная дифференциация ландшафта. Территория данного физико-географического района принадлежит бассейнам двух рек: Сок и

Большой Кинель. Большую часть занимает бассейн реки Сок с многочисленными притоками [6], истоки которого и верховье реки расположены в Оренбургской области. Однако основная часть бассейна лежит в Самарской области. Климат района континентальный с жарким летом и холодной зимой. Почвы района характеризуются преобладанием черноземов различных подтипов [4].



Данные по флоре исследуемой территории содержатся в электронной базе данных FD SUR [7] в виде флористических описаний (списков встреченных видов), географическое расположение которых представлено на рис. 2 в виде точек. Флористические описания выполнены сотрудниками лаборатории фиторазнообразия Института экологии Волжского бассейна РАН за период полевых исследований с 2003 по 2019 г., кроме этого использованы и опубликованные данные других

авторов [8–10 и др.]. Списки видов составлены на местности, впоследствии дополнены данными по собранному и определенному гербарному материалу. Итоговые исходные списки различаются между собой по количеству видов (30–600), фитоценотической приуроченностью описания (различное количество парциальных флор, описанных полно или отчасти), а также по частоте наблюдения (одноразовые посещения, регулярные посещения в разные периоды вегетационного сезона).



Рис. 2. Расположение участков флористических описаний на территории Сокского физико-географического района

Fig. 2. Sample sites of floristic descriptions on the territory of Soksky physical-geographical region

Изучение параметров таксономических спектров осуществлялось с помощью программного обеспечения FD SUR путем построения достаточно многочисленной серии спектров родов и семейств флоры для выборок с различным количеством видов. Всего было использовано 124 исходных флористических списка, выполненных на обследованной территории, и более 400 их комбинаций. Комбинированные списки получены путем объединения флористических исходных данных для локальных участков территории по принципу близости взаимного расположения. Самым крупным из объединенных списков представлена вся флора Сокского физико-географического района, которая содержит 1147 видов, 465 родов и 104 семейств.

### Результаты и их обсуждение

**Структура таксономических спектров и их зависимость от числа видов.** При увеличении числа видов в выборке увеличивается число родов и число семейств. Эта зависимость имеет

вид кривой (рис. 3). Оба графика представляют собой кривые, согласно которым при накоплении определенных количественных данных происходят качественные изменения таксономической структуры. Вместе с тем, и в таксономических спектрах, которые соответствуют данному ряду выборок, наряду с количественными изменениями происходит и ряд качественных, так как с увеличением числа видов список постепенно начинает соответствовать флоре территории. Показатели степени, которые можно рассматривать как константы для рассматриваемой территории, в логарифмической шкале характеризуют «скорость накопления» крупных таксономических единиц (семейств и родов) в зависимости от числа видов.

Рассмотрим, какие можно выделить этапы формирования списка с точки зрения строения таксономических спектров. Эти этапы могут характеризовать соответствие данной выборки целой флоре в понимании А. И. Толмачева [5]. Таксономический спектр представляет собой ряд

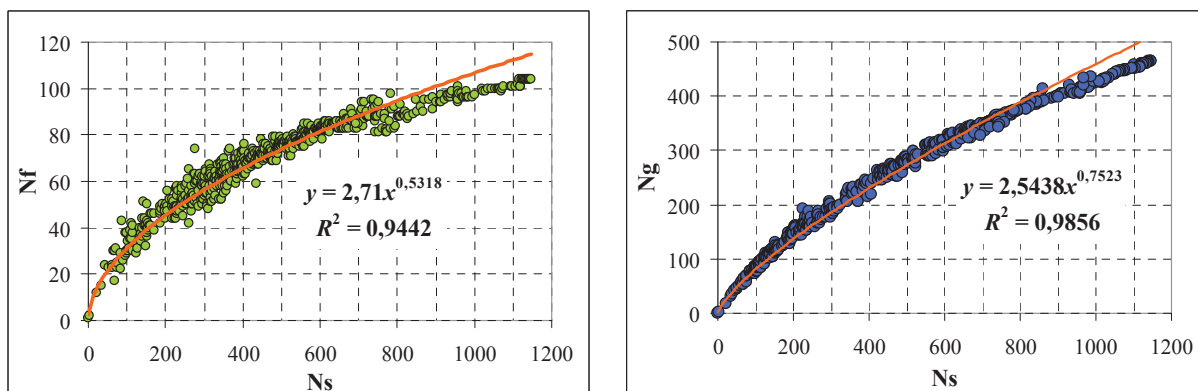


Рис. 3. Зависимости числа родов и семейств от числа видов для модельной территории (Ns – число видов; Nf – число семейств; Ng – число родов)

Fig. 3. Dependences of the number of genera and families on the number of species for the model territory (Ns – number of species; Nf – number of families; Ng – number of genera)

крупных таксонов (родов или семейств), ранжированных по числу видов. При этом имеющиеся таксоны с одинаковым числом видов занимают одну позицию, то есть в спектре могут возникать повторы. Таким образом, число крупных таксонов не равно числу позиций.

Все таксономические спектры имеют ряд общих черт строения. Весь спектр можно условно поделить на две части: «головную» и «хвостовую». В «головной» части расположены самые крупные (с точки зрения видового состава) таксономические единицы – семейства или роды. Именно эта часть, включающая, например, для семейственного спектра 10–20 ведущих семейств [5], при условии достаточности флористического описания, является основной характеристикой флоры, отражающей ее экологические особенности [11, 3]. Повторы (расположение некоторых семейств или родов на одном месте) встречаются редко и характеризуют экологическую и историческую специфику территории. Для «хвостовой» части характерны более или менее многочисленные повторы (таксоны с одинаковым числом видов) и такая ситуация является типичной. В целом ряде случаев «головная» часть плавно переходит в «хвостовую», так что граница между этими частями весьма условная.

Таксономические спектры, построенные на основе выборок с малым числом видов, представлены в основном по «схеме хвостовой части», когда виды по семействам и родам распределены почти равномерно, т.е. флористическая выборка имеет недостаточный объем и далеко не отражает реальную картину. В нашем примере (см. рис. 3) такая ситуация наблюдается до 70 видов для семейственного спектра и до 100 видов для родового. При увеличении числа видов начина-

ет структурироваться «головная» часть и в нее перемещаются все крупные таксоны (семейства, роды). Это соответствует формированию максимально полночленного спектра при высокой степени выявления видового состава флоры.

#### Параметры семейственного спектра

**Расположение лидирующих семейств.** Анализ спектра семейств традиционно начинается с «головной» части. Состав самых богатых по числу видов семейств флоры отражает лишь самые общие закономерности (зональное положение, принадлежность к тому или иному царству, подцарству) [12]. Следовательно, параметры спектра семейств – это одна из самых важнейших консервативных характеристик флоры территории. По данным показателям можно судить о степени полноты выявления флоры.

В головной части спектра семейств Сокского физико-географического района можно выделить группу лидирующих семейств: Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Rosaceae, Brassicaceae. Они также занимают первые пять мест в спектрах семейств флор Самарской и Ульяновской областей [13, 14], а также у большинства флор физико-географических районов лесостепной зоны Самаро-Ульяновского Поволжья (таблица).

Из указанных 5 семейств на территории Самаро-Ульяновского Поволжья формируется тройка ведущих семейств флор различных физико-географических районов. Ведущие места в спектрах региональных флор России принадлежат семействам Asteraceae и Poaceae. Они «чаще всего занимают два первых места. Это характерно почти для всей Голарктики, исключая некоторые районы Арктики, пустынь и высокогорий» [15, с. 12–13]. Третье место в спектре является более определяющим для характери-





**Лидирующие семейства спектров флор физико-географических районов и областей**  
**Leading families of flora of physical-geographical areas and regions**

Физико-географические районы / Physical-geographical areas					Самарская область / Samara Region	Ульяновская область / Ulyanovsk region
48	50	52	69	55		
Число видов / Number of species						
1092	1002	1026	1170	1302	1872	1760
Ast 13,8	Ast 14,6	Ast 14,3	Ast 15,7	Ast 15,4	Ast 14,3	Ast 13,4
Poa 10,1	Poa 10,4	Poa 9,6	Poa 9,0	Poa 9,6	Poa 9,0	Poa 9,8
<b>Fab</b> <b>5,7</b>	<b>Fab</b> <b>7,3</b>	<b>Fab</b> <b>6,5</b>	<b>Fab</b> <b>6,7</b>	Ros 6,1	<b>Fab</b> <b>5,7</b>	<b>Fab</b> <b>5,6</b>
Bras 5,1	Bras 5,7	Ros 6,5	Ros 5,7	Bras 4,7	Bras 4,8	Bras 5,3
Ros 5,1	Ros 5,5	Bras 4,7	Bras 4,4	Car 4,5	Ros 4,7	Ros 5,1
Car 4,4	Lam 4,5	Car 4,3	Car 4,1	<b>Fab</b> <b>4,5</b>	Сур 4,7	Сур 4,5

Примечание. Физико-географические районы: 48 – Средне-Свияжский; 50 – Корсунско-Сенгилеевский; 52 – Свияго-Усинский; 55 – Жигулевский; 69 – Сокский (номера соответствуют рис. 1); семейства: Ast – Asteraceae, Poa – Poaceae, Fab – Fabaceae, Ros – Rosaceae, Bras – Brassicaceae, Car – Caryophyllaceae, Сур – Cyperaceae, Lam – Lamiaceae; цифрами обозначено процентное содержание видов.

Note. Physical-geographical areas: 48 – Sredne-Sviyazhsky; 50 – Korsunsky-Sengileevsky; 52 – Sviyago-Usinsky; 55 – Zhigulevsky; 69 – Soksky. (numbers correspond to fig. 1); families: Ast – Asteraceae, Poa – Poaceae, Fab – Fabaceae, Ros – Rosaceae, Bras – Brassicaceae, Car – Caryophyllaceae, Сур – Cyperaceae, Lam – Lamiaceae; the numbers indicate the percentage of species.

ки флоры регионального и локального уровня. А. П. Хохряков по третьему члену семейственно-го спектра предложил выделять тип флоры [16].

Большинство рассмотренных нами ранее флор Самаро-Ульяновского Поволжья оказались принадлежащими Fabaceae-типу. Это соответствует принадлежности данной территории к «зоне бобовых» (Fabaceae-зоне), так как она находится в пределах внеарктической Восточной Европы, которую А. П. Хохряков относит к «зоне бобовых», ссылаясь на работу Л. И. Малышева [11]. Кроме того, флора Российской Федерации также демонстрирует принадлежность к Fabaceae-типу [17], так как большая часть этой территории находится в пределах «зоны бобовых».

Однако все пространство Восточной Европы не является однородным по данному показателю. В упомянутой работе А. П. Хохрякова отмечается внутри этой зоны «наличие региональных и локальных флор Сурегасеае-типа и Rosасеае-типа». Действительно, в пределах территории Самаро-Ульяновского Поволжья выделяется ряд флор, имеющих соответствующую триаду ведущих семейств [18]. Одним из примеров такого рода может служить флора Самарской

Луки [19] – Жигулевский физико-географический район (см. таблицу). Кроме того, ранее нами отмечалось, что на территории Низменного Заволжья Самарской области возможны флоры еще одного типа, с семейством Brassicaceae на третьем месте спектра. Это также позволяет рассматривать данное семейство как одно из лидирующей группы. Например, такая ситуация наблюдается у одной из флор Мелекесско-Ставропольского физико-географического района [20]. Очевидно, в результате совокупного действия природных и антропогенных факторов, снизилась численность представителей Fabaceae и Rosaceae.

В пределах же территории Сокского физико-географического района однозначно устанавливается Fabaceae-тип флоры. Это было показано нами как на примере опорных флор, выделенных на территории района, так и целого района [21]. Соответствие установки правильного порядка тройки лидирующих семейств (Asteraceae – Poaceae – Fabaceae) и числа видов во флористических выборках иллюстрирует рис. 4. По указанным выше причинам в данной иллюстрации учтены доли семейства Rosaceae, которое оказывается на четвертом месте.

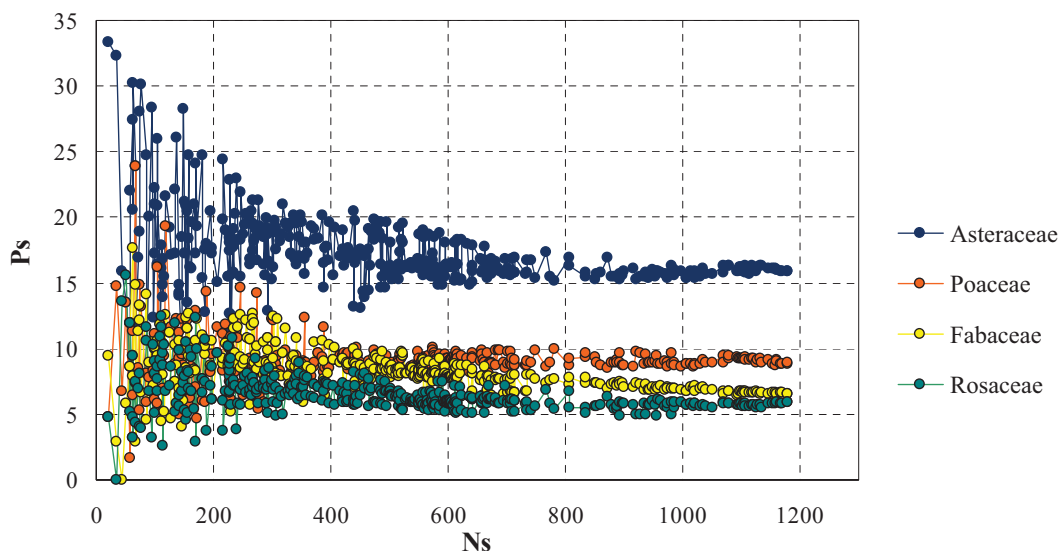


Рис. 4. Зависимость содержания видов в лидирующих семействах флоры от количества видов во флористической выборке (Ns – число видов, Ps – % видов семейства) (цвет online)

Fig. 4. The dependence of the content of species in the leading families of flora on the number of species in the floristic sample (Ns – number of species, Ps – % of species of the family) (color online)

Очевидно, что чем больше видов (полнее выборка), тем более определенно устанавливается порядок семейств. В малочисленных списках (200–400 видов) какого-либо постоянства последовательности семейств не наблюдается. Исключением является положение семейства Asteraceae, которое занимает свое первое место уже после 100–150 видов в выборке и далее не меняет своей позиции.

Тройка остальных семейств устанавливается на рубеже 600–700 видов. После этого у всех семейств немного меняется доля, но порядковый номер в спектре остается постоянным. При этом важно упомянуть, что характерная тройка семейств Asteraceae–Poaceae–Fabaceae во главе спектра может появляться и у выборок, имеющих меньшее число видов (см. рис. 4). Это объясняется таксономической принадлежностью встречаемых видов в составе определенных биотопов (среди видов луговых степей много представителей родов *Astragalus*, *Trifolium*, *Oxytropis* и др.). Следовательно, при оценке флористической выборки данный признак должен использоваться в комплексе с другими.

Семейство Brassicaceae стабильно появляется в спектре после 200 видов в выборке и постепенно перемещается в «головную» часть. Однако занимает свое пятое место лишь при 1000 видах в выборке (рис. 5). Рассматриваемое по аналогии с ним семейство Rosaceae, как уже отмечалось, гораздо раньше занимает определенную позицию в спектре.

Диапазон процентного вклада семейств, занимающих 5–10-е места в спектре (Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Lamiaceae, Scrophulariaceae, Apiaceae), составляет 4,4–3,4%, т.е. по количественному вкладу они отличаются друг от друга в меньшей степени, чем семейства первой тройки. По сравнению с семействами первой тройки (см. таблицу) он очень мал. Очевидно, поэтому расстановка по соответствующим местам происходит при большем количестве видов.

Процент десяти ведущих семейств. Процент содержания видов в первой десятке ведущих семейств является очень консервативным признаком, характеризующим флору географически. Этот вопрос освещается в работах А. И. Толмачева [5]. Р. В. Камелин упоминает два правила (правило Декандоля и правило Гроссгейма), которым подчиняется численное содержание видов первой десятки семейств [12]. Эти семейства принято называть ведущими, а признаки, связанные с ними, характеризующими всю флору, так как они часто содержат в своем составе более половины видов.

Процент содержания видов в десятке ведущих семейств также меняется в зависимости от содержания видов в выборке (см. рис. 5). С увеличением числа видов в выборке уменьшается диапазон варьирования обсуждаемого признака сначала до диапазона 60–65% (600–700 видов), далее до 61–63% (700–800 видов) и затем до 60–61% (800 видов и более). С другой стороны, следует отметить, что существуют выборки, параметры которых по данному показателю близки к характеристике полной флоры (60–61%, например, при 300–400 видах).

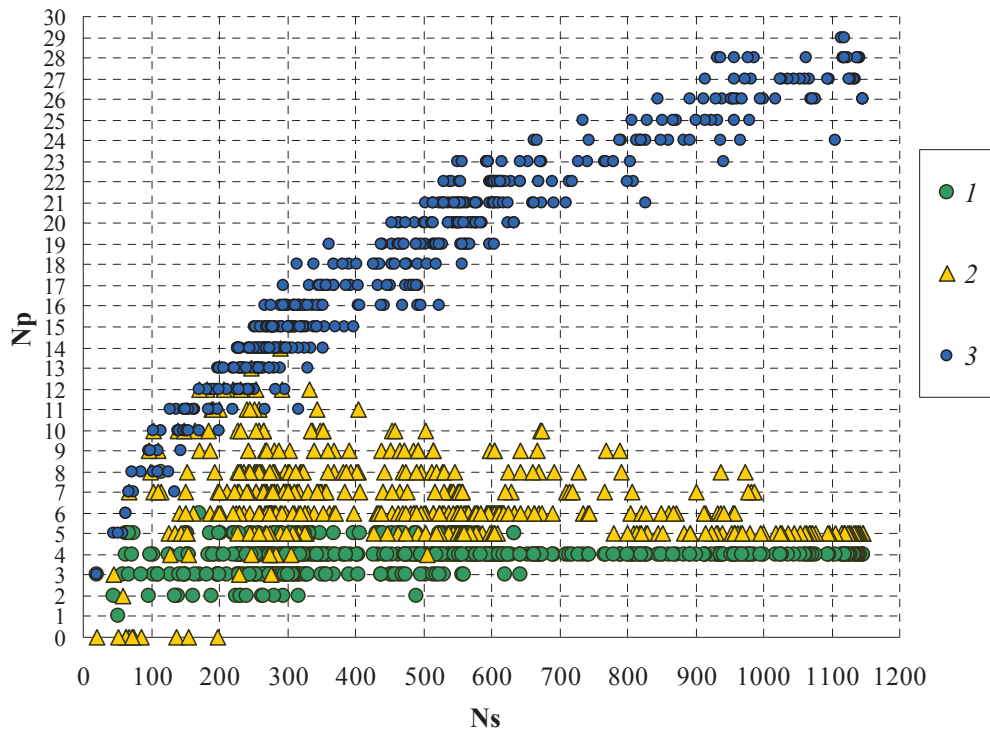


Рис. 5. Зависимость расположения в спектре некоторых семейств (Rosaceae и Brassicaceae) и числа порядков в спектре семейств от количества видов во флористической выборке (Ns – число видов; Np – номер позиции спектра семейств; 1 – позиция Rosaceae в спектре семейств; 2 – позиция Brassicaceae в спектре семейств; 3 – число позиций в спектре семейств) (цвет online)

Fig. 5. The dependence of the location in the spectrum of some families (Rosaceae and Brassicaceae) and the number of orders in the spectrum of families on the number of species in the floristic sample (Ns – number of species; Np – position number of the spectrum of families; 1 – position of Rosaceae in the spectrum of families; 2 – position of Brassicaceae in the spectrum of families; 3 – the number of positions in the spectrum of families) (color online)

### Параметры «хвостовой» части

#### Процент семейств, содержащих один вид.

Значительно реже флористы обращаются к анализу «хвостовой» части семейственного спектра. Головная часть спектра содержит в себе достаточно много информации, однако неоднократно отмечалось, что нельзя ограничиваться только ей [12]. «Хвостовая» часть спектра содержит мало видов и много семейств, то есть многочисленные повторы. Самое большое число повторов содержит последняя позиция спектра – семейства, содержащие один вид. По данному параметру в литературе встречались оценки флоры территории [например, 22]. О. В. Морозова по совокупности данных различных авторов отмечает закономерности изменения данного показателя [23].

Между тем этот показатель может быть одним из критериев оценки полноты выборки. При дальнейшей инвентаризации флоры на местности семейства и роды увеличивают видовой состав. В результате количество семейств, включающих один вид, должно снижаться, что

мы и наблюдаем по рис. 6. В итоге данный список должен максимально приближаться к перечню семейств либо действительно одновидовых в систематике, либо тех, которые в данной местности содержат лишь один вид (например, Fabaceae, Globulariaceae или Ephedraceae для условий Среднего Поволжья). Эти семейства мы можем для данной территории считать одновидовыми.

Как было отмечено выше, при числе видов менее 100 имеем родовые и семейственные спектры, которые слабо структурированы (рис. 7). Для флористических выборок, в составе которых более 700 видов, ситуация стабилизируется и приближается к типичной.

В интервале выборок 200–400 видов лишь 8–38% семейств из списка с одним видом являются действительно таковыми. Присутствие остальных представителей, которые входят в состав семейств, числящихся в списке с одним видом, еще не показано. Эти выборки являются далеко не полными, охватывают лишь часть возможных экотопов территории.

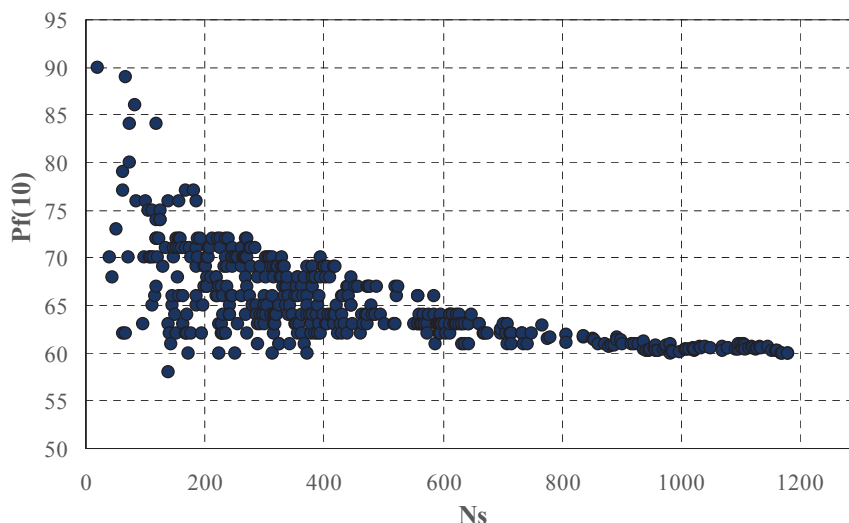


Рис. 6. Зависимость количества видов в десяти ведущих семействах от числа видов во флористической выборке ( $N_s$  – число видов,  $Pf(10)$  – % видов в 10 ведущих семействах)

Fig. 6. Dependence of the number of species in ten leading families on the number of species in the floristic sample ( $N_s$  – number of species,  $Pf(10)$  – % of species in 10 leading families)

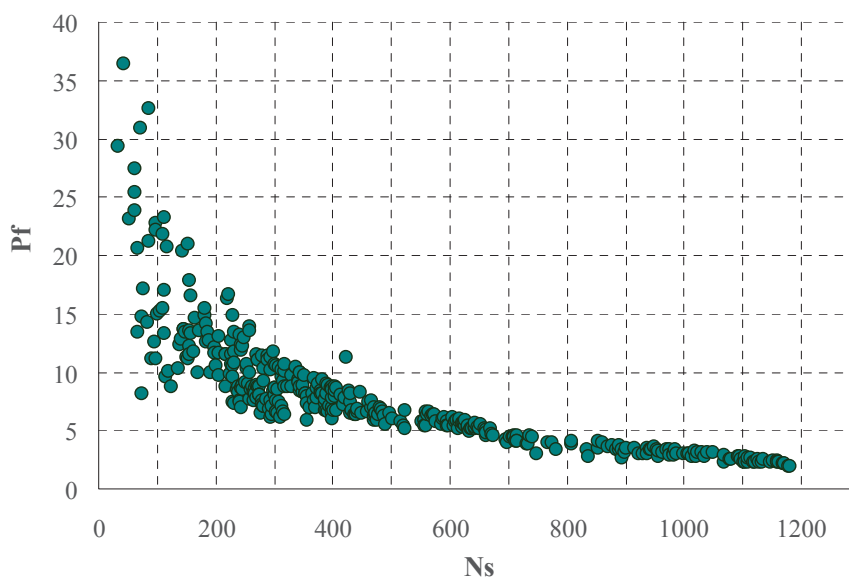


Рис. 7. Зависимость количества семейств, содержащих один вид, от числа видов во флористической выборке ( $N_s$  – число видов,  $Pf$  – % семейств, имеющих один вид)

Fig. 7. Dependence of the number of families containing one species on the number of species in the floristic sample ( $N_s$  – number of species,  $Pf$  – % of families having one species)

Для интервала выборок 600–800 видов этот показатель достигает 50%. Выявляются и представители истинно одновидовых семейств и семейств, имеющих несколько представителей. Часть одновидовых для исследуемой территории семейств включает в себя виды, имеющие на всей территории лишь единичные места произрастания (*Parnassiaceae*, *Rutaceae*). Поэтому для

их обнаружения необходимо обследовать определенные биотопы. Такие виды попадают в список лишь при расширении территории обследования.

В составе флоры всего Сокского физико-географического района насчитывается 27 семейств, содержащих 1 вид. Из них 80% семейств действительно одновидовые, а остальные же могут иметь еще представителей на изучаемой территории.





Таким образом, анализ состава семейств, включающих один вид, дает информацию о полноте выявленности флоры. Этот признак отражает состояние «хвостовой» части спектра в противовес первому рассмотренному признаку (состав триады ведущих семейств), который относится к «головной» части. Очевидно, «хвостовая» часть спектра формируется позже «головной».

#### **Параметры родового спектра**

**Ведущие роды родового спектра.** Количественная представленность родов указывает на экологические особенности изучаемых флор. Сформировавшись при различных природных условиях, флоры будут отличаться видовым обилием ведущих родов, представители которых сохраняют определенную схожесть экологических потребностей и адаптацию к окружающей среде.

Распределение обилия видов в самых крупных родах флоры (также как и семействах) по территории бывшего Советского Союза было изучено Л. И. Малышевым, который показал степень сходства изученных областей территории по семейственным и родовым спектрам и указал, что «области больше сходны между собою по семейственным спектрам, нежели по родовым» [11, с. 37]. Следовательно, состав родового спектра (по сравнению с семейственным) способен более подробно выявить индивидуальные черты изучаемых флор. Особенно это касается флор, расположенных географически рядом – например, на территории одного района или соседних физико-географических районов одной провинции.

Определенную характеристику дает как перечень ведущих родов, так и их последовательность. Перечень ведущих родов для территории Самаро-Ульяновского Поволжья нами был определен ранее (*Carex*, *Galium*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Astragalus*, *Salix*) на основании частоты их присутствия в составе первых пяти позиций родовых спектров физико-географических районов [24]. О какой-либо определенной последовательности же ведущих родов (по аналогии с ведущими семействами спектра) на территории Самаро-Ульяновского Поволжья говорить не приходится, так как она достаточно неоднородна. Однозначно показан лишь выход на первое место рода *Carex* после 1000 видов в выборке. Это подтверждает факт того, что «обилие видов *Carex* – общая черта еurasийских (в том числе и североазиатских) флор» [12, с. 162].

**Формирование родового спектра. Расположение ведущих родов.** Родовой спектр содержит меньше позиций, чем семейственный (см. рис. 5, 8). При увеличении числа видов в изучен-

ной нами совокупности флористических выборок число позиций родовых спектров возрастает от 1 до 19 (см. рис. 8). В процессе формирования головной части спектра в нее перемещаются все ведущие роды. Ведущие роды появляются в составе спектра достаточно рано (благодаря своей многочисленности). В составе выборок уже от 300 видов и выше присутствуют все роды, обозначенные нами как ведущие.

Однако положение ведущих родов еще очень различно и спектр полностью не сформирован. При малых флористических выборках они все входят в состав «хвостовой» части, а затем начинают перемещаться в головную часть. В процессе формирования спектра в «головной» части могут оказываться роды, не являющиеся в составе полной флоры ведущими (например, роды *Amaroria*, *Campanula*, *Centaurea* и др.). Эти роды тоже достаточно крупные, при увеличении количества видов они занимают свои соответствующие места в спектре. Формирование головной части спектра происходит поэтапно. В зависимости от количества видов в выборке она состоит из 1 или 8–10 родов. В ней также могут присутствовать повторы. Но, конечно, не во всех позициях сразу. Обычно это два повтора. Головная часть родового спектра флоры Сокского физико-географического района выглядит следующим образом: *Carex*, *Galium*, *Potentilla*, *Astragalus*, *Artemisia* и *Viola*, *Salix* и *Veronica*, *Centaurea*, *Campanula* и *Euphorbia*. Для последующих позиций характерны трех- и более кратные повторы, т.е. начало «хвостовой» части спектра.

Порядок перемещения родов в «головную» часть спектра может быть различным. Он зависит от экотопической характеристики (принадлежности) местности, с которой берется флористическая выборка. Чаще всего первыми могут оказываться роды *Astragalus* и *Galium* (в случае охвата степных и лесостепных сообществ) и *Carex* (в случае преобладания прибрежно-водных сообществ). Обычно позже всех в головную часть перемещается род *Salix*. Все шесть ведущих родов перемещаются в головную часть спектра после достижения выборки объема 1100 видов. Это происходит после выхода рода *Carex* на первое место. Очевидно, на данной стадии родовой спектр может считаться сформированным полностью.

#### **Заключение**

На примере лесостепной зоны Самарского Заволжья (Сокский физико-географический район) по параметрам таксономических спектров обозначим основные уровни флористической выборки в зависимости от числа видов (рис. 9).

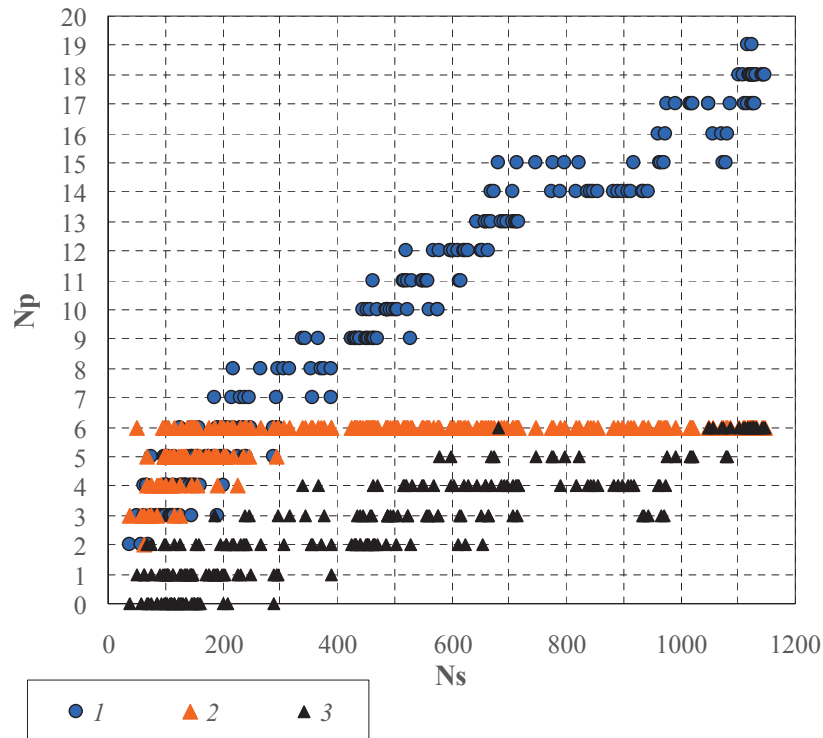


Рис. 8. Зависимость числа позиций, числа ведущих родов в спектре и числа ведущих родов в головной части спектра от количества видов во флористической выборке (Ns – число видов, Np – номер позиции спектра родов; 1 – число позиций, 2 – число ведущих родов, 3 – число ведущих родов в головной части спектра) (цвет online)

Fig. 8. The dependence of the number of positions, the number of leading genera in the spectrum and the number of leading genera in the head of the spectrum on the number of species in the floristic sample (Ns – number of species, Np – position number of the spectrum of genera; 1 – number of positions, 2 – number of leading genera, 3 – the number of leading genera in the head of the spectrum) (color online)

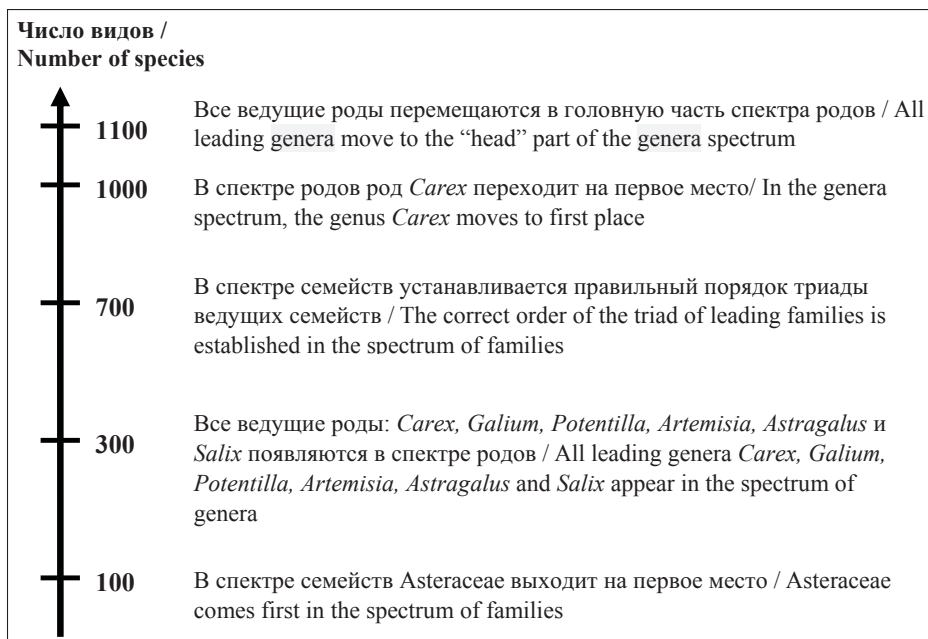


Рис. 9. Уровни флористической выборки по параметрам таксономических спектров  
Fig. 9. Levels of floristic sampling according to the parameters of taxonomic spectra



На стадии малочисленных выборок формируются позиции семейственного спектра, при более многочисленных – родового. Для лесостепной зоны Самарского Заволжья можно обозначить постулат о том, что флорой можно считать выборку около 700 видов и более, что соответствует установлению в указанных географических условиях правильной для данной местности триады ведущих семейств. Это первый основной рубеж соответствия выборки первостепенной характеристики флоры. Однако, если сравнительный анализ флор планируется проводить по родовым спектрам, необходимо иметь выборку 1000 видов и более.

#### Благодарности

Работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук согласно тематическому плану Института экологии Волжского бассейна РАН по темам с регистрационными номерами в ЕГИСУ НИОКТР АААА-А17-117112040039-7 и АААА-А17-117112040040-3.

#### Список литературы

1. Юрцев Б. А., Камелин Р. В. Основные понятия и термины флористики : учеб. пособ. по спецкурсу. Пермь : Перм. ун-т, 1991. 80 с.
2. Толмачев А. И. Богатство флор как объект сравнительного изучения // Вестн. ЛГУ. 1970. № 9. С. 71–83.
3. Шмидт В. М. Статистические методы сравнительной флористики. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 176 с.
4. Физико-географическое районирование Среднего Поволжья / под ред. А. В. Ступишина. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1964. 173 с.
5. Толмачев А. И. Введение в географию растений. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. 244 с.
6. Кузнецова Р. С. Бассейн реки Сок : Общая характеристика притоков // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2014. Т. 16, № 5. С. 36–42.
7. База данных «Флористические описания локальных участков Самарской и Ульяновской областей» (FD SUR) : св-во о гос. регистрации базы данных Рос. Федерация / М. А. Аристова, Г. С. Розенберг, Г. Э. Кудинова, А. Г. Розенберг, А. В. Иванова, В. М. Васюков, Н. В. Костина, С. В. Саксонов ; № 2018621983 ; зарегистр. 12.11.2018.
8. Кудашкина Т. А., Корчиков Е. С., Плаксина Т. И. «Гора Копейка» – уникальный памятник природы Кинельских яров (Самарская область) // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2009. Т. 11, № 1 (3). С. 436–440.
9. Корчикова Т. А. Флористический состав памятника природы Абдул-Заводская дубрава (Самарская область) // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2010. Т. 12, № 1 (5). С. 1393–1397.
10. Ильина Н. С., Ильина В. Н., Волынцева А. Д. Изучение флоры памятника природы Успенская шишка // Вестн. Самар. гос. пед. ун-та. Естественно-географический факультет. 2008. Вып. 6, ч. 1. С. 37–41.
11. Малышев Л. И. Флористические спектры Советского Союза // История флоры и растительности Евразии. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. С. 17–40.
12. Камелин Р. В. География растений : учеб. пособие. СПб. : Изд-во ВВМ, 2018. 306 с.
13. Саксонов С. В., Сенатор С. А. Путеводитель по Самарской флоре (1851–2011). Сер. Флора Волжского бассейна. Т. I. Тольятти : Кассандра, 2012. 512 с.
14. Раков Н. С., Саксонов С. В., Сенатор С. А., Васюков В. М. Сосудистые растения Ульяновской области. Сер. Флора Волжского бассейна. Т. II. Тольятти : Кассандра, 2014. 295 с.
15. Хохряков А. П. Основные типы флористических спектров Средней России // Флора Центральной России : материалы науч. конф. М. : Б. и., 1995. С. 12–16.
16. Хохряков А. П. Таксономические спектры и их роль в сравнительной флористике // Бот. журн. 2000. Т. 85, № 5. С. 1–11.
17. Гельтман Д. В., Антонова Н. Н., Бялт В. В., Грабовская А. Е., Дорофеев В. И., Золкина Л. А., Конечная Г. Ю., Красовская Л. С., Крупкина Л. И., Левичев И. Г., Медведева Н. А., Портениер Н. Н., Соколова И. В. Состав флоры сосудистых растений Российской Федерации // Изв. РАН. Сер. Биологическая. 1998. Т. 25, № 1. С. 93–97.
18. Иванова А. В., Костина Н. В., Розенберг Г. С., Саксонов С. В. Семейственные спектры флор территории Волжского бассейна // Бот. журн. 2016. Т. 101, № 9. С. 1042–1055.
19. Саксонов С. В. Самаролукский флористический феномен. М. : Наука, 2006. 263 с.
20. Иванова А. В., Костина Н. В., Лысенко Т. М., Козловская О. В. Особенности флоры Мелекесско-Ставропольского физико-географического района // Самар. науч. вестн. 2017. № 4 (21). С. 35–40.
21. Иванова А. В., Костина Н. В., Лысенко Т. М. Изучение неоднородности территории по кривой «виды-площадь» для исследования ее флористической структуры (на примере Сокского физико-географического района) // Самар. науч. вестн. 2018. № 2 (23). С. 49–55.
22. Казакова М. В. Флора Рязанской области. Рязань : Рус. слово, 2004. 387 с.
23. Морозова О. В. Таксономическое богатство флоры Восточной Европы: факторы пространственной дифференциации. М. : Наука, 2008. 328 с.
24. Иванова А. В., Костина Н. В., Аристова М. А. Родовой спектр в анализе флоры Самаро-Ульяновского Поволжья // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 196–206. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-196-206>

#### Образец для цитирования:

Иванова А. В., Костина Н. В., Аристова М. А. Зависимость таксономических параметров флор от размеров выборки // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 404–416. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-404-416>



## Dependence of Taxonomic Flora Parameters on Sample Sizes

**A. V. Ivanova, N. V. Kostina, M. A. Aristova**

Anastasia V. Ivanova, <https://orcid.org/0000-0003-2467-546X>, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, 10 Komzin St., Togliatti 445003, Russia, nastia621@yandex.ru

Natalia V. Kostina, <https://orcid.org/0000-0002-8666-2130>, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, 10 Komzin St., Togliatti 445003, Russia, knva2009@yandex.ru

Margarita A. Aristova, <https://orcid.org/0000-0001-6389-8485>, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, 10 Komzin St., Togliatti 445003, Russia, margokostina@yandex.ru

The problem of assessing the completeness of the identification of flora is a very significant element of study. The approach proposed in this work is based on an assessment of the complex of parameters of the taxonomic spectra of flora (generic and family). As a model object, the authors considered the flora of the Soksky physical-geographical region, located in the Trans-Volga sector of the Samara region. To solve this problem, the authors used 124 source floristic lists and their combinations (over 400). Depending on the increase in the number of species according to the parameters of taxonomic spectra, the authors determined the main levels of floristic sampling. Such levels determine the reliable characteristics of the flora, corresponding to the ecological and geographical conditions. The authors found that, in the spectrum of families, the first triad of leading families (Asteraceae – Poaceae – Fabaceae) was established after 700 species were in the sample. The fourth place in the spectrum is occupied by the Rosaceae family, and the fifth, designated by us as the leading Brassicaceae, effectively takes its place with only 1000 species in the sample. The content of species in the top ten families tends to a value of 61–60% with 800 species or more. As part of the flora of the Soksky district, among families containing one species, there are 80% of families, which for this territory we can consider really repetitive? The formation of the spectrum of genera is somewhat slower than that of the spectrum of families. Leading genera (*Carex*, *Galium*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Astragalus*, *Salix*) appear in the spectrum when the number of samples is already 300 species or more and is stably present in its composition. However, they all move to the head of the spectrum only after reaching a sample size of 1100 species.

**Keywords:** spectra of flora families and genera, taxonomic parameters, leading genera, leading families, flora sampling, Samara Trans-Volga region, Soksky physical-geographical region.

Received: 11.03.2020 / Accepted: 16.04.2020 / Published: 30.11.2020

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

**Acknowledgments:** The research is conducted in the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of RAS in accordance with the following topics of the Institute of Ecology of the Volga River Basin of RAS: AAAA17-117112040040-3 and AAAA-A17-117112040039-7.

## References

1. Yurcev B. A., Kamelin R. V. *Osnovnyye ponyatiya i terminy floristiki* [Basic concepts and terms of floristry]. Perm, Perm. un-t, 1991. 80 p. (in Russian).
2. Tolmachev A. I. The wealth of flora as an object of comparative study. *Vestnik LGU*, 1970, no. 9, pp. 71–83 (in Russian).
3. Shmidt V. M. *Statisticheskiye metody sravnitel'noy floristiki* [Statistical methods of comparative floristry]. Leningrad, Izd-vo Leningr. un-ta, 1980. 176 p. (in Russian).
4. A. V. Stupishina, ed. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Srednego Povolzh'ya* [Physical and geographical zoning of the Middle Volga region]. Kazan', Izd-vo Kazan. un-ta, 1964. 173 p. (in Russian).
5. Tolmachev A. I. *Vvedeniye v geografuyu rasteniy* [Introduction to plant geography]. Leningrad, Izd-vo Leningr. un-ta, 1974. 244 p. (in Russian).
6. Kuznecova R. S. Sok river basin: General characteristics of tributaries. *Izv. of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 5, pp. 36–42 (in Russian).
7. *Baza dannykh "Floristicheskiye opisaniya lokal'nykh uchastkov Samarskoy i Ulyanovskoy oblastey (FD SUR)": Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh* [Database 'Floristic descriptions of local areas of Samara and Ulyanovsk regions (FD SUR)': Certificate of state registration of database]. M. A. Aristova, G. S. Rozenberg, G. E. Kudinova, A. G. Rozenberg, A. V. Ivanova, V. M. Vasyukov, N. V. Kostina, S. V. Saksonov; no. 2018621983; 12.11.2018 (in Russian).
8. Kudashkina T. A., Korchikov E. S., Plaksina T. I. "Gora Kopeyka" – a unique natural monument of the Kinelsky Yarov (Samara region). *Izv. of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 1 (3), pp. 436–440 (in Russian).
9. Korchikova T. A. Floristic structure of the natural sanctuary Abdul-zavodskaya Oak-Forest (Samara oblast). *Izv. of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1 (5), pp. 1393–1397 (in Russian).
10. Ilina N. S., Ilina V. N., Volynceva A. D. Studying flora of nature monument Uspenskaya Shishka. *Samara State Pedagogical University Bulletin*, 2008, iss. 6, pt. 1, pp. 37–41 (in Russian).
11. Malyshev L. I. Floristicheskiye spektry Sovetskogo Soyuza [Floral spectra of the Soviet Union]. In: *Istoriya flory i rastitel'nosti Evrazii* [History of flora and vegetation of Eurasia]. Leningrad, Leningr. otd-nie Nauka Publ., 1972, pp. 17–40 (in Russian).
12. Kamelin R. V. *Geografiya rasteniy* [Geography of plants]. St. Petersburg, Izd-vo VVM, 2018. 306 p. (in Russian).
13. Saksonov S. V., Senator S. A. *Putevoditel' po Samarskoy flore (1851–2011). Ser. Flora Volzhskogo basseyna. T. 1.* [Guide to the flora of Samara (1851–2011). Flora of the Volga basin. Vol. 1]. Togliatti, Cassandra Publ., 2012. 512 p. (in Russian).





14. Rakov N. S., Saksonov S. V., Senator S. A., Vasyukov V. M. *Sosudistyye rasteniya Ul'yanovskoy oblasti. Flora Volzhskogo basseyna. T. II* [Vascular plants of the Ulyanovsk region. Flora of the Volzhsky basin. Vol. II]. Togliatti, Kassandra Publ., 2014. 295 p. (in Russian).
15. Hohryakov A. P. Osnovnyye tipy floristicheskikh spektrov Sredney Rossii. [The main types of floristic spectra of Central Russia]. In: *Flora Centralnoj Rossii: materialy nauch. konf.* [Flora of Central Russia: materials of the scientific conference]. Moscow, 1995, pp. 12–16 (in Russian).
16. Hohryakov A. P. Taxonomic spectra and their role in comparative floristry. *Botanicheskiy Zhurnal*, 2000, vol. 85, no 5, pp. 1–11 (in Russian).
17. Geltman D. V., Antonova N. N., Byalt V. V., Grabovskaya A. E., Dorofeev V. I., Zolkina L. A., Konechnaya G. Yu., Krasovskaya L. S., Krupkina L. I., Levichev I. G., Medvedeva N. A., Portenier N. N., Sokolova I. V. Flora of the vascular plants of the Russian Federation. *Biology Bulletin*, 1998, vol. 25, no. 1, pp. 78–82 (in Russian).
18. Ivanova A. V., Kostina N. V., Rozenberg G. S., Saksonov S. V. Family spectra of the Volga basin flora. *Botanicheskiy Zhurnal*, 2016, vol. 101, no. 9, pp. 1042–1055 (in Russian).
19. Saksonov S. V. *Samarolukskiy floristicheskiy fenomen* [Samaroluksky floristic phenomenon]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 263 p. (in Russian).
20. Ivanova A. V., Kostina N. V., Lysenko T. M., Kozlovskaya O. V. The flora peculiarities of the Melekess-Stavropol physiographic region. *Samara Journal Science*, 2017, no. 4 (21), pp. 35–40 (in Russian).
21. Ivanova A. V., Kostina N. V., Lysenko T. M. Territory heterogeneity study on the “types-areas” curve for a research of its structure (on the example of the Soksky physiographic area). *Samara Journal Science*, 2018, no. 2 (23), pp. 49–55 (in Russian).
22. Kazakova M. V. *Flora Ryazanskoy oblasti* [Flora of Ryazan region]. Ryazan, Russkoe slovo Publ., 2004. 388 p. (in Russian).
23. Morozova O. V. *Taksonomicheskoye bogatstvo flory Vostochnoy Evropy: faktory prostranstvennoy differentsiatsii* [Taxonomic wealth of flora Eastern Europe: spatial differentiation factors]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 328 p. (in Russian).
24. Ivanova A. V., Kostina N. V., Aristova M. A. Generic Spectrum in the Analysis of Flora in Samara-Ulyanovsk Volga Region. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 196–206 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-196-206>

**Cite this article as:**

Ivanova A. V., Kostina N. V., Aristova M. A. Dependence of Taxonomic Flora Parameters on Sample Sizes. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 404–416 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-404-416>



УДК 635.965.282.6:581.522.4(571.1)

## Биологические особенности *Gladiolus hybridus* в связи с адаптацией в Сибирском регионе

Л. Л. Седельникова, И. Г. Воробьева



Седельникова Людмила Леонидовна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН, Новосибирск, lusedelnikova@yandex.ru

Воробьева Ирина Геннадьевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения РАН, Новосибирск, vorobig@ngs.ru

Проанализированы адаптационные возможности сортового разнообразия гладиолуса гибридного – *Gladiolus hybridus* в условиях лесостепной зоны Западной Сибири. Показаны морфобиологические особенности формирования побега. Представлены многолетние (1999–2019 гг.) результаты сезонного развития растений в генеративном возрастном состоянии. Установлена зависимость сроков цветения сортов из разных групп от суммы положительных температур. Цветение в условиях Новосибирска наступает у ранних сортов при сумме положительных температур  $>1462^{\circ}\text{C}$ , средних  $>1558^{\circ}\text{C}$ , поздних  $>1711^{\circ}\text{C}$ . Определено, что в предзимье конус нарастания побега возобновления формирует зачаточные вегетативные органы, что соответствует второму этапу органогенеза. Дифференциация конуса нарастания побега на генеративные органы начинается в период интенсивного роста побега в июне. В течение 60–73 дней конус нарастания побега проходит внутрипочечное развитие с III по VIII этапы органогенеза. IX–XII этапы органогенеза соответствуют фенофазам от цветения до плодоношения. Продолжительность цветения составляет 10–25 дней, сезонного развития – 118–123 дня. Отмечено понижение коэффициента вегетативного размножения у сортов с 2015 по 2018 г. в 2–12 раз. Основной экологической нишей возбудителя заболевания фузариозной гнили гладиолусов (возб. *Fusarium oxysporum* f. *gladioli*) являются подземные органы (корни, клубнелуковицы), а дополнительной – надземные органы растений. Сравнение степени устойчивости гладиолусов к фузариозу показало разную реакцию сортов в период вегетации и хранения клубнелуковиц.

**Ключевые слова:** *Gladiolus hybridus*, биология развития, патогенные грибы, Западная Сибирь.

Поступила в редакцию: 18.02.2020 / Принята: 23.03.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-417-426>

Клубнелуковичный геофит гладиолус гибридный – *Gladiolus hybridus* hort., сем. Iridaceae Juss., род *Gladiolus* L. – представитель декоративных многолетников, незимующих в открытом грунте Сибири. Создание и развитие коллекционного фонда в Центральном сибирском ботаническом

саду (ЦСБС СО РАН) начато в 60-е гг. прошлого века [1] и связано с таким основным направлением того времени, как благоустройство и озеленение промышленных городов Сибирского региона. В период с 1974 по 1984 г. нами изучено 370 сортов отечественной и зарубежной селекции [2], позднее проанализировано 110 сортов [3]. Значительный вклад сделан в отбор устойчивых сортов к патогенным грибам [4, 5]. Отдельным направлением имело место исследование влияния мутагенных факторов на клубнелуковицы гладиолуса, что позволило выявить возможность проявления таких новых признаков, как махровость цветков и изменчивость их окраски [6]. Определение биологически активных веществ в вегетативных органах послужило новым направлением в поисках использования гладиолуса не только в качестве декоративного растения, но и как растительного сырья, содержащего аскорбиновую кислоту, сапонины, крахмал [7]. Дикорастущие гладиолусы в лесостепной зоне Западной Сибири в условиях культуры проходят сезонный цикл развития и зимуют [3] в отличие от культиваров. Сортовое разнообразие *G. hybridus* во многих регионах России и за рубежом остается основной срезочной культурой открытого грунта [8–11]. В последние 10–15 лет исследования и поддержание коллекций гладиолусов проводятся довольно узко в отдельных ботанических садах и научных учреждениях России [3, 12–14].

Цель работы заключалась в анализе биологических особенностей сортового разнообразия *Gladiolus hybridus* в Западной Сибири.

### Материалы и методы

Объектами исследования служили 60 сортов гладиолуса гибридного – *Gladiolus hybridus* hort., сем. Iridaceae Juss., биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте», УНУ № USU 440534. Растения выращивали на участке лаборатории интродукции декоративных растений, расположенном в юго-восточном районе лесостепной Приобской агроклиматической провинции. За последние двенадцать лет погодные условия района интродукции в течение вегетационных периодов были крайне противоречивы. По гидротермиче-



ским показателям тепла и запасам влаги 2007, 2012, 2016 гг. были теплые, засушливые, особенно во второй половине; 2008, 2010, 2015, 2019 гг. – теплые, умеренно увлажненные; 2009, 2013–2014, 2017–2018 гг. – прохладные, избыточно увлажненные; 2011 г. – слабозасушливый с ранней теплой весной. Изучены биоморфологические особенности сортов генеративного возрастного состояния, как наиболее важного периода в малом жизненном цикле развития особи. За главный побег принимали первый по происхождению материнский побег [15], последующие побеги замещения клубнелуковицы рассматривали как побеги возобновления  $n$ -го порядка ветвления, это монокарпические побеги. Этапы органогенеза с элементами морфогенеза описаны по методике МГУ [16, 17]. Идентификация возбудителей заболеваний гладиолусов проводилась по общепринятым методикам [4]. Декоративные качества определены по 100-балльной шкале [18]. Классификация сортов приведена по общепринятой Международной классификации [19]. Посадку клубнелуковиц осуществляли по среднесуточным данным 24–28 мая, выкопку 20–25 сентября. Соблюдали четырех-пятилетний культурооборот. Статистическую обработку выполняли в программе Statistica 6.1 и Microsoft Office Excel 2007.

## Результаты и их обсуждение

Сезонное развитие сортов гладиолуса гибридного в условиях лесостепной зоны Западной Сибири происходило путем формирования надземного вегетативно-генеративного побега и подземной его части: материнской и замещающей ее дочерней клубнелуковицы с клубнечками (рис. 1, а). По среднесуточным данным массовые всходы наблюдали в конце первой декады июня. Побег возобновления с вегетативными зачатками листьев закладывается у материнской клубнелуковицы за год до цветения и данное состояние характеризуется II этапом органогенеза. Указанный этап нами подразделен на два подэтапа: Па – побег в состоянии относительного покоя в период хранения клубнелуковиц (сентябрь–март) с 3–4 метамерами зачатков листьев; Пб – побег в весенний период хранения клубнелуковиц за 30 дней до посадки (апрель–май) при температуре 18–20°С с 4–8 метамерами зачатков листьев. Сокращенный онтогенез выражен в малом жизненном цикле развития монокарпического (годового) побега гладиолуса от начала его формирования до вегетации, цветения и отмирания. В генеративный период онтогенеза у клубнелуковицы, согласно данным [20], формируются побеги трех типов: главный, возобновления, вегетативного размножения. Раз-

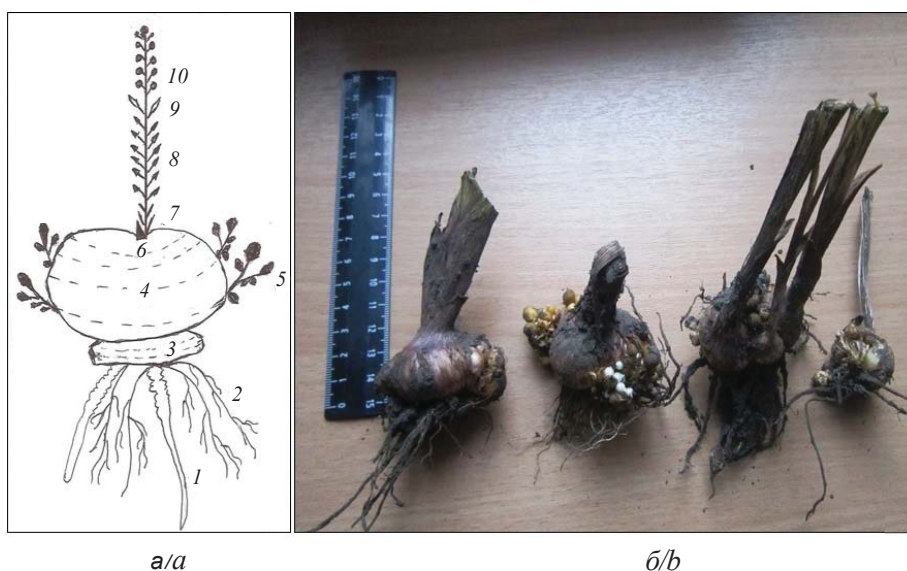


Рис. 1. Схема монокарпического побега (а) и вегетативные клоны (б) *Gladiolus hybridus*: 1 – контрактильные корни; 2 – придаточные корни; 3 – отмершая, материнская клубнелуковица; 4 – дочерняя клубнелуковица; 5 – клубнечки; 6 – побег возобновления; 7 – низовые (неассимилирующие) листья; 8 – срединные (ассимилирующие) листья; 9 – верховые листья; 10 – соцветие с цветками; 1–6 – зона возобновления; 7 – зона торможения; 8–10 – зона обогащения

Fig. 1. Monocarp escape diagram (a) and vegetative clones (b) of *Gladiolus hybridus*: 1 – contractile roots; 2 – adventitious roots; 3 – dead, maternal corm; 4 – daughter corm; 5 – tubers; 6 – renewal shoot; 7 – lower (non-assimilating) leaves; 8 – middle (assimilating) leaves; 9 – upper leaves; 10 – inflorescence with flowers; 1–6 – renewal zone; 7 – braking zone; 8–10 – enrichment zone



витие органообразовательных процессов у главного (монокарпического) побега гладиолуса зависит от генотипа, гидротермических и агротехнических факторов. Отмечено, что в фазе выхода с третьего по десятый настоящий (срединный) лист в побеге формируются генеративные органы (III–VII этапы органогенеза) и их внутрипочечное состояние продолжается 61–67 день в зависимости от того, к какой группе по сроку цветения: ранней (Р), средней (С) или поздней (П), принадлежит сорт (табл. 1).

Цветение гладиолусов в условиях Западной Сибири наступает у (Р) сортов при сумме положительных температур  $>1462^{\circ}\text{C}$  в третьей декаде июля, на 68–70-й день от посадки; (С)  $>1558^{\circ}\text{C}$  в первой второй-декаде августа, на 83–85-й день от посадки; (П)  $>1711^{\circ}\text{C}$  в третьей декаде августа–первой декадах сентября, на 98–100-й день от посадки. Vegetационный период продолжался 118–123 дня до первых осенних заморозков, которые наблюдаются во второй–третьей декадах сентября.

Таблица 1 / Table 1

Средняя продолжительность этапов органогенеза монокарпического побега *Gladiolus hybridus* в сезонный период

The average duration of the organogenesis stages of the monocarpic shoot of *Gladiolus hybridus* in the seasonal period

Этапы органогенеза / Stages of organogenesis	Продолжительность, дней / Duration, days	Формирование органов / The formation of the organs	Фенофаза / The phenological stage	Фенодата / Phenodata
IIб	21–34	5–6 зачатков листьев / 5–6 rudiments of leaves	Рост побега / Growth of escape	25.04–28.05
III	8–9	Оси соцветия / The axis of the inflorescence	3-й с* лист / 3th c* leaf	04.06–08.06
IV	13–14	Формирование 1-го цветка / Formation of the first flower	4–5-й лист / 4–5th leaf	14.06–23.06
V	14–15	Цветков в соцветии / Flowers in the inflorescence	6-й лист / The 6th leaf	19.06–28.06
VI	13–15	Андроцея / Androecium's	7–8-й лист / 7–8 leaf	28.06–09.07
VII	13–14	Гинецея / Gynoecium's	9–10-й лист / 9–10-th leaf	11.07–19.07
VIII	12–13	Всех органов цветка / All organs of the flower	Бутонизация / Budding	28.07–05.08
IX	6–10	Оплодотворение / Fertilization	Цветение / Flowering	30.07–25.08
X–XII	18–25	Семена / Seed's	Плодоношение / Fructification	10.08–10.09

Примечание. с\* – срединный (ассимилирующий) лист.

Note. c\* – middle (assimilating) leaf.

Ранее нами установлено, что в прегенеративный период главный (материнский) побег нарастает моноподиально. В генеративный период онтогенеза монокарпические побеги возобновления нарастают симподиально. Продолжительность жизни побега возобновления в генеративный период (от внутрипочечного формирования до естественного отмирания) составляет 15–20 мес. Из них вегетивно-зачаточное состояние длится 12–13 мес., генеративно-зачаточное – 2–2,5 мес., генеративно-надземное развитие – 2–2,5 мес., в виде побега ежегодно отмирающей материнской клубнелуковицы – 1–2 мес. [3]. В настоящем исследовании клубнелуковица рассмотрена как подземный видоизмененный побег с сильно укороченными листовыми междоузлиями. Это многолетний осевой орган, симподий, из ежегодно формирующегося вегетативно-генеративного побега с

дициклическим типом развития и вегетативных побегов, из которых формируются клубнелуковицы. Надземный побег включает соцветие с цветками и низовыми, срединными (ассимилирующими), реже верховыми листьями, а подземный – клубнелуковицу с клубнелуковицами, что согласуется с исследованиями, проведенными другими авторами [21, 22].

Полученные данные уточнены последними результатами, согласно которым побег гладиолуса имеет три зоны: обогащения (соцветие, верховые и срединные листья); торможения (низовые листья); возобновления (ежегодно сформированная клубнелуковица с клубнелуковицами) (см. рис. 1, а). У всех сортов четко выражена биоморфологическая цикличность в развитии побега. Это оказывает прямое влияние на формирование клона (см. рис. 1, б) и дальнейшее развитие от него жизнеустойчивого потомства.





Установлены основные биологические особенности сортов *G. hybridus*, культивируемых в Сибирском регионе: клубнелуковицы зимуют при низких положительных температурах 4–8°С, влажности воздуха 60–70%; корневая система и побег отрастают при 10–15°С; генеративные органы внутривушечно закладываются в период роста и развития вегетативных органов; цветут в летне-осенний период; ежегодно формируют дочернюю клубнелуковицу с клубнепочками.

Многолетние исследования патогенной микрофлоры гладиолусов в лесостепи Западной Сибири показали, что видовой состав грибов принадлежит к 17 родам и 2 классам [4, 5]. Подземные побеги (клубнелуковицы и клубнепочки) были поражены грибами из 11 родов, среди которых наиболее часто встречались: *Fusarium oxysporum*, *F. moniliforme*, *Penicillium corymbiferum*, *Botrytis cinerea*, виды рода *Curvularia*. Надземные побеги заселяли грибы из 10 родов. Среди них преобладали виды родов *Fusarium* и *Curvularia*. Все обнаруженные микромицеты были условно объединены в 3 группы: а) паразитирующие в течение всей вегетации растений (*Fusarium*, *Curvularia*, *Septoria*); б) паразитирующие в определенные фазы развития растений (*Alternaria*, *Botrytis*, *Stemphylium*); в) обнаруживаемые только в период хранения клубнелуковиц (*Chaetomium*, *Gliocladium*, *Torula*).

Сорта играют существенную роль и в реализации инфекционного потенциала почвенных фитопатогенов [23, 24]. Анализ 48 сортов *G. hybridus* в течение пяти лет показал, что устойчивые сорта ограничивают экологические ниши возбудителей фузариоза. Заболеваемость подземных органов болезнями у высокоустойчивых сортов – *Lucina* (OP 243), *Mecky* (CP 347), *December Snow* (C 400),

*Dixiland* (P 455), *White Frosting* (OP 400) и др. в среднем составляла 10%, с оценкой 1,3–1,4 балла. Это в 2 раза меньше по сравнению с восприимчивыми сортами – *Ну, Погоди* (C 455), *Улыбка Гагарина* (C 543), *Чудное Мгновение* (C 545), *Янтарная Балтика* (PC 523) и др., где степень поражения фузариозом составляла 2,7–2,9 балла (рис. 2, а). Причем даже в благоприятные для развития фузариоза годы (2013–2014 гг., 2017–2018 гг.), дополнительные экологические ниши на надземных органах формировались в два раза реже по сравнению с восприимчивыми к болезни сортами, которые быстро выпадали из коллекции. В годы, когда стрессовое действие засухи (2007, 2012, 2016 гг.) на растениях-хозяевах сочеталось с благоприятными гидротермическими условиями, симптомы болезни развивались как на подземных (основная ниша), так и на надземных (дополнительная ниша) органах растений, вызывая гибель до 46,2% растений – восприимчивых к фузариозу сортов гладиолусов. Устойчивые сорта гладиолусов ограничивали формирование экологических ниш фитопатогенов на протяжении их жизненного цикла, подавляя осуществление биологических тактик (размножения, выживания и трофических связей) и создавали механические, биохимические, микробиологические барьеры для проникновения фитопатогенов в органы растений *G. hybridus* для дальнейшего питания и размножения в них. У устойчивых сортов снижается продолжительность, скорость и интенсивность эпифитотического процесса болезней, создаются предпосылки для долговременной экологически безопасной стабилизации фитосанитарного состояния агроэкосистем и формирования здоровых особей.



Рис. 2. Средний сорт Чудное Мгновение (а) с заболеванием *Fusarium oxysporum* f. *gladioli* во время вегетации, устойчивый ранний сорт *Mecky* (б) (цвет online)

Fig. 2. Medium *Wonderful Moment* variety (a) with the disease *Fusarium oxysporum* f. *gladioli* during the growing season, stable early *Mecky* variety (b) (color online)



В период вегетации пожелтение гладиолусов следует рассматривать как комплексное заболевание, в котором принимают участие грибы родов *Fusarium*, *Curvularia*, *Alternaria*. Степень поражения сорта болезнью в сезонный период связана с его генотипом (срок цветения, класс цветка), а также возрастом клубнелуковиц. Установлено, что лучшими предшественниками гладиолусов являются пар и однолетние цветочные культуры (кроме астр). Пионы способствуют накоплению инфекционного начала в почве, поэтому после этой культуры почвы без предварительного оздоровления не пригодны для выращивания клубнелуковиц.

В условиях хранения на клубнелуковицах встречаются фузариоз, септориоз, строматиниоз, коричневая сердцевинная и пенициллезная гнили. Распространенность заболеваний варьировала в пределах 18–45%. Клубнелуковицы были инфицированы как одним, так и несколькими возбудителями заболеваний. Клубнелуковицы сортов раннего срока цветения при хранении более устойчивы к заболеваниям (слабое и среднее поражение). В группе сортов, относящихся к средним срокам цветения, наблюдалось варьирование степени поражения от слабой до сильной. Клубнелуковицы крупноцветковых сортов поражались сильнее. Не установлено четкой приуроченности патогенов к определенным тканям клубнелуковиц. Пятна отмершей ткани формировались по всей поверхности и в области побега возобновления. Распространение фузариозной гнили находилось на уровне 18–27%. Установлено, что развитию болезней гладиолусов, в том числе фузариозной гнили (*Fusarium oxysporum* f. *gladioli*) [25], способствовали повышенная температура и влажность воздуха в период хранения. Нами отмечен выпад клубнелуковиц от 14,6 до 45% с 1995 по 2002 г. В настоящий период в коллекции около 60 сортов, что в шесть раз меньше по сравнению с 1985 г. Ежегодно признаки поражения имели около 30% сортов. Более склонны к фузариозу в период хранения сорта средних сроков цветения из класса крупноцветковых. Сорта ранних сроков цветения проявили преимущественно слабую восприимчивость к данному заболеванию. Нами установлено, что в период осенне-зимне-весеннего хранения, устойчивостью обладали сорта старой селекции (см. рис. 2, б) со средними декоративными качествами: *Blue Isle* (С 486), *Mecky* (СР 347), *Svetechisy* (Р 342), *Plum Tart* (Р 478), *Rosetone* (ОР 365), *Sea Foam* (РС 500), *Ruddiglow* (ОР 256), *Chanticleer* (СР 462). Эти сорта длительный период иссле-

дования (10–15 лет и более) были устойчивы к вредителям и болезням в условиях лесостепной зоны Западной Сибири. Отмечено, что низкую устойчивость и быстрое вырождение имели сорта отечественной селекции со средними, высокими и отличными декоративными качествами. С возрастом клубнелуковиц многие сорта поражались патогенными грибами и выпадали из коллекции, слабо размножались, вырождались и теряли декоративность. Омолаживание сортов и их сохранение возможно при ежегодном подращивании клубнечек в защищенном грунте. Этот прием нами использовался в 1974–1995 гг. [26]. Возможно омолаживание при использовании методов культуры *in vitro*.

В период с 2015 по 2019 г. у большинства сортов с возрастом клубнелуковиц наблюдали снижение количества формирующихся клубнечек в 2–10 раз. Наблюдала их клональную разнокачественность в созревании, формировании мелких клубнечек (деток), размером 0,3 см, с низким коэффициентом вегетативного размножения и жизнеспособности в период хранения. Их всхожесть составляла 5–10%, причем этот показатель зависел от сорта, возраста и погодных условий вегетации. За период 2015–2018 гг. проведен сравнительный анализ коэффициента вегетативного размножения ( $k$ ) у пяти сортов разного срока цветения (Р, СР, С), размера цветка, декоративности, устойчивости к заболеваниям (табл. 2). Установлено, что у сорта *Moskva Belokamennay* (РС 400) в 2015 г.  $k$  был в 1,5–2,5 раза меньше по сравнению с другими сортами, а к 2018 г.  $k$  был в 3 раза ниже, чем в 2015 г. С 2015 по 2018 г. отмечена тенденция уменьшения  $k$  в 6–12 раз у сортов: *Donna Maria* (С 520), *Chanticleer* (РС 462), *Plum Tart* (РС 400). Однако малодекоративный, но устойчивый к болезням сорт *Svetechisy* (Р 342) имел самые высокие показатели:  $k = 40,4 \pm 0,76$  в 2015 г., которые к 2018 г. были также снижены, но только в 2 раза, что в 3–6 раз выше по сравнению с другими сортами. Сорта с низким  $k$  имели среднюю и сильную восприимчивость к патогенными грибами (3–4 балла) и низкую выживаемость – от 1 до 3 лет. Адаптивность сортов, характеризующихся высоким значением  $k = 18–23$  шт. и более, была выше в 3–5 раз. Показано, что благоприятным для формирования клубнечек ( $k = 15–40$  шт.) был теплый, умеренно увлажненный 2015 г. Средние показатели коэффициента размножения ( $k = 15–25$  шт.) получены в засушливый 2016 г., низкие, кроме сорта *Svetechisy*, ( $k < 3–5$  шт.) в прохладные и избыточно-увлажненные 2017–2018 гг.



Таблица 2 / Table 2

**Многолетние показатели коэффициента вегетативного размножения клубнелуковиц *Gladiolus hybridus***  
**Long-term indicators of the coefficient of vegetative reproduction of corms *Gladiolus hybridus***

Показатель / Indicator	Год / Year			
	2015	2016	2017	2018
Сорт / Sort	Шантиклер / Chanticleer			
Среднее ( $M \pm m$ ) / The mean ( $M \pm m$ )	22,5±1,45	15±1,14	5,4±0,43	2,5±0,31
Доверительный интервал / Confidence interval, $P=0,95$ ( $\pm$ )	2,85	2,23	0,84	0,60
Коэффициент вариации / Coefficient of variation, %	20,4	23,9	24,9	38,9
Сорт / Sort	Донна Мария / Donna Maria			
Среднее ( $M \pm m$ ) / The mean ( $M \pm m$ )	36,2±0,69	20±0,93	10,1±0,81	3,7±0,3
Доверительный интервал / Confidence interval, $P = 0,95$ ( $\pm$ )	1,36	1,82	1,58	0,59
Коэффициент вариации / Coefficient of variation, %	6,1	14,7	25,3	25,6
Сорт / Sort	Москва Белокаменная / Moskva Belokamennay			
Среднее ( $M \pm m$ ) / The mean ( $M \pm m$ )	15±0,82	13,8±0,4	8,2±0,44	5±0,45
Доверительный интервал / Confidence interval, $P = 0,95$ ( $\pm$ )	1,60	0,87	0,87	0,87
Коэффициент вариации / Coefficient of variation, %	17,2	10,1	17,1	28,3
Сорт / Sort	Пламя Тарт / Plum Tart			
Среднее ( $M \pm m$ ) / The mean ( $M \pm m$ )	20,2±0,74	22±0,56	5,1±0,43	3,3±0,33
Доверительный интервал / Confidence interval, $P = 0,95$ ( $\pm$ )	1,45	1,09	0,85	0,66
Коэффициент вариации / Coefficient of variation, %	11,6	8,0	26,9	32,1
Сорт / Sort	Светящийся / Svetechisy			
Среднее ( $M \pm m$ ) / The mean ( $M \pm m$ )	40,4±0,76	25,2±0,7	24,1±1,24	20±0,37
Доверительный интервал / Confidence interval, $P = 0,95$ ( $\pm$ )	1,5	1,4	2,4	0,7
Коэффициент вариации / Coefficient of variation, %	5,9	8,7	16,3	5,8

Примечание.  $M$  – среднее значение ( $n = 10$ ),  $m$  – стандартная ошибка.

Note.  $M$  is the average value ( $n = 10$ ),  $m$  is the standard error.

Согласно методике [27], сорта обладали средней декоративностью с оценкой в 85–90 баллов: *Chanticleer* (PC 462), *Joe Ann* (PC 433), *Florentina* (C 446), *Green Star* (C 404), *Blue Isle* (C 486), *Plum Tart* (P 478); высокой декоративностью (91–95 баллов): *Malika* (C 545), *Grad Ketedch* (PC 477), *Moskva Belokamennay* (PC 400), *Golubay Babochka* (PC 581), *Charcov* (PC 446), *Chernosliv* (PC 586), *Startler* (СП 453); отличной декоративностью (96–100) баллов: *Donna Maria* (C 520), *Dgester Gold* (C 416) (табл. 3, рис. 3). Однако такие сорта, как *Charcov*, *Chernosliv*, *Florentina*, *Dgester Gold*, *Green Star* имели слабую устойчивость к болезням и слабое вегетативное возобновление ( $k < 5$ ).

Сорт, эколого-географически и исторически сложившийся в процессе межвидового и межсортового скрещивания, в определенных условиях существования выполняет решающую роль при адаптации в иных условиях возделывания. Поскольку гладиолусы адаптируются в различных географических зонах, то деление их по срокам цветения на (P), (C), (II) в местах интродукции недопустимо, так как основным показателем слу-

жит сумма положительных температур [3, 28, 29].

Успех адаптации *G. hybridus* в новых природно-климатических условиях определяется способностью противостоять неблагоприятным факторам среды, которые свойственны для резко континентального климата лесостепной зоны Западной Сибири, в том числе и биотическим (возбудителям заболеваний и вредителям). Реализация биологического потенциала сортов инорайонного происхождения в Сибирском регионе определяется их декоративными особенностями, устойчивостью, правильным использованием агротехнических приемов возделывания в период вегетации и хранения при постоянном фитосанитарном мониторинге.

### Заключение

В условиях лесостепной зоны Западной Сибири сорта *G. hybridus* проходят сезонный цикл развития с продолжительностью от 118 до 123 дней и имеют длительновегетирующий летне-осенний феноритмотип. Дифференциация конуса нарастания побега возобновления на гене-





Таблица 3 / Table 3

**Показатели декоративных качеств (min-max) *Gladiolus hybridus* в 2017–2018 гг.**  
**Indicators of decorative qualities (min-max) of *Gladiolus hybridus* in 2017–2018 years**

Сорт / Sort	Высота, см / Height, cm	Длина соцветия, см / The length of inflorescences, cm	Диаметр цветка, см / The diameter of the flower, cm	Число цветков, шт. / Number of flowers, pieces	Балл / Score
<i>Blue Isle</i>	95–100	45,0–48,0	8,0–10,0	6,0–7,0	87
<i>Chantcler</i>	95–110	32,6–42,0	6,6–6,8	6,0–10,0	85
<i>Charcov</i>	110–115	40,3–74,6	10,6–10,8	14,0–18,0	95
<i>Chernosliv</i>	88–95	60,5–63,0	9,6–9,8	20,0–22,0	92
<i>Dgester Gold</i>	110–115	41,5–50,6	12,5–12,6	14,0–18,0	96
<i>Donna Maria</i>	120–130	32,2–71,4	11,0–11,4	14,0–20,0	98
<i>Joe Ann</i>	95–100	50,5–52,6	10,0–12,0	10,0–12,0	90
<i>Florentina</i>	90–100	60,0–75,0	11,8–11,8	17,0–23,0	90
<i>Golubay Babochka</i>	115–120	43,4–60,8	13,0–13,8	16,0–18,0	91
<i>Grad Ketedch</i>	120–150	43,0–65,5	11,0–13,0	21,0–22,0	95
<i>Green Star</i>	80–90	48,2–50,8	10,4–10,5	13,0–14,0	85
<i>Malika</i>	125–150	42,0–88,6	11,6–13,0	17,0–25,0	94
<i>Moskva Belokamennay</i>	110–115	40,0–75,8	11,6–12,2	15,0–26,0	95
<i>Plum Tart</i>	115–120	35,5–77,5	9,5–11,7	11,0–16,0	86
<i>Startler</i>	110–115	38,8–60,8	14,0–15,2	11,0–18,0	93

Примечание. Балл, сортооценка по 100-балльной шкале.  
 Note. Score, grade rating on a 100-point scale.



Рис. 3. Сорта *G. hybridus* в коллекции ЦСБС (2016–2018 гг.) (цвет online)  
 Fig. 3. *G. hybridus* varieties in the CSBG collection (2016–2018 years) (color online)





ративные органы у взрослых особей *G. hybridus* наступает в ранне-летний период роста побега, ускоренным формированием с III по VII этапы органогенеза в течение 61–67 дней.

Цветение изученных в Сибирском регионе сортов *G. hybridus* инорайонного происхождения наступало при сумме положительных температур  $>1462^{\circ}\text{C}$  в начале третьей декады августа. Адаптивный потенциал ранне- и среднецветущих сортов в Сибири выше, чем у позднецветущих сортов.

Развитие побеговой системы клона *G. hybridus* связано с цикличностью, выраженной в ежегодном формировании клубнелуковиц и клубнепочек. Зона обогащения побега отражает декоративность сорта, его репродуктивную способность. Зона возобновления побега является основополагающим базисом в жизнеспособности и вегетативном размножении сорта. Снижение коэффициента вегетативного размножения в 2–12 раз неоднородно и связано с устойчивостью сортов к фитопатогенам, возрастом клубнелуковиц, условиями вегетационного периода 2015–2018 гг.

Впервые для Новосибирской области установлен видовой состав патогенной микофлоры на *G. hybridus*. В патоккомплексе возбудителей фузариозного усыхания преобладал *Fusarium oxysporum*, что объясняется широким распространением гриба в почве и служит подтверждением разной степени специализации фузариумов по отношению к растению-хозяину. Степень поражения клубнелуковиц гладиолусов фузариозом при хранении (18–27%) определяется взаимодействием генотипических особенностей сорта и погодных условий предшествующего периода вегетации. Степень поражения устойчивых сортов была в 2 раза меньше, чем восприимчивых. Новосибирская популяция *Fusarium oxysporum* f. *gladioli* неоднородна по культурально-морфологическим и паразитическим свойствам.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (проект № АААА-А17-1170126100053-9 «Выявление путей адаптации растений к контрастным условиям обитания на популяционном и организменном уровнях»).

#### Список литературы

1. Зубкус Л. П., Скворцова А. В., Кормачева Т. Н. Озеленение Новосибирска. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1962. 338 с.
2. Седельникова Л. Л., Зубкус Л. П. Гладиолусы в Западной Сибири. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1987. 152 с.
3. Седельникова Л. Л. Биоморфология геофитов в Западной Сибири. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 2002. 307 с.
4. Воробьева И. Г. Болезни гладиолусов в лесостепи Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Новосибирск, 1994. 16 с.
5. Воробьева И. Г. Экологические ниши патогенных микромицетов растений в Западной Сибири : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2011. 34 с.
6. Седельникова Л. Л., Тарасенко Н. Д. Индуцированная изменчивость у гладиолуса // Известия Сибирского отделения РАН. Сер. Биологические науки. 1986. № 3, вып. 2. С. 67–74.
7. Кукушкина Т. А., Седельникова Л. Л. Динамика накопления запасных веществ в клубнелуковицах *Crocus alata* и *Gladiolus hybridus* // Химия растительного сырья. 2010. № 2. С. 123–127.
8. Dhakal K., Khanal D., Kumar D. Effect of Nitrogen and Phosphorous on Growth, Development and Vase Life of *Gladiolus* // Journal of Agricultural Science and Technology. 2017. Vol. 6, № 3. P. 1–7.
9. Hembrom R., Rao T. M., Sriram T. M., Kumar R. Molecular analysis of genetic variability and relationship among *Gladiolus cultivars* // Indian Journal of Biotechnology. 2018. Vol. 17. P. 118–127.
10. Hembrom R., Raimani R., Sriram S., Kumar R., Venugopalan R., Dhananjaya M. Evaluation of *Gladiolus* Genotypes for Resistance to Different Isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Gladioli* // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2019. Vol. 8, № 6. P. 2811–2821. DOI.org/10.20546/ijcmas.2019.806.339
11. Kumar K., Sarkar K., Kumar T., Sadhukan R. Performance of new gladiolus cultivars under the Gangetic plateau of West Bengal conditions // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2019. Vol. 8, № 3. P. 444–447.
12. Ламонов В. В. Комплексная оценка коллекционного генофонда гладиолуса гибридного ВНИИС им. И. В. Мичурина // Современное состояние питомниководства и инновационные основы его развития : материалы науч.-практ. конф. Мичуринск : ВНИИМ, 2015. С. 287–292.
13. Кузичев О. Б., Сорокопудов В. Н. Влияние материнских и отцовских родительских форм на результативность рецессивных скрещиваний у гладиолуса гибридного (*Gladiolus hybridus* hort.) // Вестн. КрасГАУ. 2019. № 4. С. 43–47.
14. Черткова М. А. Биологические особенности видов гладиолуса (*Gladiolus* L.) при интродукции в Пермском крае : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2019. 23 с.
15. Жмылев П. Ю., Алексеев Ю. Е., Карпухина Е. А. Основные термины и понятия современной биоморфологии. М. : Изд-во МГУ, 1993. 147 с.
16. Седова Е. А. Закономерности органогенеза луковичных и клубнелуковичных геофитов. М. : Изд-во МГУ, 1976. 30 с.
17. Куперман Ф. М. Морфофизиология растений. М. : Высш. шк., 1977. 288 с.
18. Былов В. Н. Основы сортоиспытания декоративных растений // Бюл. Гл. бот. сада РАН. 1967. Вып. 64. С. 54–56.
19. North American *Gladiolus* Classification : A Selected List of *Gladiolus* Varieties. North American *Gladiolus* Council. N. Y. : Academic Press, 1977. 16 p.



20. Коровкин О. А. О закономерностях онтогенеза клона на примере столонообразующих травянистых поликарпиков : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1999. 36 с.
21. Андреева И. И. К проблеме вырождения растений на примере *Gladiolus hybridus* hort. : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1984. 47 с.
22. Игнатьева И. П. Онтогенетический морфогенез вегетативных органов травянистых растений : учеб. пособие. М. : ТСХА, 1989. 62 с.
23. Воробьева И. Г., Чулкина В. А. Экологические ниши грибов рода *Fusarium* – возбудителей фузариоза гладиолусов // Вестник НГАУ. 2009. № 4 (12). С. 5–8.
24. Торопова Е. Ю., Воробьева И. Г., Рябова А. А. Ограничение экологических ниш патогенных микромицетов устойчивыми сортами ягодных и цветочных культур Западной Сибири // Вестник НГАУ. 2010. № 3 (15). С. 40–43.
25. Седельникова Л. Л., Воробьева И. Г. Динамика развития фузариоза гладиолусов в условиях ЦСБС. Новосибирск : ЦНТИ, 1993. № 126. 3 с.
26. Седельникова Л. Л. Особенности вырождения гладиолусов. Новосибирск : ЦНТИ, 1993. № 5. 3 с.
27. Каталог Мировой коллекции ВИР : Гладиолус (Сорта отечественной селекции советского периода). Л. : ВИР, 1988. Вып. 470. 72 с.
28. Шулькина Т. В. Прогнозирование успешности интродукции по данным фенологии // Бюл. Глав. бот. сада РАН. 1971. Вып. 79. С. 14–19.
29. Шоломицкая А. А. Сортоизучение, селекция и размножение гладиолуса в лесостепи Украины : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 18 с.

#### Образец для цитирования:

Седельникова Л. Л., Воробьева И. Г. Биологические особенности *Gladiolus hybridus* в связи с адаптацией в Сибирском регионе // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 417–426. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-417-426>

#### Biological Features of *Gladiolus hybridus* in Connection with the Adaptation of the Siberian Region

L. L. Sedelnikova, I. G. Vorobyova

Lyudmila L. Sedelnikova, <https://orcid.org/0000-0002-1122-2421>, Central Siberian Botanical garden of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskay St., Novosibirsk 630090, Russia, [lusedelnikova@yandex.ru](mailto:lusedelnikova@yandex.ru)

Irina G. Vorobyova, <https://orcid.org/0000-0002-2190-6747>, Central Siberian Botanical garden of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskay St., Novosibirsk 630090, Russia, [vorobig@ngs.ru](mailto:vorobig@ngs.ru)

The adaptive possibilities of the varietal diversity of *Gladiolus hybridus* in the forest-steppe zone of Western Siberia are analyzed. Morphobiological features of shoot formation are shown. Long-term (1999–2019) results of seasonal development of plants in generative age state are presented. The specificity of the terms of flowering varies from different groups of the sum of positive temperatures. Flowering in Novosibirsk occurs in early varieties with the sum of positive temperatures >1462° C, medium >1558° C, late >1711° C. It was determined that in the pre-winter the cone of growth of the shoot of renewal forms rudimentary vegetative organs, which corresponds to the second stage of organogenesis. Differentiation of the cone of growth of escape to generative organs begins during the period of intensive growth of escape in June. During the period from 60–73 days, the cone of growth of the shoot passes intrarenal development from III to VIII stages of organogenesis. IX–XII stages of organogenesis correspond to the phenological stages from flowering to fruiting. Flowering duration is 10–25 days, seasonal development 118–123 days. There was a decrease in the coefficient of vegetative reproduction in varieties from 2015 to 2018 of 2–12 times. The main ecological niche of the pathogen *Fusarium* rot of gladiolus (of *vosb. Fusarium oxysporum* f. *gladioli*) are underground organs (roots, corms), and also above-ground organs of plants. Comparison of the degree of resistance of gladiolus to *Fusarium* showed a different reaction of varieties during the growing season and storage of corms.

**Keywords:** *Gladiolus hybridus*, developmental biology, pathogenic fungi, Western Siberia.

Received: 18.02.2020 / Accepted: 23.03.2020 / Published: 30.11.2020

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

**Acknowledgements:** *The work was carried out within the framework of the state task of the Central Siberian Botanical garden SB RAS (project No. AAA-A17-1170126100053-9 “Identification of ways of adaptation of plants to contrasting living conditions at the population and organizational levels”).*

#### References

1. Zubkus L. P., Skvortsova A. V., Kormacheva T. N. *Ozelezenie Novosibirsk* [Landscaping of Novosibirsk]. Novosibirsk, Izd-vo SB RAS, 1962. 338 p. (in Russian).
2. Sedelnikova L. L., Zubkus L. P. *Gladiolusy v Zapadnoj Sibiri* [Gladioli in Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd-nie Publ., 1987. 152 p. (in Russian).
3. Sedelnikova L. L. *Biomorfologiya geofitov v Zapadnoj Sibiri* [Biomorphology of geophytes in Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd-nie Publ., 2002. 307 p. (in Russian).
4. Vorobyova I. G. *Bolezni gladiolusov v lesostepi Zapadnoj Sibiri* [Diseases of gladioli in the forest-steppe of Western Siberia]. Thesis Diss. Cand. Sci. (Agric.). Novosibirsk, 1994. 16 p. (in Russian).
5. Vorobyova I. G. *Ekologicheskie nishi patogennykh mikromicetov rastenij v Zapadnoj Sibiri* [Ecological niches of pathogenic micromycetes of plants in Western Siberia]. Thesis Diss. Dr. Sci. (Biol.). Novosibirsk, 2011. 34 p. (in Russian).



6. Sedelnikova L. L., Tarasenko N. D. Induced variability of the gladiolus. *Proceedings of Siberian branch of Russian Academy of Sciences. Ser. Biological Science*, 1986, no. 3, vol. 2, pp. 67–74 (in Russian).
7. Kukushkina T. A., Sedelnikova L. L. Dynamics of accumulation of spare substances in corms of *Crocus alata* and *Gladiolus hybridus*. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2010, no. 2, pp. 123–127 (in Russian).
8. Dhakal K., Khanal D., Kumar D. Effect of Nitrogen and Phosphorous on Growth, Development and Vase Life of *Gladiolus*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–7.
9. Hembrom R., Rao T. M., Sriram T. M., Kumar R. Molecular analysis of genetic variation and relationship among *Gladiolus* cultivars. *Indian Journal of Biotechnology*, 2018, vol. 17, pp. 118–127.
10. Hembrom R., Raimani R., Sriram S., Kumar R., Venugopalan R., Dhananjaya M. Evaluation of *Gladiolus* Genotypes for Resistance to Different Isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Gladioli*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 2811–2821. DOI: 10.20546/ijcmas.2019.806.339
11. Kumar K., Sarkar K., Kumar T., Sadhukan R. Performance of new gladiolus cultivars under the Gangetic plateau of West Bengal conditions. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, vol. 8, no. 3, pp. 444–447.
12. Lamonov V. V. Kompleksnaya otsenka kollektcionnogo genofonda gladiolusa gibridnogo VNIIS im. I. V. Michurina [Complex assessment of the collection of gene pool of gladiolus hybrid VNIIS im. I. V. Michurina]. In: *Sovremennoye sostoyaniye pitomnikovodstva i innovatsionnyye osnovy ego razvitiya: materialy nauch.-prakt. konf.* [Current State of Nursery Management and Innovative Foundations of Its Development: Coll. sci. and pract. conf.]. Michurinsk, VNIIM, 2015, pp. 287–292 (in Russian).
13. Kuzichev O. B., Sorokopudov V. N. Influence of maternal and paternal parental forms on the effectiveness of reciprocal crosses in *Gladiolus hybridus* hort.). *The Bulletin of KrasGAU*, 2019, no. 4, pp. 43–47 (in Russian).
14. Chertkova M. A. *Biologicheskie osobennosti vidov gladiolusa (Gladiolus L.) pri introdukcii v Permskom krae* [Biological features of gladiolus species (*Gladiolus* L.) during introduction in the Perm region]. Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Ufa, 2019. 23 p. (in Russian).
15. Zhmylev P. Yu., Alekseev Yu. E., Karpukhina E. A. *Osnovnye terminy i ponyatiya sovremennoj biomorfologii* [Basic terms and concepts of modern biomorphology]. Moscow, Izd-vo MGU, 1993. 147 p. (in Russian).
16. Sedova E. A. *Zakonomernosti organogeneza lukovichnykh i klubnelukovichnykh geofitov* [Regularities of organogenesis of bulbous and corm-shaped geophytes]. Moscow, Izd-vo MGU, 1976. 30 p. (in Russian).
17. Kuperman F. M. *Morfofiziologiya rastenij* [Morphophysiology of Plants]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 288 p. (in Russian).
18. Bylov V. N. Basics of variety testing of ornamental plants. *Bulletin of the Main Botanical garden of the Russian Academy of Sciences*, 1967, vol. 64, pp. 54–56 (in Russian).
19. *North American Gladiolus Classification: A Selected List of Gladiolus Varieties*. North American Gladiolus Council. New York, Academic Press, 1977. 16 p.
20. Korovkin O. A. *O zakonomernostyah ontogeneza klona na primere stolonoobrazuyushchih travyanistykh polikarpikov* [On the laws of clone ontogenesis on the example of stolon-forming herbaceous polycarpics]. Thesis. Diss. Dr. Sci. (Biol.). Moscow, 1999. 36 p. (in Russian).
21. Andreeva I. I. *K probleme vyrozhdeniya rastenij na primere Gladiolus hybridus hort.* [On the problem of plant degeneration on the example of *Gladiolus hybridus* hort.]. Thesis Diss. Dr. Sci. (Biol.). Moscow, 1984. 47 p. (in Russian).
22. Ignatieva I. P. *Ontogeneticheskij morfogenez vegetativnykh organov travyanistykh rastenij* [Ontogenetic morphogenesis of vegetative organs of herbaceous plants]. Moscow, Timiryazev Agricultural Academy, 1989. 62 p. (in Russian).
23. Vorobyova I. G., Chulkina V. A. Ecological niches of fungi of the genus *Fusarium*-pathogens of *Fusarium gladiolus*. *Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University*, 2009, no. 4 (12), pp. 5–8 (in Russian).
24. Toropova E. Yu., Vorobyova I. G., Ryabova A. A. Restriction of ecological niches of pathogenic micromycetes by stable varieties of berry and flower cultures of Western Siberia. *Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University*, 2010, no. 3 (15), pp. 40–43 (in Russian).
25. Sedelnikova L. L., Vorobyova I. G. *Dinamika razvitiya fuzarioza gladiolusov v usloviyah CSBS* [Dynamics of the development of *Fusarium gladiolus* in the conditions of CSBS]. Novosibirsk, Izd-vo CNTI, 1993, no. 126. 3 p. (in Russian).
26. Sedelnikova L. L. *Osobennosti vyrozhdeniya gladiolusov* [Features of degeneration of gladioli]. Novosibirsk, Izd-vo CNTI, 1993, no. 5. 3 p. (in Russian).
27. *Katalog Mirovoj kolleksii VIR: Gladiolus (Sorta otechestvennoj selekcii sovetskogo perioda)* [Catalog of the world collection of VIR: gladiolus (Varieties of domestic selection of the soviet period)]. Leningrad, Izd-vo VIR, 1988, iss. 470. 72 p. (in Russian).
28. Shulkina T. V. Predicting the success of introduction according to phenology data. *Bulletin of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences*, 1971, vol. 79, pp. 14–19 (in Russian).
29. Sholomitskaya A. A. *Sortoizuchenie, selekciya i razmnozhenie gladiolusa v lesostepi Ukrainy* [Study, selection and multiplication of gladiolus in forest-steppe of Ukraine]. Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Moscow, 1985. 18 p. (in Russian).

**Cite this article as:**

Sedelnikova L. L., Vorobyova I. G. Biological Features of *Gladiolus hybridus* in Connection with the Adaptation of the Siberian Region. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 417–426 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-417-426>





УДК 571.15

## Угнетение хлорофиллином хемилюминесценции, сопровождающей катализируемую комплексом цитохрома с с кардиолипином квазилипоксигеназную реакцию



Л. А. Ромодин

Ромодин Леонид Александрович, соискатель учёной степени кандидата биологических наук, кафедра радиобиологии и вирусологии имени академиков А. Д. Белова и В. Н. Сюрин, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К. И. Скрябина, gla2904@mail.ru

Перекисное окисление липидов является ключевым фактором программируемой гибели клеток различной этиологии. Этот процесс имеет место и при действии ионизирующего излучения на биологические системы, что является сутью теории липидных радиотоксинов, являющейся частью структурно-метаболической теории биологического действия ионизирующего излучения. Неферментативная липидная пероксидация приводит в конечном итоге к гибели по механизму ферроптоза, а ферментативная, катализируемая комплексом цитохрома с с кардиолипином, запускает апоптоз по митохондриальному пути. По результатам исследований, проведенных в течение последних 10 лет, установлено, что препараты на основе хлорофилла являются эффективными радиопротекторами. Единственным механизмом их действия может являться ингибирование радикальных реакций с участием липидов. Поэтому препараты на основе хлорофилла можно использовать в качестве антиоксиданта при профилактике и терапии различных патологий, вызванных свободнорадикальным окислением липидов. В настоящей работе при помощи регистрации хемилюминесценции, усиленной хинолизидин[5,6,7-gh]3-ацетилкумарина (в англоязычной литературе известным как coumarin-334), установлено подавление реакции радикального окисления липидов, вызванного квазилипоксигеназной активностью комплекса цитохрома с с кардиолипином. Данный вывод был сделан на основании достоверного подавления хемилюминесценции хлорофиллином натрия концентрациями 1,56 мкМ и выше. Полученный результат показывает актуальность дальнейшего многопланового исследования возможности эффективного применения различных производных хлорофилла при терапии и профилактике патологических состояний, вызванных окислительным стрессом.

**Ключевые слова:** апоптоз, комплекс цитохрома с с кардиолипином, квазилипоксигеназная реакция, антиоксиданты, хлорофилл, хлорофиллин, хемилюминесценция.

Поступила в редакцию: 05.05.2020 / Принята: 22.05.2020 /  
Опубликована: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-427-432>

### Введение

Перекисное окисление липидов, приводящее к разрушению биологических мембран и гибели

клетки, является одним из проявлений состояния, называемого окислительным стрессом [1]. Запускаться этот процесс может как неферментативным, так и ферментативным путём. Ферментативный катализ этого процесса осуществляется *цитохромом с (CytC)*, который приобретает липопероксидазную и квазилипоксигеназную активность в результате конформационного изменения, которое происходит при образовании его комплекса с кардиолипином; это приводит к запуску программы апоптоза по митохондриальному (внутреннему) пути [2]. В результате неферментативного перекисного окисления митохондриальных мембранных фосфолипидов запускается программа ферроптоза – некрозоподобной гибели клеток [3], впервые описанной в 2012 г. в работе [4]. Примечательно, что гибель клеток ферроптозом может запустить процесс некроптоза соседних клеток [5]. При этом ещё в середине XX в. установлено, что продукты радикального окисления липидов, называемые липидными радиотоксинами, являются одним из основных факторов развития лучевого поражения [6, 7]. Теория липидных радиотоксинов, являясь частью структурно-метаболической теории биологического действия ионизирующего излучения [8], остается актуальной и на сегодняшний день. Так, недавно установлено, что гибель гемопозитических клеток костного мозга при действии  $\gamma$ -излучения происходит именно по механизму ферроптоза [9], что укладывается в рамки указанной концепции. В связи с этим можно говорить о том, что одним из механизмов действия радиопротекторов может служить ингибирование каскада реакций перекисного окисления липидов.

В недавних работах препарат на основе хлорофилла показан как эффективный радиопротектор. Его введение лабораторным животным в разы увеличивало их устойчивость к воздействию ионизирующего излучения [10–12]. Единственным возможным механизмом радиопротекторного действия препарата хлорофилла может быть подавление реакций перекисного окисления липидов.

Целью настоящей работы является изучение на модельной системе методом *хемилюми-*





несценции (*CLum*) воздействия хлорофиллина (водорастворимого производного хлорофилла) на окисление липидов, вызванное квазилипоксигеназной реакцией, катализируемой комплексом цитохрома с с тетраолеилкардиолипином (*CytC-TOCL*). Липидным субстратом в настоящем

исследовании выступал бычий кардиолипин, подвергнутый медленному окислению для появления в его структуре гидропероксидных группировок, являющихся субстратом квазилипоксигеназной реакции. Возможные альтернативные варианты течения этой реакции показаны на рис. 1.

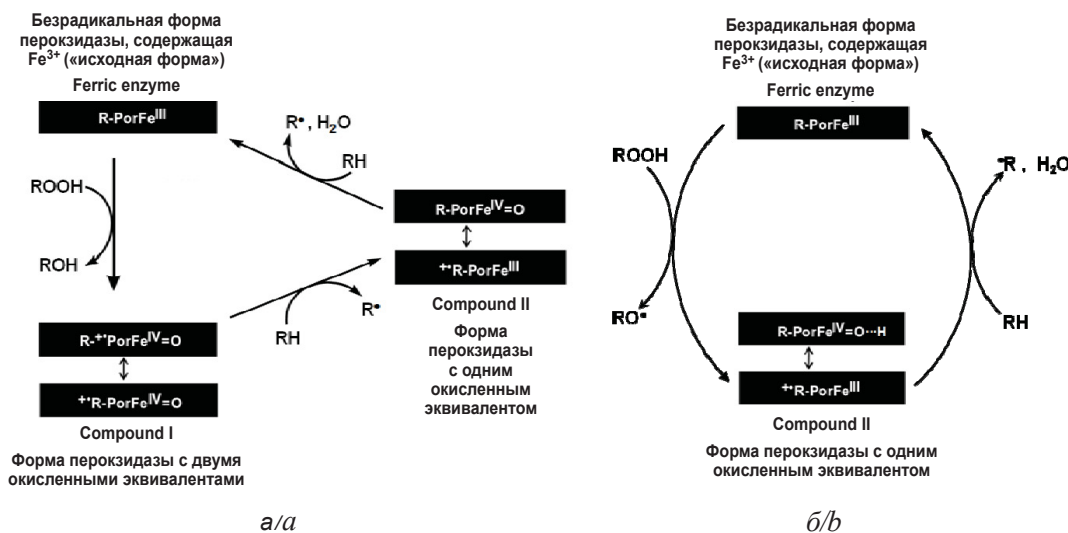
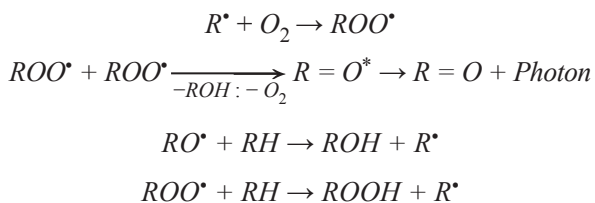


Рис. 1. Механизмы квазилипоксигеназной реакции: а – через двуэлектронное окисление пероксидазы с последующим восстановлением; б – через одноэлектронное окисление пероксидазы с последующим восстановлением

Fig. 1. The mechanism of the quasilipoxygenase reaction: a – via twoelectron oxidation of the peroxidase with the subsequent recovery; б – via one-electron oxidation of the peroxidase with the subsequent recovery

Как видно из представленных на рис. 1 схем, в ходе квазилипоксигеназного катализа независимо от механизма его протекания происходит постоянное образование радикалов липидов R•. Эти радикалы в присутствии кислорода быстро входят в каскад цепных реакций перекисного окисления:

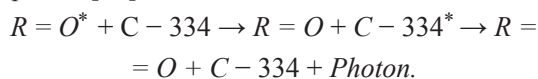


Последняя реакция обеспечивает разветвление цепного процесса [13, 14].

При этом концентрация липидных перекисей растёт на порядки в сравнении с тем количеством, которое было изначально в образце. При этом вновь образовавшиеся липидные перекиси тоже могут становиться субстратами квазилипоксигеназной реакции. Таким образом, модельная система, в которой катализ реакции перекисного окисления липидов осуществляет *CytC-TOCL*, является вполне подходящей для изучения ин-

гибирования радикальных липидных реакций хлорофиллином и другими антиоксидантами. Механизм действия антиоксидантов заключается в реакции со свободными радикалами. В ходе этой реакции образуются продукты, не способные на продолжение цепного радикального процесса [13].

Использование активатора хемилюминесценции – вещества, которое перехватывает электронные возбуждённые состояния у продуктов радикальной реакции и высвечивает фотоны с большим квантовым выходом, позволяет увеличить интенсивность *CLum* до значений, которые можно адекватно оценивать. В настоящем исследовании в качестве активатора *CLum* выбран хинолизидин[5,6,7-gh]3-ацетилкумарин, называемый в англоязычной литературе *coumarin-334 (C-334)*. Это вещество является специфическим для радикальных реакций с участием липидов *CLum* активатором. Схематично процесс его можно представить следующим образом [14]:





## Материалы и методы

Исследования по измерению хемилюминесценции проводились на хемилюминометре «Lum-100» фирмы ООО «ДИСофт» (Россия), подключенном к компьютеру с программным обеспечением «PowerGraph».

Перед началом каждой серии измерений хемилюминометр калибровался по ураниловому стеклу.

Кювета, содержащая 100 мкл 100 мкМ *CytC* (Sigma-Aldrich, США), 50 мкл 6 мМ метанольного раствора *тетраолеилкардиолипина (TOCL)* (Avanti Polar Lipids, США), 25 мкл 1 мМ *C-334* (Sigma-Aldrich, США), 100 мкл раствора хлорофиллина различных концентраций, помещалась в кюветное отделение хемилюминометра, после чего велась регистрация фонового сигнала в течение 30 с. Началом реакции считался момент внесения в систему 25 мкл 6 мМ раствора окисленного бычьего кардиолипина (Avanti Polar Lipids, США). Реакция протекала в среде 20 мМ фосфатного буфера. Регистрация *CLum*, сопровождающей квазилипоксигеназную реакцию, продолжалась в течение 300 с.

В качестве реактива хлорофиллина использован коммерческий препарат фирмы «Nature's Sunshine Products Inc.» (США), содержащий медный хлорофиллин натрия концентрацией 4335,8 мкМ, под торговым названием «Хлорофилл жидкий» («Liquid Chlorophyll»). Растворы необходимых для исследования концентраций получены методом последовательных разбавлений 20 мМ фосфатным буфером.

Алгоритм добавления и объёмы растворов и данные концентрации веществ были подобраны по результатам подготовительных экспериментов, а концентрации *CytC* и *TOCL* взяты с расчётом на оптимальное соотношение  $CytC:TOCL = 1:30$ , указанное в работе [2].

Для каждой концентрации хлорофиллина было приготовлено 8 экспериментальных проб для проведения регистрации *CLum*-сигнала, то же относится и к контрольным пробам. Таким образом, для каждой концентрации было в итоге получено 8 значений светосуммы. На основании этих значений было вычислено среднее арифметическое значение. Статистическая обработка производилась с использованием *t*-критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,99. Для проведения вычислений использовался пакет «Анализ данных» в составе программного обеспечения «MS Excel 2016» с применением инструмента анализа «Описательная статистика» при уровне надёжности 99%.

Проверка гипотезы о нормальном распределении полученных данных для каждой концентрации хлорофиллина была проведена по общепринятой методике с использованием критерия согласия Пирсона с программным обеспечением «MS Excel 2016».

## Результаты и их обсуждение

В ходе исследования была зарегистрирована *CLum* реакционной смеси, содержащей *CytC-TOCL*, препарат липопероксидов, полученный путём медленного окисления бычьего кардиолипина, и препарат хлорофиллина различных концентраций. На основании полученных хемилюминограмм вычислена светосумма за первые 300 с реакции. Необходимо сразу заметить, что была также зарегистрирована *CLum* пробы, содержащей только *TOCL*, препарат липопероксидов и *C-334*, но не содержащей *CytC*. Эта проба выполняет роль контроля на пероксидазу. В ней максимальное значение интенсивности *CLum* составило 0,227 В, а светосуммы за 300 с – 31,89 В. Эти значения меньше соответствующих значений, полученных в других пробах. Помимо всего прочего это показывает, что *CLum* в применяемой модельной системе обусловлена квазилипоксигеназной активностью *CytC-TOCL*, а не просто реакцией диспропорционирования липопероксильных радикалов, имеющих место в образце.

Результаты эксперимента по изучению влияния хлорофиллина на *CLum*, сопровождающую катализируемую *CytC-TOCL* квазилипоксигеназную реакцию, показаны на рис. 2.

На основании представленных на рис. 2 данных можно сказать, что хлорофиллин в концентрациях, равных и превышающих 1,56 мкМ с уровнем надёжности 99% угнетает хемилюминесценцию, сопровождающую квазилипоксигеназную реакцию, катализируемую *CytC-TOCL*. Это подавление хемилюминесценции может свидетельствовать о достоверном ингибировании хлорофиллином каскада реакций перекисного окисления липидов. Полученный вывод вполне согласуется с литературными данными. Так, авторы [11], проводившие химическую оценку интенсивности протекания процесса перекисного окисления липидов у мышей, подвергнутых воздействию  $\gamma$ -излучения, путём определения концентрации малонового диальдегида, наблюдали сниженное содержание этого маркера у мышей, которые получали препарат хлорофилла, в сравнении с мышами, которые его не получали.

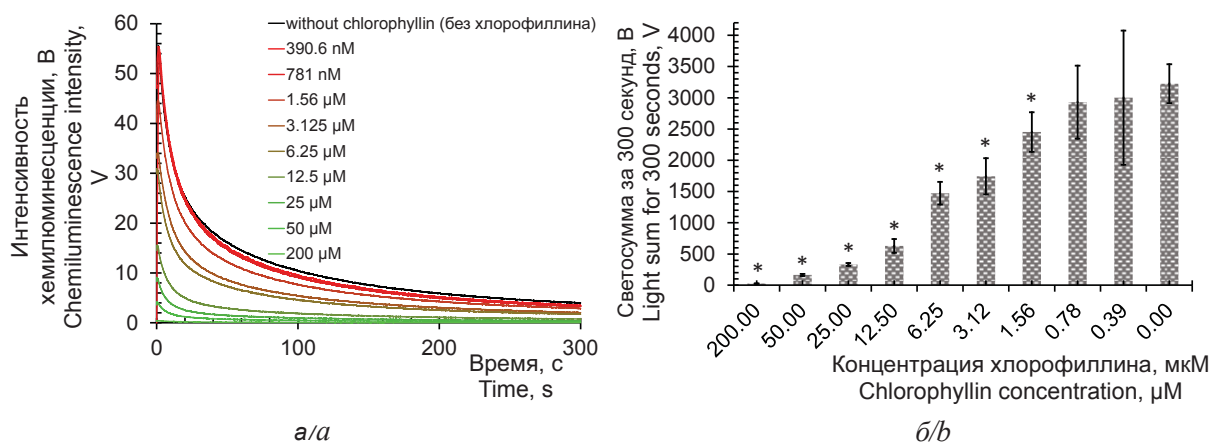


Рис. 2. *а* – интенсивность хемилюминесценции системы 10 мкМ цитохром *c*, 300 мкМ тетраолеилкардиолипин, 25 мкМ coumarin-334, 150 мкМ липопероксида в присутствии указанных в легенде концентраций хлорофиллина; *б* – светосумма указанной системы за 5 мин реакции, \* достоверное отличие от значения контроля при  $P = 99\%$ ,  $n = 8$

Fig. 2. The chemiluminescence intensity of the 10 μM cytochrome *c*, 300 μM tetraoleylcardiolipin, 25 μM coumarin-334, 150 μM lipoperoxides system in the presence of the chlorophyllin concentrations indicated in the legend (*a*); light sum of the aforesaid system in 5 minutes of reaction, \*significant difference from the control value at  $P = 99\%$ ,  $n = 8$  (*b*)

На рис. 3 показано выведение концентрации половинного тушения *CLum* хлорофиллина для изучаемой системы. Нижняя прямая линия соответствует значению светосуммы, полученному для пробы, не содержащей *CytC*. Согласно представленному на рис. 3 графику эта концентрация хлорофиллина составила примерно 3,7 мкМ.

Концентрация хлорофиллина, равная 3,7 мкМ, соответствует примерно 1172-кратному разбавлению используемого коммерческого препарата.

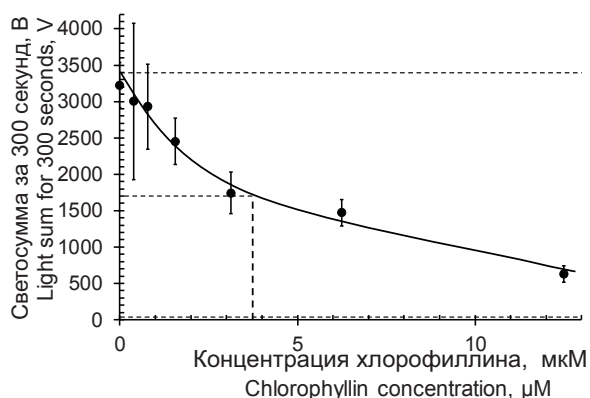


Рис. 3. Графическое определение концентрации хлорофиллина, вызывающей половинное тушение *CLum*, индуцированной *CytC-TOCL*, составившей 3,7 мкМ. Нижняя пунктирная линия – значение светосуммы для пробы, не содержащей *CytC* (контроль на пероксидазу)

Fig. 3. Graphical determination of the concentration of chlorophyllin that causes half-quenching of chemiluminescence induced by cytochrome *c*– tetraoleylcardiolipin complex, amounting to 3.7 μM. The lower dotted line denotes the value of the light sum for a sample that does not contain cytochrome *c* (peroxidase control)

Таким образом, можно говорить о подавлении хлорофиллом и его производными процесса перекисного окисления липидов. Это позволяет начать более детальные исследования возможности применения хлорофилла и его производных при профилактике и терапии патологий, вызванных окислительным стрессом. Если говорить конкретно о подавлении радикальной реакции, катализируемой комплексом *CytC* с кардиолипидом, то можно сказать, что это позволит бороться с заболеваниями, причиной которых является апоптоз, запускающийся по митохондриальному пути, в том числе различными кардиодегенеративными и нейродегенеративными состояниями.

### Заключение

В ходе исследования установлено дозозависимое снижение интенсивности *CLum*, сопровождающей вызванное квазилипоксигеназной активностью *CytC-TOCL* окисление липидов, под действием хлорофиллина. Концентрация хлорофиллина, вызывающая половинное тушение этой *CLum*, составила ≈3,7 мкМ. Полученный вывод позволяет начать планирование более детального исследования действия различных производных хлорофилла как антиоксидантов, в том числе и для профилактики и терапии патологий, вызванных развитием апоптоза, обусловленного активностью комплекса *CytC* с кардиолипидом в митохондриях.

### Благодарности

Автор статьи выражает благодарность и признательность профессору кафедры общей патологии им. В. М. Коронова МГФВМиБ – МВА



им. К. И. Скрябина Валерию Нурмухаметовичу Байматову и доценту кафедры общей патологии Дмитрию Ивановичу Гильдикову за предоставленную возможность проведения эксперимента, а также студенту 4-го курса ветеринарно-биологического факультета МГАВМиБ – МВА им. К. И. Скрябина Анастасии Алексеевне Прокофьевой за ассистирование при проведении экспериментов.

### Список литературы

1. Lyamzaev K. G., Panteleeva A. A., Karpukhina A. A., Galkin I. I., Popova E. N., Pletjushkina O. Y., Rieger B., Busch K. B., Mulkiydjanian A. Y., Chernyak B. V. Novel Fluorescent Mitochondria-Targeted Probe MitoCLOx Reports Lipid Peroxidation in Response to Oxidative Stress *in vivo* // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2020. № 2020. P. 3631272. DOI: <http://doi.org/10.1155/2020/3631272>
2. Vladimirov Yu. A., Proskurnina E. V., Alekseev A. V. Molecular mechanisms of apoptosis. Structure of cytochrome *c*-cardiolipin complex // *Biochemistry*. 2013. Vol. 78, № 10. P. 1086–1097. DOI: <http://doi.org/10.1134/S0006297913100027>
3. Chen G., Guo G., Zhou X., Chen H. Potential mechanism of ferroptosis in pancreatic cancer // *Oncology Letters*. 2020. № 19. P. 579–587. DOI: <http://doi.org/10.3892/ol.2019.11159>
4. Dixon S. J., Lemberg K. M., Lamprecht M. R., Skouta R., Zaitsev E. M., Gleason C. E., Patel D. N., Bauer A. J., Cantley A. M., Yang W. S., Morrison B., Stockwell B. R. Ferroptosis: an iron-dependent form of nonapoptotic cell death // *Cell*. 2012. № 149. P. 1060–1072. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.042>
5. Conrad M., Proneth B. Broken hearts: Iron overload, ferroptosis and cardiomyopathy // *Cell Research*. 2019. № 29. P. 263–264. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41422-019-0150-y>
6. Тарусов Б. Н. Первичные реакции в биоллипидах при действии ионизирующих излучений // *Радиобиология и радиационная медицина / под общ. ред. чл.-корр. АМН СССР А. В. Лебединского*. М. : Атомиздат, 1959. Т. 5. С. 105–109.
7. Hannan R. S., Boag J. W. Effects of electronic irradiation on fats // *Nature*. 1952. № 169. P. 152–153. DOI: <http://doi.org/10.1038/169152a0>
8. Кузин А. М. Структурно-метаболическая теория в радиобиологии. М. : Наука, 1986. 282 с.
9. Zhang X., Xing X., Liu H., Feng J., Tian M., Chang S., Liu P., Zhang H. Ionizing radiation induces ferroptosis in granulocyte-macrophage hematopoietic progenitor cells of murine bone marrow // *International Journal of Radiation Biology*. 2020. Vol. 96, № 5. P. 584–595. DOI: <http://doi.org/10.1080/09553002.2020.1708993>
10. Поздеев А. В., Лысенко Н. П. Повышение радиационной устойчивости организма млекопитающих при применении препаратов хлорофилла в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды // *Изв. Международной академии аграрного образования*. 2018. Вып. 42. С. 60–62.
11. Поздеев А. В., Гугало В. П. Влияние препарата хлорофилла на содержание малонового диальдегида при радиационной патологии // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. № 2. С. 107–109.
12. Поздеев А. В., Промоненков В. К., Лысенко Н. П. Применение растительного пигмента в качестве ингибитора электронно-возбуждённых состояний // *Ветеринарная медицина*. 2010. № 1. С. 42–43.
13. Журавлёв А. И., Зубкова С. М. Антиоксиданты. Свободнорадикальная патология, старение. 2-е изд., испр. и доп. М. : Белые альвы, 2014. 304 с.
14. Владимиров Ю. А., Проскурнина Е. В. Свободные радикалы и клеточная хемилюминесценция // *Успехи биологической химии*. 2009. № 49. С. 341–388.

### Образец для цитирования:

Ромодин Л. А. Угнетение хлорофиллином хемилюминесценции, сопровождающей катализируемую комплексом цитохрома *c* с кардиолипином квазилпоксигеназную реакцию // *Изв. Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 427–432. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-427-432>

### Chlorophyllin Inhibits Chemiluminescence That Accompanies a Quasi-Hydroxygenase Reaction Catalyzed by the Cytochrome *c*-Cardiolipin Complex

L. A. Romodin

Leonid A. Romodin, <https://orcid.org/0000-0001-8978-1250>, Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K. I. Skryabin, 23 Akademika Skryabina St., Moscow 109472, Russia, [rla2904@mail.ru](mailto:rla2904@mail.ru)

Lipid peroxidation is a key factor in programmed cell death of various etiologies. This process also occurs when ionizing radiation acts on biological systems. It is the essence of the theory of lipid radiotoxins, which is part of the structural and metabolic theory of the biological action of ionizing radiation. Non-enzymatic lipid peroxidation eventually

leads to death by the mechanism of ferroptosis, while enzymatic lipid peroxidation, catalyzed by the cytochrome *c*-cardiolipin complex, triggers apoptosis along the mitochondrial pathway. According to the results of research conducted over the past 10 years, it has been established that drugs based on chlorophyll are effective as radioprotectors. The only mechanism of their action may be the inhibition of radical reactions involving lipids. Therefore, drugs based on chlorophyll can be used as the antioxidants in the prevention and treatment of various pathologies caused by free radical lipid oxidation. In the present study, using the method of activated coumarin-334 (quinolysidine[5,6,7-*gh*]3-acetylcoumarin) chemiluminescence, we have established the suppression of the reaction of radical lipid oxidation caused by the quasilipoxygenase activity of the cytochrome *c*-cardiolipin complex. This conclusion was arrived at on the basis of reliable suppression of chemiluminescence by sodium chlorophyllin at concentrations of 1.56  $\mu\text{m}$  and higher. The obtained result shows the relevance of





further multi-faceted research of the possibility of effective use of various chlorophyll derivatives in the treatment and prevention of pathological conditions caused by oxidative stress.

**Keywords:** apoptosis, cytochrome *c*-cardiolipin complex, quasilipoxygenase reaction, antioxidants, chlorophyll, chlorophyllin, chemiluminescence.

Received: 05.05.2020 / Accepted: 22.05.2020 / Published: 30.11.2020

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

**Acknowledgments:** *The author expresses his gratitude and appreciation to Professor of the Department of General pathology, Valery N. Baimatov and associate Dmitry I. Gildikov for the opportunity to do the experiment, and to Anastasia A. Prokofieva, a 4<sup>th</sup> year student of the Veterinary and Biological Faculty of the Scriabin Moscow State Veterinary Academy, for assisting in the experiments.*

## References

1. Lyamzaev K. G., Panteleeva A. A., Karpukhina A. A., Galkin I. I., Popova E. N., Pletjushkina O. Y., Rieger B., Busch K. B., Mulkidjanian A. Y., Chernyak B. V. Novel Fluorescent Mitochondria-Targeted Probe MitoCLOx Reports Lipid Peroxidation in Response to Oxidative Stress *in vivo*. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, no. 2020, pp. 3631272. DOI: <http://doi.org/10.1155/2020/3631272>
2. Vladimirov Yu. A., Proskurnina E. V., Alekseev A. V. Molecular mechanisms of apoptosis. Structure of cytochrome *c*-cardiolipin complex. *Biochemistry*, 2013, vol. 78, no. 10, pp. 1086–1097 (in Russian). DOI: <http://doi.org/10.1134/S0006297913100027>
3. Chen G., Guo G., Zhou X., Chen H. Potential mechanism of ferroptosis in pancreatic cancer. *Oncology Letters*, 2020, no. 19, pp. 579–587. DOI: <http://doi.org/10.3892/ol.2019.11159>
4. Dixon S. J., Lemberg K. M., Lamprecht M. R., Skouta R., Zaitsev E. M., Gleason C. E., Patel D. N., Bauer A. J., Cantley A. M., Yang W. S., Morrison B., Stockwell B. R. Ferroptosis: an iron-dependent form of nonapoptotic cell death. *Cell*, 2012, no. 149, pp. 1060–1072. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cell.2012.03.042>
5. Conrad M., Proneth B. Broken hearts: Iron overload, ferroptosis and cardiomyopathy. *Cell Research*, 2019, no. 29, pp. 263–264. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41422-019-0150-y>
6. Tarusov B. N. Pervichnye reaktsii v biolipidakh pri dejstvii ioniziruyushchikh izluchenij [Primary reactions in biolipids under the action of ionizing radiation]. *Radiobiologiya i radiatsionnaya meditsina, pod red. A. V. Lebedinskogo, T. 5* [A. V. Lebedinskiy, ed. Radiobiology and radiation medicine. Vol. 5]. Moscow, Atomizdat Publ., 1959, pp. 105–109 (in Russian).
7. Hannan R. S., Boag J. W. Effects of electronic irradiation on fats. *Nature*, 1952, no. 169, pp. 152–153. DOI: <http://doi.org/10.1038/169152a0>
8. Kuzin A. M. *Strukturno-metabolicheskaya teoriya v radiobiologii* [Structural and metabolic theory in radiobiology]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 282 p. (in Russian).
9. Zhang X., Xing X., Liu H., Feng J., Tian M., Chang S., Liu P., Zhang H. Ionizing radiation induces ferroptosis in granulocyte-macrophage hematopoietic progenitor cells of murine bone marrow. *International Journal of Radiation Biology*, 2020, vol. 96, no. 5, pp. 584–595. DOI: <http://doi.org/10.1080/09553002.2020.1708993>
10. Pozdeev A. V., Lysenko N. P. Improving the ionizing radiation resistance of a mammalian organism when using chlorophyll preparations under conditions of radioactive pollution of the environment. *Proceedings of the International Academy of Agricultural Education*, 2018, vol. 42, pp. 60–62 (in Russian).
11. Pozdeev A. V., Gugalo V. P. The effect of the chlorophyll preparation on the content of malondialdehyde in radiation pathology. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, 2012, no. 2, pp. 107–109 (in Russian).
12. Pozdeev A. V., Promonenkov V. K., Lysenko N. P. The use of plant pigment as an inhibitor of electronically excited states. *Veterinary Medicine*, 2010, no. 1, pp. 42–43 (in Russian).
13. Zhuravlyov A. I., Zubkova S. M. *Antioksidanty. Svoobodnoradikal'naya patologiya, starenie. 2-e izd., isprav. i dop.* [Antioxidants. Free radical pathology, aging. Second edition, revised and supplemented. 2<sup>nd</sup> ed., cor. and suppl.]. Moscow, Belye al'vy Publ., 2014. 304 p. (in Russian).
14. Vladimirov Yu. A., Proskurnina E. V. Free radicals and cell chemiluminescence. *Advances in Biological Chemistry*, 2009, no. 49, pp. 341–388 (in Russian).

## Cite this article as:

Romodina L. A. Chlorophyllin Inhibits Chemiluminescence That Accompanies a Quasi-Hypoxigenase Reaction Catalyzed by the Cytochrome *c*-Cardiolipin Complex. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 427–432 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-427-432>



УДК 581.144

## Особенности роста зародышевой корневой системы *Triticum durum* Desf. сортов саратовской селекции

Э. Г. Хачатуров, В. В. Коробко

Хачатуров Эдуард Гариевич, студент биологического факультета, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, sitnikov.edick@yandex.ru

Коробко Валерия Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, v.v.korobko@mail.ru

Объектами исследования служили растения 14 сортов твердой пшеницы *Triticum durum* Desf. Культивирование осуществлялось в климатокамере при температуре  $18 \pm 1^\circ \text{C}$  в условиях 16-часового фотопериода. Для изучения особенностей роста корневой системы проростков измеряли длину главного корня и длину придаточных корней верхнего и нижнего ярусов; определяли скорость роста корневой системы. Выделены сорта, проростки которых характеризуются наибольшей длиной корневой системы, – Луч 25, Саратовская 59 и Саратовская золотистая. Выявлены сортовые особенности роста главного зародышевого корня, скорость роста которого значительно варьирует у объектов исследования. Длина придаточных корней нижнего яруса у растений изученных сортов составила от 208 мм (сорт Елизаветинская) до 278 мм (сорта Саратовская 57 и Аннушка); верхнего яруса – от 105 мм (сорт Николаша) до 216 мм (сорт Луч 25). Рассчитан показатель корнеобеспеченности. У 5-дневных проростков изученных сортов он варьирует от 0,92 до 1,89 отн. ед.; степень варьирования признака средняя. У 12-дневных проростков показатель корнеобеспеченности снижается, составляя 0,42–1,29 отн. ед.; степень варьирования признака значительная (исключение составил сорт Луч 25).

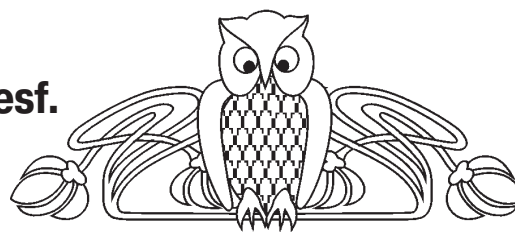
**Ключевые слова:** *Triticum durum* Desf., морфогенез пшеницы, показатель корнеобеспеченности, зародышевая корневая система, скорость роста корневой системы.

Поступила в редакцию: 20.06.2020 / Принята: 30.06.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-433-437>

Несмотря на тот факт, что за последние десятилетия наблюдается тенденция к сокращению площади посевов твердой пшеницы на территории нашей страны, яровая твердая пшеница является важной продовольственной и экономически ценной культурой, что привлекает внимание исследователей к изучению структурных и физиологических аспектов ее продуктивности [1–3].



В процессе селекционной работы [4, 5] достигнут уровень потенциальной продуктивности сортов твердой пшеницы, обеспечивающий эффективное использование сортового разнообразия для формирования урожая в различных климатических условиях. Изучение особенностей роста и развития корневой системы проростков, как одного из важнейших факторов, определяющих полевою устойчивость, особенно актуально в условиях Юго-Востока европейской части России, где основными факторами, лимитирующими продуктивность, являются недостаток влаги в почве, жара и суховеи.

### Материалы и методы

Исследования проводились на кафедре микробиологии и физиологии растений Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Объектом исследования служили проростки яровой твердой пшеницы *Triticum durum* Desf. сортов саратовской селекции, созданные сотрудниками лаборатории твердой пшеницы НИИСХ Юго-Востока; некоторые – Николаша, Лилек и Крассар – совместно с ГНУ Краснодарский НИИСХ им. П. П. Лукьяненко [5].

Для изучения развития зародышевой корневой системы проводили посадку зерновок в полиэтиленовые емкости объемом 200 мл, заполненные вермикулитом. Культивирование осуществлялось в климатокамере при температуре  $18 \pm 1^\circ \text{C}$  и 16-часовом фотопериоде. На 5-й и 12-й день эксперимента измеряли длину главного корня, зародышевых корней нижнего и верхнего ярусов. На основании морфометрических данных рассчитывали абсолютную скорость роста корневой системы по формуле  $C = (L_2 - L_1)/(t_2 - t_1)$ , где  $L_2$  и  $L_1$  – длина исследуемого органа или его части в моменты времени  $t_2$  и  $t_1$  [6]. Показатель корнеобеспеченности (*the root-to-shoot ratio*) рассчитывали как отношение абсолютно сухой массы корневой системы к абсолютно сухой массе побега, выраженное в относительных единицах [7].

Результаты исследований подвергались статистической обработке в табличном процессоре Excel пакета MS Office 2010.



### Результаты и их обсуждение

Корневая система хлебных злаков состоит из главного корня, придаточных зародышевых, или первичных корней; нескольких ярусов вторичных придаточных корней из базальных узлов главного побега и боковых побегов [8]. Рост зародышевой корневой системы начинается с активного роста главного зародышевого корня. Длина главного корня 12-дневных растений ис-

следованных сортов варьирует от 104 мм (сорт Елизаветинская) до 144–146 мм (сорта НИК и Луч 25) (таблица). При этом главный корень составил 20,7–24,3% от длины всей корневой системы исследованных сортов; доля главного корня максимальна у сортов НИК, Людмила и Лилёк, минимальными значениями характеризуются проростки сорта Саратовская золотистая.

#### Развитие корневой системы 12-дневных проростков *Triticum durum* Desf. сортов саратовской селекции The development of the root system of 12-day-old seedlings *Triticum durum* Desf. varieties of Saratov selection

Сорт / The wheat variety	Длина главного корня, мм / Length of the main root, mm	Длина корней нижнего яруса, мм / Length of roots of the lower tier, mm	Длина корней верхнего яруса, мм / Length of upper tier roots, mm
Аннушка / Annushka	129±17	278±21 <sup>a, b, c, d</sup>	188±33 <sup>a</sup>
Саратовская золотистая / Saratovskaya zolotistaya	126±18	273±40	208±39
Саратовская 40 / Saratovskaya 40	112±17	225±32 <sup>a</sup>	153±40
Лилёк / Lilyok	126±17	249±30	144±47
Саратовская 57 / Saratovskaya 57	131±19	262±35	160±28
Золотая волна / Zolotaya volna	122±11	230±24 <sup>b</sup>	182±34 <sup>e</sup>
Валентина / Valentina	126±17	243±29	196±39 <sup>c</sup>
Николаша / Nikolasha	109±18	244±42	105±43 <sup>a, b, c, d, e, f, g</sup>
Саратовская 59 / Saratovskaya 59	140±18 <sup>a</sup>	263±31	206±41 <sup>b</sup>
Елизаветинская / Yelizavetinskaya	104±14 <sup>a, b</sup>	208±33 <sup>c</sup>	208±39
Людмила / Lyudmila	138±21	242±31	189±25 <sup>d</sup>
Луч 25 / Luch 25	146±20	278±39	216±33 <sup>f</sup>
Крассар / Krassar	113±18	221±31 <sup>d</sup>	171±43
НИК / NIK	144±19 <sup>b</sup>	245±39	209±43 <sup>g</sup>

Примечание. a, b, c, d, e, f, g – различия между значениями достоверны при  $p \leq 0.05$ .

Note. a, b, c, d, e, f, g – differences between values are valid at  $p \leq 0.05$ .

Наиболее интенсивный рост главного корня в течение 5 суток от посева наблюдался у проростков сортов Елизаветинская, Крассар и Аннушка: абсолютная скорость его роста составила 13–14 мм/сут. За период с 5-й по 12-й день роста скорость роста главного корня проростков этих сортов снижается, составляя на 12-й день вегетации 5–9 мм/сут – минимальные значения данного показателя среди исследованных нами сортов. Наименьшими значениями скорости роста главного зародышевого корня в течение 5 суток от посева – 8 мм/сут – характеризуются проростки сортов Людмила, Луч 25 и НИК; при этом скорость роста главного корня этих сортов к 12-му дню вегетации является наибольшей среди исследованных сортов твердой пшеницы саратовской селекции, составляя 14–15 мм/сут.

Суммарная длина придаточных корней нижнего яруса у растений изученных сортов варьирует от 208 мм (сорт Елизаветинская) до 278 мм (сорта Саратовская 57 и Аннушка), составляя 41–53% от общей длины корневой системы проростка. Длина корней нижнего яруса проростков сортов Луч 25 и Крассар соответствует медианному значению – 44%; данный показатель развития корневой системы сортов Саратовская 40, Николаша, Саратовская 57, Саратовская золотистая, Лилёк и Аннушка превышает медианное значение, тогда как у остальных сортов оно ниже (см. таблицу).

На 12-й день от посева длина придаточных корней верхнего яруса составляет 23–35% от общей длины корневой системы. Максимальной среди изученных сортов твердой пшеницы длины – 216 мм (34% от общей длины корневой



системы) – достигают придаточные корни верхнего яруса проростков сорта Луч 25; наименьшее значение – 105 мм – отмечено у сорта Николаша.

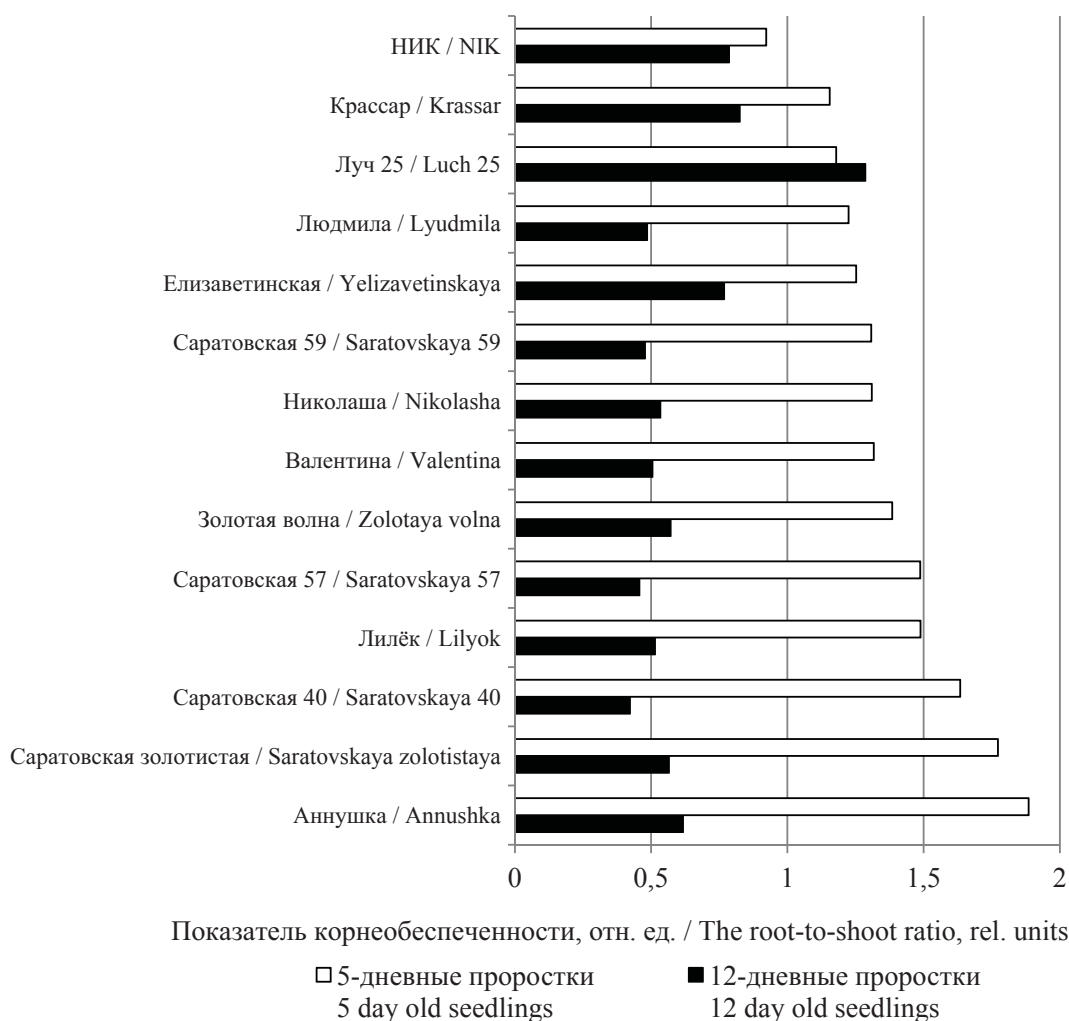
На основании полученных данных рассчитана абсолютная скорость роста корневой системы объектов исследования. Выделены сорта, проростки которых характеризуются высокой скоростью роста корневой системы (50–53 мм/сут) – Луч 25, Саратовская 59, Саратовская золотистая, НИК, Аннушка, и сорта с наименьшими значениями данного показателя (38–40 мм/сут) – Николаша и Елизаветинская.

Таким образом, морфометрический анализ развития зародышевой корневой системы проростков на 12-й день вегетации показал, что наибольшая длина корневой системы характерна сортам Луч 25, Саратовская 59 и Саратовская золотистая. Следует отметить, что в проведенном ранее исследовании установлено, что зародыш сортов Луч 25 и Саратовская 59 характеризуется наиболее развитым

по сравнению с другими сортами эмбриональным побегом [9], абсолютная длина примордиев зародыша зерновки данных сортов превышает медианное значение исследуемого признака.

Проведено измерение абсолютно сухой массы побега и корневой системы, рассчитан показатель корнеобеспеченности, который, по мнению ряда авторов, характеризует устойчивость растений к неблагоприятным условиям окружающей среды [10, 11].

У 5-дневных проростков исследованных сортов корнеобеспеченность варьирует от 0,92 до 1,89 отн. ед.; медианное значение составляет 1,31 отн. ед. Коэффициент вариации равен 19%, что говорит о средней степени варьирования данного признака у 5-дневных проростков изученных сортов. Минимальными значениями корнеобеспеченности характеризуются проростки сорта НИК, максимальными – сортов Аннушка и Саратовская золотистая (рисунок).



Показатель корнеобеспеченности проростков *Triticum durum* Desf.  
The root-to-shoot ratio of seedlings of *Triticum durum* Desf.





К 12-му дню вегетации показатель корнеобеспеченности проростков снижается. В наименьшей степени этот эффект проявился у сорта НИК, корнеобеспеченность проростков которого снизилась на 0,14 отн. ед, тогда как для других сортов – на 0,48–1,27 отн. ед. Исключение составили растения сорта Луч 25, показатель корнеобеспеченности которых в период с 5-го по 12-й день вегетации увеличился на 9%. Медианное значение показателя корнеобеспеченности 12-дневных растений исследованных сортов твердой пшеницы саратовской селекции составило 0,55 отн. ед.; при этом коэффициент вариации данного признака составил 36%, что говорит о значительной степени варьирования данного признака.

### Заключение

На основании исследования морфологических аспектов развития зародышевой корневой системы растений твердой пшеницы были выявлены сортовые различия по длине главного и придаточных корней, скорости роста главного корня и корневой системы в целом. Выделены сорта, проростки которых характеризуются наибольшей длиной корневой системы – это сорта Луч 25, Саратовская 59 и Саратовская золотистая. При этом высокая скорость роста корневой системы в целом характерна растениям сортов Луч 25, Саратовская 59, Саратовская золотистая, НИК, Аннушка; сорта Николаша и Елизаветинская имеют наименьшие значения данного показателя.

Выявлены некоторые особенности роста главного зародышевого корня. Наиболее интенсивный рост главного корня проростков сортов Елизаветинская, Крассар и Аннушка приходится на первые 5 дней от посева, затем скорость роста снижается: у 12-дневных проростков имеет минимальные показатели среди исследованных сортов. Для проростков сортов Людмила, Луч 25 и НИК характерно увеличение скорости роста главного зародышевого корня в период с 5-го по 12-й день вегетации.

Показатель корнеобеспеченности 5-дневных проростков изученных сортов варьирует от 0,92 до 1,89 отн. ед. (степень варьирования признака средняя). К 12-му дню вегетации показатель корнеобеспеченности проростков снижается, составляя 0,42–1,29 отн. ед. (степень варьирования признака значительная) у растений всех сортов, за исключением сорта Луч 25.

Данные, полученные в результате проведенного исследования, могут быть использованы для целенаправленного применения сортового многообразия твердой пшеницы и более полного выявления адаптивного потенциала сортов саратовской селекции.

### Список литературы

1. Трапезников В. К., Иванов И. И., Тальвинская Н. Г., Анохина Н. Л. Рост растений яровой твердой пшеницы на гетеро- и гомогенной питательной среде с различным сочетанием зародышевых корней высоко- и низкосолевого статуса // *Агрохимия*. 2005. № 12. С. 22–30.
2. Бесалиев И. Н., Тухфатуллин М. Ф. К оценке сортов яровой твердой пшеницы на экологическую пластичность // *Изв. Оренб. гос. аграр. ун-та*. 2008. № 1 (17). С. 18–20.
3. Мальчиков П. Н., Вьюшков А. А., Мясникова М. Г. Формирование моделей сортов твердой пшеницы для Среднего Поволжья. Самара : СамНЦ РАН, 2012. 112 с.
4. Ильина Л. Г. Селекция яровой мягкой пшеницы на Юго-Востоке. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 160 с.
5. Васильчук Н. С. Селекция яровой твердой пшеницы. Саратов : НИИСХ Юго-Востока, 2001. 119 с.
6. Williams R. F. The shoot apex and leaf growth : a study in quantitative biology. L. ; N.Y. : Camb. Univ. Press, 1975. 256 p.
7. Голуб Н. А. Параметры первичной корневой системы озимой пшеницы и возможности их использования в оценке сортов // *Физиология продуктивности и устойчивости зерновых культур* : сб. науч. тр. Краснодар : КНИИСХ, 1988. С. 42–47.
8. Красовская И. В. Закономерности строения корневой системы хлебных злаков // *Бот. журн.* 1950. Т. 35, № 4. С. 374–384.
9. Хачатуров Э. Г., Коробко В. В., Степанов С. А. Сортовые особенности развития зародыша зерновки *Triticum durum* Desf. // *Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения* : сб. науч. ст. Саратов : ООО «Амирит», 2020. Вып. 22. С. 7–11.
10. Качев В. И., Гуляев Б. И. Реакция растений разных сортов озимой пшеницы на кратковременную почвенную засуху // *Физиология и биохимия культурных растений*. 2010. Т. 42, № 6. С. 522–529.
11. Коробко В. В., Степанов С. А. Влияние температуры на развитие корневой системы проростков твердой пшеницы // *Вопросы биологии, экологии, химии и методики обучения* : сб. науч. ст. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2017. Вып. 19. С. 3–6.

### Образец для цитирования:

Хачатуров Э. Г., Коробко В. В. Особенности роста зародышевой корневой системы *Triticum durum* Desf. сортов саратовской селекции // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 433–437. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-433-437>



## The Features of Growth of the Primary Root System of *Triticum durum* Desf. Varieties of the Saratov Breeding

E. G. Hachaturov, V. V. Korobko

Eduard G. Hachaturov, <https://orcid.org/0000-0002-4391-8909>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, sitnikov.edick@yandex.ru

Valeria V. Korobko, <https://orcid.org/0000-0002-0444-8238>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, v.v.korobko@mail.ru

The objects of the study were plants of 14 varieties of durum wheat *Triticum durum* Desf. Cultivation was carried out in a climatic chamber at a temperature of  $18 \pm 1^\circ\text{C}$  under the conditions of a sixteen-hour photoperiod. To study the growth characteristics of the root system of seedlings, the length of the main root and the length of the adventitious roots of the upper and lower tiers were measured; thus, the growth rate of the root system was determined. The cultivars, the seedlings of which are characterized by the longest root system, have been identified – Luch 25, Saratovskaya 59 and Saratovskaya zolotistaya. The varietal characteristics of the growth of the main embryonic root were revealed, the growth rate of which significantly varies among the objects of study. The length of the adventitious roots of the lower layer in plants of the studied varieties ranged from 208 mm (Elizavetinskaya) to 278 mm (Saratovskaya 57 and Annushka); the upper layer – from 105 mm (Nikolasha) to 216 mm (Luch 25). The root-to-shoot ratio was calculated. In 5-day-old seedlings of the studied varieties, this varies from 0,92 to 1,89 rel. units; the degree of variation of the trait is average. In 12-day-old seedlings, the root supply index decreases, amounting to 0,42–1,29 relative units; the degree of variation of the trait is significant (with the exception of variety Luch 25).

**Keywords:** *Triticum durum* Desf., wheat morphogenesis, the root-to-shoot ratio, primary root system, growth rate of the root system.

Received: 20.06.2020 / Accepted: 30.06.2020 / Published: 30.11.2020

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

## Reference

1. Trapeznikov V. K., Ivanov I. I., Talvinskaya N. G., Anokhina N. L. The growth of spring durum wheat plants on a heterogeneous and homogeneous nutrient medium with a different combination of germ roots of high and low salt status. *Agrochemistry*, 2005, no. 12, pp. 22–30 (in Russian).
2. Besaliev I. N., Tukhfatullin M. F. To the assessment of varieties of spring durum wheat for ecological plasticity. *News of the Orenburg State Agrarian University*, 2008, no.1 (17), pp. 18–20 (in Russian).
3. Malchikov P. N., Vyushkov A. A., Myasnikova M. G. *Formirovaniye modeley sortov tverдой pshenitsy dlya Srednego Povolzh'ya* [Formation of models of durum wheat varieties for the Middle Volga region]. Samara, SamNTs RAN, 2012. 112 p. (in Russian).
4. Ilyina L. G. *Selektsiya yarovoy myagkoy pshenitsy na Yugo-Vostoke* [Breeding of spring bread wheat in the South-East]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. 160 p. (in Russian).
5. Vasilchuk N. S. *Selektsiya yarovoy tverдой pshenitsy* [Breeding of spring durum wheat]. Saratov, NIISKh Yugo-Vostoka, 2001. 119 p. (in Russian).
6. Williams R. F. *The shoot apex and leaf growth: a study in quantitative biology*. London, New York, Cambridge University Press, 1975. 256 p.
7. Golub N. A. Parametry pervichnoj kornevoj sistemy ozimoy pshenitsy i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya v otsenke sortov [Parameters of the primary root system of winter wheat and the possibility of their use in the evaluation of varieties]. In: *Fiziologiya produktivnosti i ustojchivosti zernovykh kul'tur : sb. nauch. tr.* [Physiology of Productivity and Stability of Grain Crops: Coll. papers]. Krasnodar, Krasnodarskiy NII sel'skogo khozyaistva im. P. P. Lukyanenko, 1988, pp. 42–47 (in Russian).
8. Krasovskaya I. V. Regularities of the structure of the root system of cereals. *Botanic Magazine*, 1950, vol. 35, no. 4, pp. 374–384 (in Russian).
9. Khachaturov E. G., Korobko V. V., Stepanov S. A. Varietal features of the development of the embryo of the weevil *Triticum durum* Desf. *Questions of Biology, Ecology, Chemistry and Teaching Methods*: coll. of sci. art. Saratov, Amirit Publ., 2020, iss. 22, pp. 7–11 (in Russian).
10. Tkachev V. I., Gulyaev B. I. Response of plants of different winter wheat varieties to a brief soil drought. *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*, 2010, vol. 42, no. 6, pp. 522–529 (in Russian).
11. Korobko V. V., Stepanov S. A. The effect of temperature on the development of the root system of durum wheat seedlings. *Questions of Biology, Ecology, Chemistry and Teaching Methods*: coll. of sci. art. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2017, iss. 19, pp. 3–6 (in Russian).

## Cite this article as:

Hachaturov E. G., Korobko V. V. The Features of Growth of the Primary Root System of *Triticum durum* Desf. Varieties of the Saratov Breeding. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 433–437 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-433-437>



УДК 581.522.4:630.18(470.2)

## Комплексная оценка жизнеспособности и декоративности видов рода *Crataegus* L. в условиях Кольского Севера

О. А. Гончарова, О. Е. Зотова

Гончарова Оксана Александровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской области, goncharovaoa@mail.ru

Зотова Олеся Евгеньевна, младший научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской области, ol-sha@mail.ru

В работе представлены результаты комплексной оценки жизнеспособности и декоративности 20 образцов 17 таксонов рода *Crataegus* L. при интродукции на Кольский Север. Исследование является одним из этапов систематизированного описания адаптивного состояния растений рода *Crataegus* при интродукции в условия Крайнего Севера. Основная часть исследованных образцов рода *Crataegus*, интродуцированных на Кольский Север, являются высокодекоративными вполне жизнеспособными растениями, которые обладают высокой зимостойкостью, сохраняют форму роста, способны давать всхожие семена, имеют привлекательные соцветия и плоды. К таковым относятся *C. chlorosarca*, *C. chlorosarca* f. *pyramidalica*, *C. cuneata*, *C. dahurica*, *C. douglasii*, *C. flabellata*, *C. laevigata*, *C. maximoviczii*, *C. pinnatifida*, *C. sanguinea*, *C. x schroederi*, *C. arnoldiana*, *C. canadensis*, *C. foetida* отнесли к нежизнеспособным низкодекоративным интродуцентам. Для внедрения в озеленение перспективных видов рода *Crataegus* в озеленение городов Кольского полуострова необходима предварительная апробация. Поддержание высокодекоративного состояния возможно при соблюдении приемов ухода за древесными растениями.

**Ключевые слова:** интродукции, жизнеспособность, декоративность, комплексная оценка, боярышник – *Crataegus* L., Кольский Север.

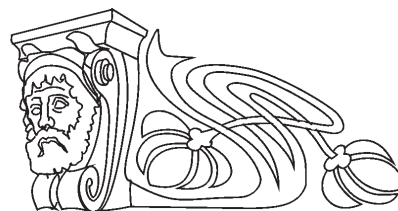
Поступила в редакцию: 21.01.2020 / Принята: 31.05.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-438-444>

### Введение

Интродуцируемые древесные виды должны обладать не только высокой устойчивостью к воздействию новых условий существования, но и декоративной и хозяйственной ценностью для возможного применения в зеленом строительстве. Для анализа итогов интродукции экзота важны длительные наблюдения за ритмом роста и развития. Результатом таких наблюдений является оценка важнейших эколого-биологиче-



ских свойств растения и определение степени его адаптации к новым условиям [1].

Оценку результатов интродукции растений в новых, прежде всего более холодных, условиях принято проводить по росту и фенологическим особенностям. Фенология роста древесных растений относится к сезонным биологическим жизненным циклам, обусловленным сезонными изменениями природы. Таким образом, фенология, вероятно, является самым простым и наиболее эффективным средством наблюдения за изменениями в ритме сезонного развития интродуцентов [2]. По результатам наблюдений за жизнедеятельностью интродуцированных растений возможно пополнение перечня видов, рекомендуемых для озеленения.

Естественная дендрофлора Кольского полуострова в силу сложных климатических условий небогата декоративными видами. Интродуцированные виды часто превосходят аборигенные по декоративным показателям.

Л. Ф. Вечер декоративными показателями считает комплекс морфологических признаков растения, переменных во времени и пространстве под действием абиотических и биотических факторов среды, эстетичных для человеческого восприятия [3]. Знание декоративных качеств и свойств растений необходимо для правильного размещения их в пространстве, что позволяет значительно обогатить художественный облик ландшафтных композиций [4].

С. В. Мухаметова с соавторами отмечают, что в период цветения наиболее важными декоративными качествами растений боярышников являются количество и размеры соцветий, складывающихся из размеров отдельных цветков и их числа в соцветии [5, 6].

Целью исследования явилась комплексная оценка жизнеспособности и декоративности растений рода *Crataegus* L. при интродукции на Кольский Север.

### Материалы и методы

Полярно-альпийский ботанический сад-институт (ПАБСИ) основан в 1931 г. по проекту профессора Н. А. Аврорина. ПАБСИ – самый северный в России (67°38' с.ш.) и один из несколь-



ких ботанических садов мира за полярным кругом. Коллекционный фонд древесных растений ПАБСИ размещен на основных его территориях в городах Кировск и Апатиты. Коллекция древесных растений в Кировске создана с момента основания ПАБСИ и продолжает пополняться. Создание древесного коллекционного питомника в Апатитах начато в 1958 г. Обе территории расположены в 120 км севернее полярного круга. Приполярное расположение Сада определяет суровость природных условий, которые в то же время из-за близости теплого течения Гольфстрим благоприятнее, чем в других заполярных районах.

В 2019 г. в состав коллекционного фонда древесных растений ПАБСИ входят растения 27

семейств, 57 родов, 269 видов и 78 внутривидовых таксонов (22 подвида, 15 разновидностей, 16 форм, 25 сортов), 21 гибрид, всего 368 таксонов, 796 образцов. Систематическая принадлежность 14 образцов определена до рода.

Материалом для проведения оценки жизнеспособности и декоративности послужили результаты наблюдений за жизнедеятельностью интродуцированных образцов рода *Crataegus*, выращиваемых на экспериментальном участке ПАБСИ в г. Апатиты в течение 2001–2019 гг. (табл. 1). Образцы с сомнительной систематической принадлежностью, с неясным происхождением исходного материала не подвергались оценке.

Таблица 1 / Table 1

Объекты исследования  
Objects of study

№	Название растения / Plant name	Год введения в эксперимент Year of introduction to the experiment	Происхождение исходного материала Origin of source material
1	<i>Crataegus arnoldiana</i> Sarg.	1998	ск Липецкая ЛЮС / sc Lipeckaja LOS
2	<i>Crataegus canadensis</i> Sarg.	1985	ск Тростянец, Украина / sc Trostjanec, Ukraina
3	<i>Crataegus chlorosarca</i> Maxim.	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
4	<i>Crataegus chlorosarca</i> Maxim.	1982	сд г. Ключи, Камчатка / sn g. Kljuchi, Kamchatka
5	<i>Crataegus chlorosarca</i> Maxim. f. <i>pyramidalica</i>	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
6	<i>Crataegus cuneata</i> Siebold & Zucc.	1986	ск Харьков, Украина / sc Har'kov, Ukraina
7	<i>Crataegus dahurica</i> Koehne ex Schneid.	1979	сд Хабаровский край / sn Habarovskij kraj
8	<i>Crataegus dahurica</i> Koehne ex Schneid.	1997	ск ПАБСИ / sc PABSI
9	<i>Crataegus douglasii</i> Lindl.	1997	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
10	<i>Crataegus flabellata</i> (Bosc ex Spach) K.Koch	1998	ск Санкт-Петербург / sc Sankt-Peterburg
11	<i>Crataegus foetida</i> Ashe	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
12	<i>Crataegus intricata</i> Lange	1977	ск Турку, Финляндия / sc Turku, Finljandija
13	<i>Crataegus korolkowii</i> L. Henry	1986	ск Харьков, Украина / sc Har'kov, Ukraina
14	<i>Crataegus rusanovii</i> Cinovskis	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
15	<i>Crataegus laevigata</i> (Poir.) DC.	1983	сд Калининградская область / sn Kaliningradskaja oblast'
16	<i>Crataegus maximoviczii</i> C.K. Schneid.	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
17	<i>Crataegus pinnatifida</i> Bunge	1997	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
18	<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	1998	ск Архангельск / sc Arhangel'sk
19	<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	1989	сд р. Дяньшка, Якутия / sn г. Djanyska, Jakutija
20	<i>Crataegus x schroederi</i> (Regel) Koehne	1990	ск Архангельск / sc Arhangel'sk

Примечание. ск / сд – семена культурного / природного происхождения.

Note. sc / sn – seeds of cultural / natural origin.

Жизнеспособность оценивали по шкале, предложенной П. И. Лапиным, С. В. Сидневой [7]. Анализировали степень одревеснения годичного побега, зимостойкость, сохранение

формы роста, побегообразовательную способность, прирост в высоту, способность к генеративному развитию, способы размножения в культуре. Декоративные качества исследуемых





растений оценивали по шкале О. С. Залывской, Н. А. Бабича [8]. При оценке декоративных качеств изучали архитектонику кроны, зимостойкость, поврежденность, привлекательность плодов, продолжительность облиствения и осеннюю окраску листьев, аромат растения,

характеристики цветения: обилие и длительность цветения, окраску и величину цветков.

### Результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлена оценка жизнеспособности исследуемых образцов.

Таблица 2 / Table 2

#### Оценка жизнеспособности интродуцированных образцов рода *Crataegus* по данным визуальных наблюдений Assessment of the viability of introduced samples of the genus *Crataegus* according to visual observations

Образец / Samples	Одр Пб Lig run	Зим Wint	Габитус Habitus	Пб спос / Прирост Sh-form / Growth	Ген разв / Размн Gen dev / repr	Баллы / ЖС points / Vit
1. <i>C. arnoldiana</i>	5	5	1	1 / 2	1 / 1	16 / VI
2. <i>C. canadensis</i>	5	5	1	1 / 2	1 / 1	16 / VI
3. <i>C. chlorosarca</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
4. <i>C. chlorosarca</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
5. <i>C. chlorosarca</i> f. <i>pyramidalica</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
6. <i>C. cuneata</i>	20	25	10	3 / 5	23 / 7	93 / I
7. <i>C. dahurica</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
8. <i>C. dahurica</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
9. <i>C. douglasii</i>	20	25	10	3 / 5	23 / 7	93 / I
10. <i>C. flabellata</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
11. <i>C. foetida</i>	10	10	1	1 / 2	1 / 1	26 / V
12. <i>C. intricata</i>	20	25	5	3 / 5	23 / 1	82 / II
13. <i>C. korolkowii</i>	20	20	5	3 / 5	23 / 7	83 / II
14. <i>C. rusanovii</i>	20	20	5	3 / 5	23 / 7	83 / II
15. <i>C. laevigata</i>	20	25	10	3 / 5	23 / 7	93 / I
16. <i>C. maximoviczii</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
17. <i>C. pinnatifida</i>	20	25	10	3 / 5	23 / 7	93 / I
18. <i>C. sanguinea</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
19. <i>C. sanguinea</i>	20	25	10	3 / 5	25 / 10	98 / I
20. <i>C. x schroederi</i>	20	25	10	3 / 5	23 / 7	93 / I

Примечание. Одр Пб – одревесневшая часть побега в %, баллы; Зим – зимостойкость, баллы; Габитус – сохранение формы роста, баллы; Пб спос / Прирост – побегообразовательная способность / прирост в высоту, баллы; Ген разв / Размн – способность к генеративному развитию / способы размножения в культуре, баллы; ЖС – сумма баллов / группа жизнеспособности.

Note. Lig run – lignified part running in%, points; Wint – winter hardiness, points; Habitus – preservation of the form of growth, points; Sh-form / Growth – shoot-forming ability / growth in height, points; Gen dev / repr – the ability to generative development / methods of reproduction in culture, points; points / Vit – total points / vitality group.

В группу I вполне перспективных и жизнеспособных включили 14 образцов, относящихся к 9 видам, 1 форме и 1 гибриду. Образцы, входящие в группу I, имеют наибольшую оценку в 93–98 баллов. Боярышники группы I зимостойки, побеги одревесневают полностью. Вполне жизнеспособные и перспективные интродуцированные образцы *Crataegus* сохраняют присущую им жизненную форму дерева, обладают средней побегообразовательной способностью и ежегодным приростом. Интродуценты этой группы характеризуются

ежегодным, реже нерегулярным, созреванием семян. Размножение возможно при искусственном посеве семян местной репродукции. Самосев характерен для *C. chlorosarca* f. *pyramidalica*, *C. dahurica*, *C. flabellata*, *C. maximoviczii*, *C. sanguinea*.

Группа II (жизнеспособные и перспективные) включает в себя 3 образца (*C. intricata*, *C. korolkowii*, *C. rusanovii*). Образцы, входящие в группу II, имеют оценку в 82–83 балла. В группу жизнеспособных отнесены образцы с высокими показателями зимостойкости (1 и 2 балла), на на-



чальных этапах онтогенеза возможно обмерзание однолетних побегов. Полностью одревесневают побеги у всех образцов этой группы. Жизненная форма способна восстанавливаться. Побегообразовательная способность средняя, прирост в высоту ежегодный. Образцы достигли генеративного этапа онтогенеза, отмечается нерегулярное созревание семян. В культуре растения группы II размножаются семенным путем, при искусственном посеве семян местной репродукции возможно размножение *C. korolkowii*, *C. rusanovii*, для семенного размножения *C. intricata* чаще необходимо поступление семян из других регионов.

В группы V (нежизнеспособные и неперспективные) и VI (абсолютно непригодные) отнесли образцы *C. foetida*, *C. arnoldiana* и *C. canadensis*. Побеги одревесневают на 25–50%, как следствие, растения отличаются слабой зимостойкостью. Побегообразовательная способность низкая, побеги могут появляться на уцелевших частях кроны, при обмерзании до уровня почвы образуется поросль от корневой шейки. Растения не цветут, для размножения в культуре необходимо привлечение семян из других регионов.

В табл. 3 представлена оценка декоративности исследуемых образцов.

Таблица 3 / Table 3

**Оценка декоративности интродуцированных образцов рода *Crataegus***  
**Assessment of the decorativeness of introduced samples of the genus *Crataegus***

Образец Samples	Крона Crohn	Дл цв / Обилие Flow dur / Abun	Венчик / Плоды Corolla / Fruits	Аромат Арома	Осен окр / Прод облиств Aut col / Fol dur	Поврежд / Зим Damaged / Wint	Баллы / Дек Points / Dec
1. <i>C. arnoldiana</i>	1	0 / 0	0 / 0	0	3 / 2,5	2 / 2,5	11 / 4
2. <i>C. canadensis</i>	1	0 / 0	0 / 0	0	3 / 2	1,5 / 2	9,5 / 5
3. <i>C. chlorosarca</i>	3,5	3 / 4	3 / 4	1	4 / 3	4,5 / 5	35 / 2
4. <i>C. chlorosarca</i>	2,5	3 / 3,5	3 / 4	2	4 / 4	4 / 5	35 / 2
5. <i>C. chlorosarca</i> f. <i>pyramidalica</i>	3	3 / 4	3 / 4	1	4 / 3	4,5 / 5	34,5 / 2
6. <i>C. cuneata</i>	2,5	3 / 3	3 / 3,5	1	4 / 3,5	4 / 5	32,5 / 2
7. <i>C. dahurica</i>	2,5	3 / 3	3,5 / 4	2	4 / 4	3 / 3	32 / 2
8. <i>C. dahurica</i>	3	3 / 4,5	3 / 4 1	4,5	3,5	4,5 / 5	36 / 2
9. <i>C. douglasii</i>	2	2,5 / 3	3 / 4	1	4 / 3	4 / 4	30,5 / 2
10. <i>C. flabellata</i>	3	3 / 5	4,5 / 5	1	4,5 / 3,5	4,5 / 5	39 / 2
11. <i>C. foetida</i>	2,5	0 / 0	0 / 0	0	3,5 / 3	3,5 / 3	15,5 / 4
12. <i>C. intricata</i>	1,5	2 / 2	3 / 3	1	3,5 / 3	3,5 / 3,5	26 / 3
13. <i>C. korolkowii</i>	3	3 / 3	3,5 / 3,5	1	3,5 / 3	4 / 4,5	32 / 2
14. <i>C. rusanovii</i>	3	2,5 / 3	3 / 3	1	4 / 3	4,5 / 4,5	31,5 / 2
15. <i>C. laevigata</i>	2,5	3 / 3	3 / 3,5	1	4 / 3,5	4 / 5	32,5 / 2
16. <i>C. maximoviczii</i>	3	3 / 5	4,5 / 5	1	4,5 / 3,5	4,5 / 5	39 / 2
17. <i>C. pinnatifida</i>	3	3 / 5	3,5 / 4	1	4 / 3	4,5 / 5	36 / 2
18. <i>C. sanguinea</i>	3,5	3 / 3,5	3,5 / 4	1	4 / 3,5	4 / 5	35 / 2
19. <i>C. sanguinea</i>	3	3 / 3	2,5 / 3,5	1	3,5 / 3,5	3 / 4	30 / 3
20. <i>C. x schroederi</i>	2,5	3 / 3	3,5 / 3,5	1	3,5 / 3	4 / 4	31 / 2

Примечание. Крона – архитектура кроны, баллы; Дл цв / Обилие – длительность цветения / обилие цветения, баллы; Венчик / Плоды – окраска и величина цветков / привлекательность и длительность удержания на побегах плодов, баллы; аромат – аромат растения, баллы; Осен окр / Прод облиств – цветовая гамма осенней окраски листьев / продолжительность облиствения, баллы; Поврежд / Зим – поврежденность растений / зимостойкость, баллы; Дек – группа декоративности.

Note. Crohn – architectonics of the crown, points; Flow dur / Abundance – flowering duration / flowering abundance, points; Corolla / Fruits – color and size of flowers / attractiveness and duration of retention on the shoots of fruits, points; aroma – aroma of a plant, points; Autumn col / Fol dur – the color scheme of the autumn leaf color / duration of foliage, points; Damaged / Wint – damage to plants / winter hardiness, points; Dec – decorative group.

В группу растений с высокой декоративностью отнесли 15 образцов. Образцы этой группы имеют хорошо сформированные ствол и побеги, в

редких случаях обнаружены незначительные повреждения кроны. Соцветия образуются в достаточном количестве, у *C. flabellata*, *C. maximoviczii*



и *C. pinnatifida* в обильном количестве, цветение длится около 15 суток. Плоды привлекательные, имеются в редких случаях повреждения. Листья начинают распускаться в начале июня, опадают в конце сентября – начале октября. Встречаются механические повреждения, усыхание ветвей, установлено наличие различных патологий на листовых пластинках. Образцы в группе не обмерзают, в отдельные годы обмерзает до 50–100% годовичного побега.

В группу образцов со средней декоративностью отнесли два образца (образец 19. *C. sanguinea* и образец 12. *C. intricata*). Растения имеют заметно угнетенную крону, присутствует усыхание ветвей. Обмерзает 50–100% годовичного побега. Соцветия образуются в небольшом количестве. Плоды удовлетворительного вида, имеются повреждения. Листья начинают распускаться в начале июня, опадают в конце сентября – начале октября.

Декоративность *C. arnoldiana* и *C. foetida* оценивается как низкая, очень низкая степень декоративности характерна для *C. canadensis*. Растения значительно угнетены, крона сильно деформирована. Эти образцы не цветут. Листья начинают распускаться в середине июня.

Оценка жизнеспособности и декоративности интродуцированных растений рода *Crataegus* позволяет отметить следующее. Исследованные образцы возможно разделить на три группы: вполне жизнеспособные высокодекоративные, жизнеспособные среднедекоративные, нежизнеспособные низкодекоративные.

Вполне жизнеспособными высокодекоративными растениями являются 13 образцов. Это по 2 образца *C. chlorosarca* и *C. dahurica*, по 1 образцу *C. chlorosarca* f. *pyramidalica*, *C. cuneata*, *C. douglasii*, *C. flabellata*, *C. laevigata*, *C. maximoviczii*, *C. pinnatifida*, *C. sanguinea*, *C. x schroederi*. Перечисленные таксоны следует подвергнуть дополнительному исследованию с целью рекомендации для включения в список растений, используемых в озеленении населенных пунктов Кольского Севера.

К жизнеспособным среднедекоративным отнесли *C. intricata*, *C. korolkowii*, *C. rusanovii*, один из образцов *C. sanguinea*. Для получения более устойчивых образцов возможно выращивание растений из семян, полученных из более северных регионов.

*C. arnoldiana*, *C. canadensis*, *C. foetida* отнесли к нежизнеспособным низкодекоративным интродуцентам.

Следует отметить, что использованная шкала оценки декоративности нуждается в модификации

применительно к условиям Кольского полуострова и особенностям сезонного развития древесных растений.

Ранее О. Е. Зотовой, О. А. Гончаровой [9] проведено исследование морфометрических параметров соцветий 7 видов рода *Crataegus* (*C. cuneata*, *C. dahurica*, *C. flabellata*, *C. rusanovii*, *C. laevigata*, *C. maximoviczii*, *C. sanguinea*), интродуцированных на Кольский Север. Установлено, что соцветия *C. dahurica* и *C. maximoviczii* характеризуются наибольшим диаметром и плотностью, что согласуется с оценкой привлекательности цветков по используемой в настоящем исследовании шкале О. С. Зальвской, Н. А. Бабица [8].

Отдельные вопросы интродукции 14 образцов 11 видов *Crataegus* в условиях Кольского полуострова отражены в работе О. А. Гончаровой и др. [10]. Для вегетации характерно раннее начало (15–26 мая) и короткая продолжительность (99–114 дней). Линейный рост побегов начинается в конце мая – первой декаде июня, завершается в июле. У большинства образцов отмечается регулярное цветение и плодоношение. Префлоральный период длится 32–45 дней, продолжительность цветения 6–10 дней.

Таким образом, интродуцированные образцы рода *Crataegus* в Полярно-альпийском ботаническом саду-институте являются вполне жизнеспособными высокодекоративными цветущими и плодоносящими растениями. Необходимо внедрение в озеленение перспективных видов рода *Crataegus*.

### Заключение

Исследованные образцы рода *Crataegus*, интродуцированные на Кольский Север, являются высокодекоративными вполне жизнеспособными растениями, которые обладают высокой зимостойкостью, сохраняют форму роста, способны давать всхожие семена, имеют привлекательные соцветия и плоды. Поддержание высокодекоративного состояния возможно при своевременном соблюдении агротехнических приемов ухода за древесными растениями. С точки зрения практической значимости работа является этапом в формировании научно обоснованного озеленительного ассортимента, выполняющего экологические, санитарно-гигиенические и декоративные функции.

### Список литературы

1. Козловский Б. Л., Огородников А. Я., Огородникова Т. К., Куропятников М. В., Федоринова О. И. Цветковые древесные растения Ботанического сада



- Ростовского университета (экология, биология, география). Ростов н/Д : Старые русские, 2000. 144 с.
2. *Supuka J.* Comparative phenology of urban greenery woody species – reflection of changed ecological conditions // *Folia Dendrologica*. 1988. Vol. 15. P. 267–285.
  3. *Вечер Л. Ф.* Декоративность интродуцированных древесных и кустарниковых растений в зависимости от повреждающих листьев насекомых и грибных болезней // *Декоративное садоводство Сибири* : сб. науч. тр. РАСХН Сибирское отд-ние НИИСС им. М. А. Лисавенко. Барнаул : Азбука, 2005. С. 59–69.
  4. *Кочарян К. С.* Эколого-экспериментальные основы зеленого строительства в крупных городах Центральной части России (на примере Москвы). М. : Наука, 2000. 184 с.
  5. *Мухаметова С. В., Григорьева К. Ю., Файзуллина Г. М.* Декоративные качества соцветий и цветков боярышника // *Субтропическое и декоративное садоводство* : сб. науч. тр. Сочи : ГНУ ВНИИЦиСК Россельхозакадемии, 2013. Вып. 49. С. 122–127.
  6. *Мухаметова С. В., Кожина Н. А.* Показатели соцветий боярышников секции *Crataegus* // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2018. Т. 1, № 5. С. 153–156.
  7. *Латин П. И., Сиднева С. В.* Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // *Опыт интродукции древесных растений* : сб. науч. ст. М. : Наука, 1973. С. 7–67.
  8. *Залывская О. С., Бабич Н. А.* Шкала комплексной оценки декоративности деревьев и кустарников в городских условиях на Севере // *Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование*. 2012. № 1 (15). С. 96–104.
  9. *Зотова О. Е., Гончарова О. А.* Влияние фенологических факторов на морфометрические параметры рода *Crataegus* L. в условиях Кольской Субарктики // *Самар. науч. вестн.* 2019. Т. 8, № 3 (28). С. 42–46 DOI: 10.24411/2309-4370-2019-13106
  10. *Гончарова О. А., Полоскова Е. Ю., Зотова О. Е., Луннонен И. Н.* Некоторые вопросы интродукции образцов *Crataegus* L. на Кольском Севере // *Самар. науч. вестн.* 2017. Т. 6, № 2 (19). С. 31–35.

#### Образец для цитирования:

Гончарова О. А., Зотова О. Е. Комплексная оценка жизнеспособности и декоративности видов рода *Crataegus* L. в условиях Кольского Севера // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 438–444. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-438-444>

#### Complex Assessment of the Viability and Decorativeness of Species of the Genus *Crataegus* L. in the Kola North Conditions

O. A. Goncharova, O. E. Zotova

Oxana A. Goncharova, <https://orcid.org/0000-0002-8881-8522>, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the Kola Science Center RAS, 18A Fersman St., Apatity, Murmansk region 184209, Russia, [goncharovao@mail.ru](mailto:goncharovao@mail.ru)

Zotova Olesya Evgenievna, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the Kola Science Center RAS, 18A Fersman St., Apatity, Murmansk region 184209, Russia, [ol-sha@mail.ru](mailto:ol-sha@mail.ru)

The paper presents the results of a comprehensive assessment of the viability and decorativeness of 20 samples of 17 taxa of the genus *Crataegus* L. when introduced into the Kola North. The study is one of the stages of a systematic description of the adaptive state of plants of the genus *Crataegus* when introduced into the conditions of the Far North. The main part of the studied samples are highly decorative quite viable plants that have high winter hardiness, maintain their growth shape, are able to produce germinating seeds, and have attractive inflorescences and fruits. *C. chlorosarca*, *C. chlorosarca* f. *pyramidalica*, *C. cuneata*, *C. dahurica*, *C. douglasii*, *C. flabellata*, *C. laevigata*, *C. maximoviczii*, *C. pinnatifida*, *C. sanguinea*, *C. xschroederi*, *C. arnoldiana*, *C. canadensis* and *C. foetida* are nonviable and undecorative plants. For the introduction of promising species of the genus *Crataegus* into the landscaping of cities of the Kola Peninsula, preliminary testing is required. Maintaining a highly decorative state is possible while observing the care of woody plants.

**Keywords:** introduction, viability and prospectiveness, decorativeness, integrated assessment, hawthorn – *Crataegus* L., Kola North.

Received: 21.01.2020 / Accepted: 31.05.2020 / Published: 30.11.2020

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

#### References

1. *Kozlovskij B. L., Ogorodnikov A. Ya., Ogorodnikova T. K., Kuropyatnikov M. V., Fedorinova O. I.* *Cvetkovyye drevesnye rasteniya Botanicheskogo sada Rostovskogo universiteta (ekologiya, biologiya, geografiya)* [Flowering woody plants of the Botanical Garden of Rostov University (ecology, biology, geography)]. Rostov-on-Don, Starye russkie Publ., 2000. 144p. (in Russian).
2. *Supuka J.* Comparative phenology of urban greenery woody species – reflection of changed ecological conditions. *Folia Dendrologica*, 1988, vol. 15, pp. 267–285.
3. *Vecher L. F.* Dekorativnost' introducirovannyh drevesnyh i kustarnikovyyh rastenij v zavisimosti ot povrezhdajushih list'ja nasekomyh i gribnyyh boleznej [Decorativeness of introduced wood and shrub plants, depending on leaf damaging insects and fungal diseases]. In: *Dekorativnoe sadovodstvo Sibiri: sb. nauch. tr. RASHN Sibirskoe otdnie NIIS im. M. A. Lisavenko* [Ornamental gardening of Siberia: collection of scientific works RASKHN Siberian branch of the Lisavenko research institute]. Barnaul, Azbuka Publ., 2005, pp. 59–69 (in Russian).





4. Kocharjan K. S. *Ekologo-eksperimental'nye osnovy zelenogo stroitel'stva v krupnykh gorodakh Tsentral'noi chasti Rossii (na primere Moskvy)* [Ecological and experimental foundations of green building in large cities of the central part of Russia (on the example of Moscow)]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 184 p. (in Russian).
5. Muhametova S. V., Grigor'eva K. Ju., Fajzullina G. M. Dekorativnye kachestva sotsvetii i tsvetkov boyaryshnika [Ornamental qualities of hawthorn inflorescences and flowers]. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo: sb. nauch. tr.* [Semitropical and decorative gardening : collection of scientific works]. Sochi, GNU VNIICiSK Rossel'hozakademii Publ., 2013, iss. 49, pp. 122–127 (in Russian).
6. Muhametova S. V., Kozhina N. A. Inflorescence hawthorn indicators of section *Crataegus*. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2018, vol. 1, no. 5, pp. 153–156 (in Russian).
7. Lapin P. I., Sidneva S. V. Otsenka perspektivnosti introduksii drevesnykh rastenij po dannym vizual'nykh nabljudenij [Assessment of the prospects of introducing woody plants according to visual observations]. In: *Opyt introduksii drevesnykh rastenij: sb. nauch. st.* [Experience of introduction of woody plants: Coll. sci. art.]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 7–67 (in Russian).
8. Zalyvskaja O. S., Babich N. A. Scale of complex assessment of trees and shrub decorativeness in northern cities. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Forest. Ecology. Nature Management*, 2012, no. 1 (15), pp. 96–104 (in Russian).
9. Zotova O. E., Goncharova O. A. Morphometric characteristics of inflorescences and phenology of introduced plants of the genus *Crataegus* L. in the Kola subarctic conditions. *Samara Journal of Science*, 2019, vol. 8, no. 3 (28), pp. 42–46 (in Russian). DOI: 10.24411/2309-4370-2019-13106
10. Goncharova O. A., Poloskova E. Yu., Zotova O. E., Lipponen I. N. Introduction of *Crataegus* L. samples in the Kola North. *Samara Journal of Science*, 2017, vol. 6, no. 2 (19), pp. 31–35 (in Russian).

---

**Cite this article as:**

Goncharova O. A., Zotova O. E. Complex Assessment of the Viability and Decorativeness of Species of the Genus *Crataegus* L. in the Kola North Conditions. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 438–444 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-438-444>

---



## ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.24: 615.322

### Накопление тяжелых металлов и мышьяка лекарственным растительным сырьем полыни горькой

Н. А. Дьякова

Дьякова Нина Алексеевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры фармацевтической химии и фармацевтической технологии, Воронежский государственный университет, Ninochka\_v89@mail.ru

Воронежская область традиционно является важнейшим районом растениеводства и земледелия. Целью исследования являлось изучение загрязнения тяжелыми металлами лекарственного растительного сырья Воронежской области на примере полыни горькой, собранной в урбо- и агроэкосистемах, испытывающих на себе различное антропогенное воздействие. Изучалось накопление тяжелых металлов (свинца, ртути, кадмия, никеля, меди, цинка, кобальта, хрома) и мышьяка, в 51 образце полыни горькой. Сравнивая данные по содержанию тяжелых металлов в верхних слоях почв региона и содержание этих элементов в надземной части полыни горькой, можно предполагать наличие значительных физиологических барьеров, препятствующих накоплению экотоксикантов в генеративных органах растения, что особенно заметно для таких элементов, как свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, кобальт и хром. Полынь горькая способна избирательно концентрировать некоторые тяжелые металлы, входящие в активные центры ферментных систем (такие как медь и цинк). Таким образом, для полыни горькой в условиях антропогенной нагрузки происходит формирование эдафотипа, образующегося в результате действия отбора в условиях техногенного загрязнения внешней среды и проявления адаптации к этим условиям. Результаты исследований показали, что полынь горькая способна накапливать токсические элементы из почв, что важно при планировании мест заготовки лекарственного растительного сырья и оценке его качества.

**Ключевые слова:** Воронежская область, полынь горькая, свинец, ртуть, кадмий, никель, медь, цинк, кобальт, хром.

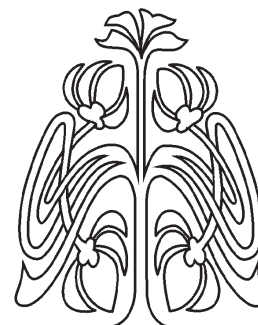
Поступила в редакцию: 29.04.2020 / Принята: 08.05.2020 / Опубликовано: 30.11.2020

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

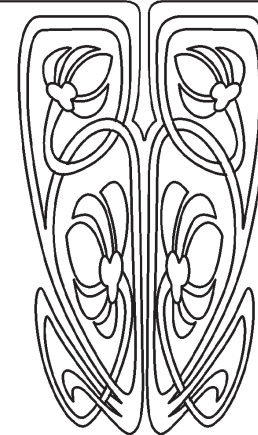
DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-445-453>

#### Введение

На сегодняшний день в медицинской и фармацевтической практике нашей страны применяется более 6 тысяч лекарственных препаратов на основе лекарственного растительного сырья. Значительный интерес к таким лекарственным средствам объясняется тем, что фитопрепараты обладают хорошим терапевтическим эффектом и относительной безвредностью. Большая доля заготовок фитосырья расположена в европейской части Российской Федерации, отличающейся значительной плотностью населения, высокой активностью хозяйственной деятельности, развитием транспортных магистралей. В связи с этим увеличивается угроза сбора растительного сырья в экологически неблагоприятных районах и возрастает актуальность выявления влияния антропогенного загрязнения на химический состав растений [1, 2].



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





Синантропным видом, сырье которого заготавливается от дикорастущих особей, является полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.) – многолетнее, повсеместно встречающееся, травянистое, издревле используемое в медицине растение с выраженным желчегонным и противовоспалительным эффектом. Широкое применение обусловлено богатым химическим составом надземной части полыни горькой, основу которого составляют горькие гликозиды, флавоноиды, дубильные вещества (до 2,5%), эфирное масло, эфирные масла, каротин, органические кислоты, макро- и микроэлементы [3, 4]. При этом полынь горькая благодаря хорошо развитой разветвленной корневой системе хорошо накапливает фосфор, хром, медь, цинк. По этой же причине данное растение иногда используют для очистки почв от тяжелых металлов [5].

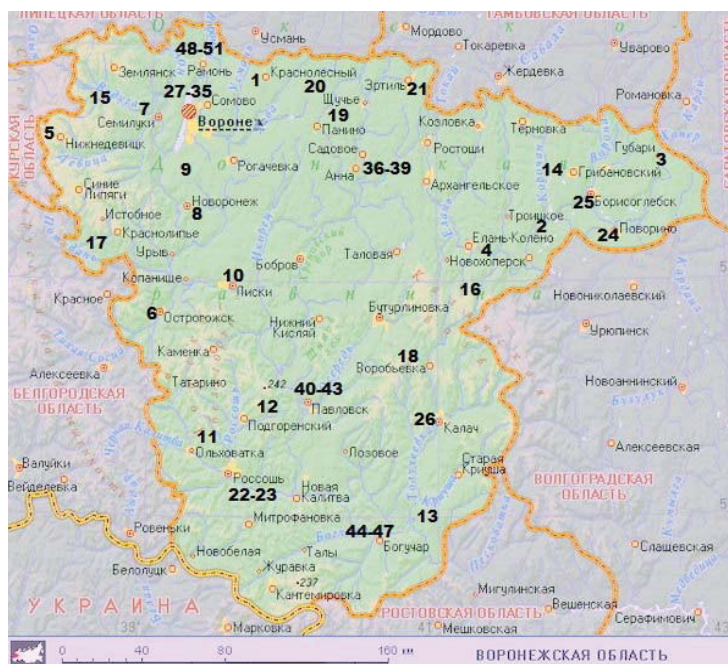
**Цель исследования** – изучение загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком лекарственного растительного сырья Воронежской области на примере полыни горькой, собранной в урбо- и агроэкосистемах, испытывающих на себе различное антропогенное воздействие.

#### Материалы и методы

Сбор лекарственного растительного сырья проводили согласно требованиям по заготовке: в период цветения полыни горькой в сухую солнечную погоду, срезая секатором на расстоянии 30–40 см от верхушки растения.

Выбор районов для сбора образцов на территории Воронежской области обусловлен особенностями воздействия человека (рисунок): химические промышленные предприятия (23, 24, 28); теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) (27); атомная электростанция (АЭС) в г. Нововоронеж (8); международный аэропорт им. Петра I (30); улица г. Воронежа (ул. Димитрова) (31); высоковольтные линии электропередач (ВЛЭ) (9); Воронежское водохранилище (29); малые города (г. Борисоглебск (25), г. Калач (26)); зона значительного месторождения никелевых руд (4); районы, находящиеся в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС (5–7); районы активного ведения сельского хозяйства (10–22); фон (для сравнения) – заповедные территории (1–3)). Также проводили отбор проб вдоль дорог разной степени загруженности: лесная зона (32) – трасса М4 «Дон», лесостепная зона (33) – трасса А144 «Курск – Саратов», степная зона (34) – трасса М4 «Дон», проселочная автомобильная дорога малой загруженности (35) и железная дорога (36).

Анализ образцов лекарственного растительного сырья полыни горькой проводился на аналитическом комплексе на базе атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915МД по фармакопейным методикам [4]. Каждое определение проводили трехкратно. Данные, полученные в ходе исследований, статистически обрабатывали в программе «Microsoft Excel». В образцах опре-



Карта отбора образцов (цифры расшифрованы в тексте)  
Sampling card (numbers deciphered in text)



деляли концентрацию наиболее токсичных элементов: свинца, мышьяка, ртути, кадмия, никеля, цинка, кобальта, хрома и меди.

### Результаты и их обсуждение

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в отобранных образцах полыни горькой представлено в таблице.

Содержание элементов так называемой «страшной тройцы» – свинца, ртути, кадмия в отобранных образцах лекарственного растительного сырья полыни горькой не превышает установленных фармакопейной статьёй норм [4].

Так, особенно низким оказалось содержание ртути в изучаемых образцах, которое варьировало от 0,002 до 0,009 мг/кг. При этом концентрация ртути в почвах исследуемых районов в десятки раз больше – от 0,01 до 0,24 мг/кг [6]. Известно, что в почве ртуть образует малорастворимые соединения, которые достаточно прочно удерживаются почвенными коллоидами, а потому не всасываются корневой системой растения. Также низкое содержание фитотоксичной ртути можно связать с наличием в растениях действующей системы инактивации токсикантов [7, 8].

Концентрация свинца в изучаемых образцах варьировала от 0,21 (в образце, собранном в Ольховатском районе) до 2,04 мг/кг (в образце, собранном вдоль трассы М4 в Рамонском районе). Содержание элемента в почвах районов, в которых производился сбор образцов, отмечено на уровне от 1,71 до 34,57 мг/кг [6]. Вероятно, низкий уровень накопления свинца в надземной части полыни горькой связан с тем, что его соединения в почве малорастворимы, что ограничивает биодоступность металла для растения. Кроме того, возможно предположить наличие физиологического барьера в растении, препятствующего накоплению данного фитотоксиканта, вызывающего в большом количестве выраженное ингибирование процессов роста и развития растения. Стоит также отметить, что для агробиоценозов отмечены менее значительные концентрации свинца в лекарственном растительном сырье полыни горькой (0,21–0,80 мг/кг), для урбобиоценозов – более значительные. При этом наибольшие концентрации металла (более 1,0 мг/кг) отмечены для образцов, собранных вблизи химических предприятий (ОАО «Минудобрения», ООО «БорМаш»), в городах с развитой инфраструктурой (Борисоглебск, Воронеж), вдоль и на удалении 100–200 м от крупных автотрасс, вдоль железной дороги. В связи с этим можно предположить значительное аэрозольное загрязнение свинцом полыни горькой, собранной в урбобиоценозах [7–10].

Концентрация кадмия в исследуемом сырье варьировала от 0,02 мг/кг (в образце заповедной зоны) до 0,56 мг/кг (в образце, собранном вдоль трассы М4 в Рамонском районе). Содержание кадмия в почве исследуемых районов составило 0,02–0,72 мг/кг [6]. При этом для образцов, собранных в условиях заповедных территорий и агробиоценозов, характерно низкое накопление кадмия – его концентрация в сырье не превышает 0,13 мг/кг. Образцы, собранные в условиях урбобиоценозов (на улицах городов Воронеж, Калач, Борисоглебск, вблизи крупных автомобильных трасс и железной дороги, вблизи промышленных предприятий), содержат более высокие концентрации данного металла – более 0,2 мг/кг. Кадмий является главным блокатором основных ферментных и антиоксидантных систем в растении, вероятно, у полыни горькой в процессе эволюции выработался механизм физиологической регуляции всасывания и проведения соединений данного металла по тканям и органам растения, что является основой их выживания в условиях техногенного загрязнения окружающей среды данным элементом. При этом более высокие концентрации кадмия в образцах, собранных в урбобиоценозах, можно связать с аэрозольным загрязнением надземной части растения токсичным металлом [2, 8, 11, 12].

Содержание мышьяка оказалось превышающим предельно допустимую концентрацию в 12 образцах полыни горькой (в образцах, собранных вблизи химических предприятий ОАО «Минудобрения», ООО «БорМаш», ООО «Сибур», вблизи ТЭЦ «ВОГРЭС», на улице города Воронежа и вдоль Воронежского водохранилища, вблизи аэропорта, вдоль и на удалении 100 м от трассы М4 и от железной дороги в Рамонском районе, вдоль трассы А144). При этом концентрация мышьяка в исследуемых образцах варьировала от 0,20 до 1,20 мг/кг, а в верхних слоях почв исследуемых районов гораздо значительнее – от 0,55 до 3,81 мг/кг [6]. Известно, что соединения мышьяка обладают низкой растворимостью и подвижностью в почве, что связано с их сорбцией на поверхности органическими и минеральными коллоидами, поэтому мышьяк – малодоступный для растений элемент. С увеличением содержания его соединений в почве возможно развитие токсического действия на растительные организмы: увядание листьев, замедление темпов роста. Поэтому можно предположить наличие у полыни горькой биохимических механизмов, препятствующих накоплению мышьяка. Более высокие концентрации, в том числе все, превышающие нормы, установленные нормативными документами, отмечены





Содержание тяжелых металлов и мышьяка в образцах лекарственного сырья полыни горькой (*Artemisia absinthium* L.)  
Heavy metal and arsenic content of medicinal vegetal raw materials of bitter wormwood (*Artemisia absinthium* L.)

№	Район сбора / Area of collecting	Валовое содержание элемента, мг/кг / Gross element content, mg/kg										
		Pb	Hg	Cd	As	Ni	Cr	Co	Cu	Zn		
1	Воронежский биосферный заповедник / Voronezh biosphere reserve	0,32	0,005	0,03	0,34	0,93	0,65	0,24	12,69	25,63		
2	Хоперский заповедник / Khorug reserve	0,26	0,004	0,02	0,22	1,32	0,58	0,31	19,10	28,05		
3	Борисоглебский р-н / Borisoglebsk district	0,28	0,005	0,04	0,20	0,72	0,87	0,20	15,47	23,75		
4	с. Елань-Колено / village of Elan-Koleno	0,42	0,005	0,05	0,39	1,92	0,40	0,26	12,64	26,98		
5	с. Нижнедевицк / village of Nizhnedevitsk	0,52	0,006	0,07	0,31	0,83	0,52	0,35	15,64	19,00		
6	г. Острогожск / city of Ostrogzhsk	0,47	0,006	0,05	0,43	2,74	1,38	0,41	16,39	36,42		
7	г. Семилуки / city of Semiluki	0,60	0,004	0,08	0,45	1,53	0,99	0,27	21,85	39,61		
8	г. Нововоронеж / city of Novovoronezh	0,43	0,005	0,11	0,32	0,87	0,70	0,31	15,75	21,25		
9	ВЛЭ (Нововоронежский городской округ) / High-voltage power transmission lines (Novovoronezhsky city district)	0,74	0,006	0,13	0,37	1,64	1,52	0,25	21,00	48,92		
10	Лисинский р-н / Liskinsky district	0,57	0,006	0,02	0,41	0,65	0,59	0,36	23,67	19,47		
11	Ольховатский р-н / Olkhovatsky district	0,21	0,005	0,09	0,43	2,45	0,68	0,30	18,64	34,17		
12	Подгоренский р-н / Podgorensky district	0,39	0,007	0,10	0,46	3,90	0,75	0,42	24,90	25,19		
13	Петропавловский р-н / Peter and Paul district	0,61	0,007	0,14	0,31	0,90	1,36	0,47	33,51	31,70		
14	Грибановский р-н / Gribanovsky district	0,49	0,005	0,09	0,48	3,63	0,50	0,21	24,09	42,84		
15	Хохольский р-н / Hoholsky district	0,37	0,006	0,13	0,40	3,96	0,65	0,18	19,06	37,13		
16	Новохоперский р-н / New Khoruyor district	0,29	0,006	0,07	0,45	2,57	1,39	0,15	15,89	28,00		
17	Репьевский р-н / Relyevsky district	0,62	0,007	0,09	0,47	2,95	0,87	0,26	23,03	31,09		
18	Воробьевский р-н / Vorobyevsky district	0,36	0,009	0,05	0,30	2,46	0,92	0,19	30,55	16,98		
19	Панинский р-н / Paninsky district	0,53	0,008	0,15	0,39	3,24	1,35	0,29	15,97	37,10		
20	Верхнехавский р-н / Verkhnekhavsky district	0,73	0,006	0,16	0,43	1,67	0,82	0,20	19,69	32,65		
21	г. Эртиль / city of Ertil	0,80	0,007	0,05	0,35	3,12	0,23	0,15	23,85	42,50		
22	Россошанский р-н / Rossosh district	0,45	0,008	0,12	0,46	3,44	0,79	0,36	22,07	36,27		
23	Вблизи ОАО «Минудобрения» (г. Россошь) / Near OJSC «Minudobriya» (city of Rossoch)	0,62	0,009	0,41	<b>0,96</b>	4,21	3,98	0,57	36,54	115,36		
24	Вблизи ООО «Бормаш» (г. Поворино) / Near LLC «Bormash» (city of Povorino)	1,79	0,009	0,31	<b>1,20</b>	5,24	2,97	0,42	45,37	87,43		
25	г. Борисоглебск / city of Borisoglebsk	1,22	0,008	0,26	0,47	2,45	1,84	0,64	26,96	72,94		
26	г. Калач / city of Kalach	0,93	0,009	0,13	0,45	3,74	2,12	0,41	21,08	59,21		
27	Вблизи ТЭЦ «ВОГРЭС» (г. Воронеж) / Near «VOGRES» Thermal Power Plant (city of Voronezh)	0,52	0,009	0,56	<b>0,90</b>	2,21	2,56	0,72	18,32	87,26		



Окончание таблицы / The end of the table

№	Район сбора / Area of collecting	Валовое содержание элемента, мг/кг / Gross element content, mg/kg										
		Pb	Hg	Cd	As	Ni	Cr	Co	Cu	Zn		
28	Вблизи ООО «Сибур» (г. Воронеж) / Near LLC "Sibur" (city of Voronezh)	0,85	0,009	0,32	<b>0,57</b>	1,93	2,62	0,51	25,70	96,49		
29	Вдоль водохранилища (г. Воронеж) / Along the reservoir (city of Voronezh)	0,71	0,006	0,02	<b>0,52</b>	2,34	0,82	0,16	16,92	32,50		
30	Вблизи аэропорта / Near the airport	0,95	0,007	0,09	<b>0,55</b>	3,08	1,28	0,31	19,49	28,38		
31	Улица г. Воронежа (ул. Ленинградская) / city of Voronezh Street (Leningrad Str.)	1,71	0,007	0,54	<b>0,63</b>	2,61	2,86	0,97	42,86	101,64		
32	Вдоль трассы М4 (Рамонский р-н) / Along the M4 route (Ramon district)	2,04	0,007	0,56	<b>0,73</b>	4,23	2,15	1,16	37,86	81,07		
33	100 м от трассы М4 (Рамонский р-н) / 100 m from M4 Route (Ramon District)	0,75	0,008	0,42	<b>0,65</b>	4,10	1,80	0,53	21,96	59,29		
34	200 м от трассы М4 (Рамонский р-н) / 200 m from M4 Route (Ramon District)	0,54	0,008	0,12	0,43	2,61	0,72	0,26	18,51	36,64		
35	300 м от трассы М4 (Рамонский р-н) / 300 m from M4 Route (Ramon District)	0,54	0,008	0,09	0,41	2,10	0,84	0,17	18,05	32,61		
36	Вдоль трассы А144 (Аннинский р-н) / Along the А144 route (Anna district)	1,46	0,009	0,30	<b>0,54</b>	2,96	1,74	0,95	29,50	80,20		
37	100 м от трассы А144 (Аннинский р-н) / 100 m from the route А144 (Anna district)	0,81	0,009	0,20	0,42	2,88	1,65	0,72	21,87	63,86		
38	200 м от трассы А144 (Аннинский р-н) / 200 m from the route А144 (Anna district)	0,51	0,007	0,18	0,34	2,46	1,12	0,46	16,89	62,97		
39	300 м от трассы А144 (Аннинский р-н) / 300 m from the route А144 (Anna district)	0,50	0,007	0,09	0,31	2,01	0,75	0,23	15,20	60,27		
40	Вдоль трассы М4 (Павловский р-н) / Along the М4 route (Pavlovsk district)	1,84	0,007	0,40	0,42	4,42	1,41	0,83	32,94	91,48		
41	100 м от трассы М4 (Павловский р-н) / 100 m from the М4 route (Pavlovsky district)	1,04	0,007	0,32	0,41	3,64	1,05	0,61	28,29	80,49		
42	200 м от трассы М4 (Павловский р-н) / 200 m from the М4 route (Pavlovsky district)	0,54	0,007	0,23	0,31	3,05	0,84	0,49	21,05	64,18		
43	300 м от трассы М4 (Павловский р-н) / 300 m from the М4 route (Pavlovsky district)	0,38	0,007	0,12	0,24	2,36	0,91	0,25	17,84	52,85		
44	Вдоль нескоростной дороги (Богучарский р-н) / Along the non-high-speed road (Boguchar district)	0,97	0,009	0,16	0,42	1,23	0,64	0,39	18,72	39,15		
45	100 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) / 100 m from non-high-speed road (Boguchar district)	0,66	0,008	0,09	0,36	1,20	0,72	0,21	13,75	44,71		
46	200 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) / 200 m from non-high-speed road (Boguchar district)	0,68	0,007	0,03	0,31	1,13	0,54	0,32	17,80	41,59		
47	300 м от нескоростной дороги (Богучарский р-н) / 300 m from non-high-speed road (Boguchar district)	0,56	0,007	0,08	0,31	1,13	0,64	0,28	16,16	35,90		
48	Вдоль железной дороги / Along the railroad	1,32	0,009	0,28	<b>0,68</b>	4,26	0,85	0,60	42,82	69,39		
49	100 м от железной дороги / 100 m from the railroad	1,10	0,009	0,13	<b>0,59</b>	4,23	0,64	0,31	21,98	52,10		
50	200 м от железной дороги / 200 m from the railroad	0,73	0,007	0,15	0,43	2,13	0,54	0,26	18,05	52,70		
51	300 м от железной дороги / 300 m from the railroad	0,67	0,007	0,10	0,39	1,24	0,59	0,32	17,05	51,64		
Среднее содержание элемента в сырье / Average element content of raw material		0,73	0,007	0,17	0,46	2,52	1,17	0,40	22,53	49,39		
Предельно допустимая концентрация / Threshold limit value		6,0	0,1	1,0	0,5	—						



для образцов урбобиоценозов и вновь могут быть связаны с аэрозольным загрязнением надземной части растения токсичным элементом [2, 8, 11].

Концентрация остальных исследуемых элементов в лекарственном растительном сырье в настоящее время не нормируется, при этом для них описаны токсические для человека и растения свойства, и их содержание сильно варьирует в изучаемых образцах.

Минимальная концентрация никеля в лекарственном растительном сырье полыни горькой (0,72 мг/кг) отмечена для образца, собранного на территории Хоперского заповедника в Борисоглебском районе, максимальная (5,24 мг/кг) – в образце сырья, произраставшего вблизи ООО «Бормаш» в Поворинском районе. Концентрация никеля в почвах изучаемых территорий варьировала от 2,23 до 98,25 мг/кг [6]. Никель находится в почве преимущественно в виде растворимых соединений, однако накопление никеля в лекарственном растительном сырье полыни горькой можно отнести к незначительному. В больших концентрациях никель оказывает токсическое действие на растительный организм, способствует угнетению процессов фотосинтеза и транспирации. Вероятно, у полыни горькой выработался физиологический барьер к накоплению никеля в высоких концентрациях. При этом более высокие концентрации (более 4 мг/кг) элемента отмечены в образцах, произрастающих в урбобиоценозах области (вблизи химических предприятий ОАО «Минудобрения», ООО «БорМаш», вдоль и на удалении 100 м от трассы М4 и от железной дороги в Рамонском районе, вдоль трассы М4 в Рамонском районе), что, вероятно, связано со значительным вкладом аэрозольного пути загрязнения сырья [8, 11, 13].

Хром и кобальт также относятся к элементам незначительного накопления в лекарственном растительном сырье полыни горькой. Содержание хрома в анализируемых образцах варьирует от 0,58 (в образце, собранном в Хоперском заповеднике в Новохоперском районе области) до 3,98 мг/кг (в образце, собранном вблизи химического предприятия ОАО «Минудобрения»). Для образцов сырья, собранных в условиях агробиоценозов, концентрация хрома не превышает 1,52 мг/кг. Концентрация хрома в верхних слоях почв рассматриваемых территорий принимала значения от 2,53 до 45,16 мг/кг. Хром фитотоксичен, что проявляется в повреждении корней растения, а также увядании его надземной части, хлорозе молодых листьев. Вероятно, накопление данного металла блокируется растением на биохимическом уровне, что

является его эволюционно выработанным приспособлением к жизни в условиях загрязнения среды обитания [2, 8, 14].

Минимальная концентрация кобальта в анализируемом сырье (0,21 мг/кг) отмечена для образца полыни горькой, произраставшего в Грибановском районе, максимальная (1,16 мг/кг) для образца, собранного вдоль трассы М4 в Рамонском районе. Концентрация кобальта в почвах области гораздо значительнее – от 1,84 до 21,78 мг/кг [6]. В образцах контрольных территорий и агробиоценозов также отмечены более низкие уровни концентраций данного металла, чем для образцов урбанизированных территорий, что при низком уровне накопления элемента в сырье может доказывать дополнительное аэрозольное загрязнение сырья [13, 15, 16].

Полынь горькая проявляет активные накопительные способности в отношении меди и цинка. Так, концентрация меди в исследуемых образцах варьирует от 12,69 (в образце, произраставшем в Воронежском биосферном заповеднике) до 45,37 мг/кг (в образце, собранном вдоль трассы М4 в Рамонском районе) при среднем значении содержания металла в растении 22,53 мг/кг. Содержание меди в верхних слоях почв изучаемых территорий изменялось от 3,30 до 65,38 мг/кг при среднем 23,25 мг/кг [6]. В ряде (в 20 из 51) образцов сырья полыни горькой, особенно произраставших на контрольных территориях и в условиях агробиоценозов, концентрация данного элемента в сырье выше (в некоторых случаях в 2–4 раза), чем в почвах соответствующих районов. Медь – физиологически важный элемент, участвует в процессе фотосинтеза, активизирует углеводный и азотный обмен, повышает сопротивляемость растительного организма к инфекционным заболеваниям, увеличивает засухоустойчивость [5, 12, 17, 18].

Среднее содержание цинка в изученных образцах лекарственного растительного сырья полыни горькой – 49,39 мг/кг. Минимальная его концентрация (19,00 мг/кг) отмечена для образца сырья из Нижнедевицкого района, максимальная (115,36 мг/кг) – для образца, собранного вблизи химического предприятия ОАО «Минудобрения». Содержание цинка в верхних слоях почв области варьировало от 9,58 до 154,45 мг/кг при среднем значении по региону 52,69 мг/кг [6]. В трети изученных образцов (в 17 из 51) концентрация металла в сырье полыни горькой оказалась выше, чем в почве мест произрастания. Вероятно, это связано со значительной физиологической потребностью растения в данном элементе. Так, цинк активизирует более 300 ферментов, участвует в образовании хлорофилла, является составной



частью более 40 ферментов, активизирует метаболизм углеводов, протеинов, фосфатов, повышает устойчивость к патогенам, жаро- и засухоустойчивость. Для цинка, как и для меди, заметных физиологических барьеров накопления элементов из почв лекарственным растительным сырьем полыни горькой не отмечено: при повышении концентрации металла в почве содержание его в лекарственном растительном сырье также заметно увеличивалось [2, 8, 12, 18].

### Заключение

Были проанализированы свыше 50 образцов лекарственного растительного сырья полыни горькой, собранной в различных по уровню антропогенного воздействия районах Воронежской области, на предмет содержания тяжелых металлов и мышьяка. Сравнивая данные по содержанию тяжелых металлов в верхних слоях почв региона и содержание этих элементов в сырье полыни горькой, можно утверждать о наличии значительных физиологических барьеров, препятствующих накоплению экотоксикантов в растении, что особенно заметно для таких элементов, как свинец, ртуть, мышьяк, кадмий, кобальт и хром. Оказалось, полынь горькая способна избирательно концентрировать некоторые тяжелые металлы, входящие в активные центры ферментных систем (например, такие как медь и цинк). На основании этого можно предполагать, что для полыни горькой в условиях антропогенной нагрузки происходит формирование эдафотипа, формирующегося в результате действия отбора в условиях техногенного загрязнения внешней среды и проявления адаптации к этим условиям. Результаты исследований показали, что возможно значительное загрязнение данного сырья аэрозольным путем (в частности, свинцом, кадмием, никелем, хромом, кобальтом), что важно учитывать при планировании мест заготовки данного лекарственного растительного сырья и оценке его качества.

### Список литературы

1. Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П. Сравнение особенностей накопления основных токсических элементов цветками липы сердцевидной и пижмы обыкновенной // Вестник ВГУ. Сер. Химия, Биология. Фармация. 2017. № 1. С. 148–154.
2. Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П. Изучение накопления тяжелых металлов и мышьяка и оценка влияния поллютантов на содержание флавоноидов у *Polygonum aviculare* (Caryophyllales, Polygonaceae) // Вестн. Камчат. техн. гос. ун-та. 2019. № 48. С. 71–77. DOI: 10.17217/2079-0333-2019-48-71-77
3. Государственная фармакопея Российской Федерации. Изд. XIV. Т. 2. М.: ФЭМБ, 2018. 1423 с.
4. Понн Я. И., Бокова Т. И. Содержание меди в лекарственных растениях, произрастающих в поймах рек Иртыша и Оби // Вестн. Омск. гос. аграр. ун-та. 2016. № 3. С. 100–107.
5. Зайцева М. В., Кравченко А. Л., Стекольников Ю. А., Сотников В. А. Тяжелые металлы в системе почва–растение в условиях загрязнения // Учен. зап. Орл. гос. ун-та. Сер. Естественные, технические и медицинские науки. 2013. № 3. С. 190–192.
6. Дьякова Н. А. Оценка загрязнения тяжелыми металлами верхних слоев почв урбо- и агроэкосистем Центрального Черноземья // Вестн. ИРГСХА. 2019. № 95. С. 19–30.
7. Семенова И. Н., Сингизова Г. Ш., Зулкарнаев А. Б., Ильбулова Г. Ш. Влияние меди и свинца на рост и развитие растений на примере *Anethum graveolens* L. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19568> (дата обращения: 10.02.2020).
8. Немерешина О. Н., Гусев Н. Ф., Петрова Г. В., Шайхутдинова А. А. Некоторые аспекты адаптации *Polygonum aviculare* L. к загрязнению почвы тяжелыми металлами // Изв. Оренб. гос. аграр. ун-та. 2012. № 1. С. 230–234.
9. Rai A., Kulshreshtha K. Effect of particulates generated from automobile emission on some common plants // Journal of Food, Agriculture & Environment. 2006. Vol. 4. P. 253–259.
10. Шугабаева Г. Н. Тяжелые металлы в почвах некоторых районов г. Тюмени // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Экология и природопользование. 2015. № 1. С. 92–102.
11. Понн Я. И., Бокова Т. И. Содержание кадмия в лекарственных растениях, произрастающих в поймах рек Иртыша и Оби // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 3. С. 105–113.
12. Понн Я. И., Бокова Т. И. Содержание цинка, меди и кадмия в различных видах лекарственных растений, произрастающих в поймах рек Иртыша и Оби // Вестн. Новосиб. гос. аграр. ун-та. 2017. № 1. С. 84–92.
13. Austenfeld F. A. Zur Phytotoxizität von Nickel und Kobaltsalzen in Hydrokultur bei *Phaseolus vulgaris* L. // Z. Pflanzenernähr. und Bodenkunde. 1979. № 6. S. 769–777.
14. Sharma D. S., Chatterjee C., Sharma C. P. Chromium accumulation and its effects on wheat (*Triticum aestivum* L. cv. HD 2204) metabolism // Plant. Sci. 1995. № 2. P. 145–151.
15. Cataldo D. A., Wildung R. E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants // Environ Health Perspect. 1978. December, № 27. P. 149–159.
16. Buszewski B., Jastrzebska A., Kowalkowski T. Monitoring of Selected Heavy Metals Uptake by Plants and Soils in the Area of Torun // Poland Polish Journal of Environmental Studies. 2000. Vol. 9, № 6. P. 511–515.





17. Speak A. F., Rothwell J. J., Lindley S. J., Smith C. L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 61. P. 283–293.
18. Gupta G. P., Kumar B., Singh S., Kulshrestha U. C. Deposition and Impact of Urban Atmospheric Dust on Two Medicinal Plants during Different Seasons in NCR Delhi // *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. № 16. P. 2920–2932.

#### Образец для цитирования:

Дьякова Н. А. Накопление тяжелых металлов и мышьяка лекарственным растительным сырьем полыни горькой // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 445–453. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-445-453>

#### Accumulation of Heavy Metals and Arsenic by Medicinal Plant Raw Material of Bitter Hollow

N. A. Dyakova

Nina A. Dyakova, <https://orcid.org/0000-0002-0766-3881>, Voronezh State University, 1 University pl., Voronezh 394006, Russia, Ninochka\_V89@mail.ru

The Voronezh region is traditionally the most important area of crop production and farming. The purpose of the study was to study the contamination by heavy metals of medicinal vegetable raw materials of the Voronezh region using the example of grass of the bitter emery collected in urban and agro-ecological systems, which experience various anthropogenic effects. The accumulations of heavy metals (lead, mercury, cadmium, nickel, copper, zinc, cobalt, chromium) and arsenic were studied, in 51 samples of pooh grass bitter. Comparing the data on heavy metal content in the upper soil layers of the region and the content of these elements in the grass of the pollen bitter, it can be assumed that there are significant physiological barriers to the accumulation of ecotoxicants in the generative organs of the plant, which is particularly noticeable for elements such as lead, mercury, arsenic, cadmium, cobalt and chromium. Pollen bitter is able to selectively concentrate some heavy metals entering the active centers of enzyme systems (such as copper and zinc). Thus, for a moon bitter under anthropogenic load conditions, an edaphotype is formed, which is formed as a result of the action of selection in conditions of man-made pollution of the external environment and is a manifestation of adaptation to these conditions. The results of the studies showed that the grass of the bitter emery is able to accumulate toxic elements from the soil, which is important in planning the places of production of medicinal vegetable raw materials and assessing their quality.

**Keywords:** Voronezh region, wormwood bitter, lead, mercury, cadmium, nickel, copper, zinc, cobalt, chrome.

Received: 29.04.2020 / Accepted: 08.05.2020 / Published: 30.11.2020

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

#### References

1. Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P. Comparison of features of accumulation of the basic toxic elements flowers of a linden heart-shaped and tansies ordinary. *VSU Bulletin. Ser. Chemistry, Biology, Pharmacy*, 2017, no. 1, pp. 148–154 (in Russian).
2. Dyakova N. A., Slivkin A. I., Gaponov S. P. Study of accumulation of heavy metals and arsenic and assessment of the influence of pollutants on the content of flavonoids in *Polygonum aviculare* (Caryophyllales, Polygonaceae). *Journal of Kamchatka Technical State University*, 2019, no. 48, pp. 71–77 (in Russian). DOI: 10.17217/2079-0333-2019-48-71-77
3. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii* [State pharmacopeia of the Russian Federation, ed. XIV]. Moscow, FEMB Publ., 2018, vol. 2. 1423 p. (in Russian).
4. Popp Y. I., Bokova T. I. Copper content in medicinal plants growing in the catches of the rivers Irtysh and Obi. *Bulletin of the Omsk State Agrarian University*, 2016, no. 3, pp. 100–107 (in Russian).
5. Zaytseva M. V., Kravchenko A. L., Stekol'nikov Y. A., Sotnikov V. A. Heavy metals in a system the soil plant in the conditions of pollution. *Scientists Notes of Oryol State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences*, 2013, no. 3, pp. 190–192 (in Russian).
6. Dyakova N. A. Assessment of contamination by heavy metals of upper soil layers of urban and agro-ecosystems of the Central Black Earth. *Journal of the Irkutsk State Agricultural Academy*, 2019, no. 95, pp. 19–30 (in Russian).
7. Semenova I. N., Singizova G. S., Zulkaranaev A. B., Il'bulova G. S. Effects of copper and lead on plant growth and development as exemplified by *Anethum graveolens* L. *Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 3. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19568> (accessed 10 February 2020) (in Russian).
8. Nemereshina O. N., Gusev N. F., Petrova G. V., Shajhutdinova A. A. Some aspects of adaptation of *Polygonum aviculare* L. to pollution of the soil heavy metals. *News of the Orenburg State Agrarian University*, 2012, no. 1, pp. 230–234 (in Russian).
9. Rai A., Kulshreshtha K. Effect of particulates generated from automobile emission on some common plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2006, vol. 4, pp. 253–259.
10. Shigabayeva G. N. Heavy metals in soils of some districts of Tyumen. *Bulletin of the Tyumen State University. Ecology and environmental management*, 2015, no. 1 (2), pp. 92–102 (in Russian).
11. Popp Y. I., Bokova T. I. Cadmium content in medicinal plants growing in the catches of the rivers Irtysh and



- Obi. *Journal of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2017, no. 3, pp. 105–113 (in Russian).
12. Popp Y. I., Bokova T. I. Content of zinc, copper and cadmium in various types of medicinal plants growing in the catches of the rivers Irtysh and Obi. *Journal of Novosibirsk State Agrarian University*, 2017, no. 1, pp. 84–92 (in Russian).
  13. Austenfeld F. A. Zur Phytotoxizität von Nickel und Kobaltsalzen in Hydrokultur bei *Phaseolum vulgare* L. *Z. Pflanzenernähr. und Bodenkunde*, 1979, no. 6, pp. 769–777.
  14. Sharma D. S., Chatterjee C., Sharma C. P. Chromium accumulation and its effects on wheat (*Triticum aestivum* L. cv. HD 2204) metabolism. *Plant. Sci.*, 1995, no. 2, pp. 145–151.
  15. Cataldo D. A., Wildung R. E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Environ Health Perspect*, 1978, December, no. 27, pp. 149–159.
  16. Buszewski B., Jastrzebska A., Kowalkowski T. Monitoring of Selected Heavy Metals Uptake by Plants and Soils in the Area of Torun. *Poland Polish Journal of Environmental Studies*, 2000, vol. 9, no. 6, pp. 511–515.
  17. Speak A. F., Rothwell J. J., Lindley S. J., Smith C. L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*, 2012, vol. 61, pp. 283–293.
  18. Gupta G. P., Kumar B., Singh S., Kulshrestha U. C. Deposition and Impact of Urban Atmospheric Dust on Two Medicinal Plants during Different Seasons in NCR Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, no. 16, pp. 2920–2932.

---

**Cite this article as:**

Dyakova N. A. Accumulation of Heavy Metals and Arsenic by Medicinal Plant Raw Material of Bitter Hollow. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 445–453 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-445-453>

---



УДК 581.526.33(470.42)

## Растительность болота Брехово (Ульяновская область). Рекомендации по режиму охраны и использования



И. В. Благовещенский

Благовещенский Иван Викторович, доктор биологических наук, профессор кафедры биологии, экологии и природопользования экологического факультета, Ульяновский государственный университет, globularia@mail.ru

Болото Брехово – памятник природы Ульяновской области, является стратиграфическим эталоном голоцена, местом произрастания редких и лекарственных видов растений, имеет значительные запасы ценного природного ресурса – торфа. В настоящее время подвергается воздействию ряда антропогенных факторов, что вызывает опасение за сохранность его природных комплексов. В основу статьи положены описания пробных площадей (всего 96 описаний). Полевые геоботанические исследования (описания площадей и геоботаническое картографирование) проводились по общепринятым методикам. Для классификации растительности был применён эколого-флористический подход Браун-Бланке. Установлено, что растительность болота Брехово представлена 10 ассоциациями: *Salicetum pentandro-cinereae* Passarge 1961; *Phragmitetum communis* (Gams 1927) Schmale 1939; *Caricetum ripariae* Máthé et Kovács 1959; *Caricetum atheroidis* (Prokopyev 1990) Taran 1995; *Carici cespitosae-Deschampsietum cespitosae* Mirkin in Denisova et al. 1986; *Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae* Mirkin ex Grigorjev et al. 2002; *Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae* Grigorjev et al. 2002; *Caricetum acutiformis* Eggler 1933; *Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae* Bal.-Tul. 1978. Коренная растительность сохранилась лишь на части территории болота Брехово, многие растительные сообщества имеют вторичный характер, в связи с чем синтаксономическая структура весьма разнообразна. В ряде сообществ значительны ресурсы ценных лекарственных растений.

**Ключевые слова:** болота, синтаксономия, ассоциация, *Salix cinerea*, *Phragmites australis*, *Carex riparia*, *Deschampsia cespitosa*, *Inula helenium*, *Carex cespitosa*, *Carex acutiformis*, *Filipendula ulmaria*, *Alopecurus arundinaceus*, *Urtica dioica*, Ульяновская область.

Поступила в редакцию: 25.03.2020 / Принята: 06.04.2020 /  
Опубликована: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-454-464>

### Введение

Болото Брехово одно из крупнейших в Ульяновской области (112 га) и самое крупное в её правобережной части. Решением Ульяновского облисполкома № 373 от 19 мая 1976 г. это болото было утверждено заказником лекарственных растений, в дальнейшем оно получило статус памятника природы областного значения (постановление Зак. Собрания Ульяновской области № 30/333 от 27.11.1997 г.).

Задачи исследования: 1) осветить историю исследования растительности, флоры и торфяной залежи болота Брехово; 2) установить синтаксономическую структуру растительности; 3) составить карту-схему растительности болота Брехово; 4) охарактеризовать современное состояние растительности болота Брехово, выявить основные угрозы для экосистемы болота и дать рекомендации по совершенствованию охранного режима.

### Материалы и методы

В основу статьи положены описания пробных площадей, выполненные автором в разные годы, начиная с 1987 (всего 96 описаний и 21 геоботанический профиль). Описания пробных площадей, флористические исследования и геоботаническое картографирование выполнены по общепринятым методикам [1]. Для классификации растительности был применён эколого-флористический подход Браун-Бланке. Латинские названия сосудистых растений даны по С. К. Черепанову [2], мхов – по М. С. Игнатову и др. [3].

### История изучения растительности и флоры болота Брехово

Первые данные о растительности болота Брехова мы находим в работе А. П. Шенникова [4], относящейся еще к 1924 г., где этот автор отмечает (4, с. 48): «... Против с. Ишеевки, вдоль левого делювиального берега долины находится большое Брехово болото, заросшее ивняком, берёзой и тростником, и никак не используемое. Делювиальная терраса ограничивается здесь крутым задернелым (лугохвостным) склоном, т. ч. на лицо резкое отчленение долины от делювиальной террасы; это сохраняет приматериковое Брехово болото от занесения делювием. У подножья делювиальной террасы болото окаймлено узким осоково-злаковым поясом из сплошной густой заросли *Carex distycha*, *vesicaria*, *caespitosa*, *distans*, *gracilis* (= *Carex acuta* L.), *heleonastes*, *Agrostis alba*, *Poa trivialis*, *Alopecurus ruthenicus* (= *A. arundinaceus* Poit.) и др. Между Бреховым болотом и руслом Свяги широко распространены сообщества лугов приматериковой зоны. При беглом осмотре удалось отметить лишь луга с



чемерицей и горлецом ...». Некоторые сведения о растительности, флоре и торфяной залежи имеются в торфяных фондах [5, 6]. В фондах ГАУО [7] имеются сведения о растительности Брехова болота в материалах торфоустроительных организаций за 1932–1935 гг. в связи проводимыми разведочными работами на торф.

Более полные данные о флоре и растительности болота Брехово приведены в работе В. П. Пискунова [8]. Автором охарактеризована растительность с позиций доминантной классификации и приведена небольшая карта-схема растительности (масштаб 1: 27 600), где указано распространение сообществ основных ассоциаций. Всего было выделено девять ассоциаций. Флора болота, по данным автора, включала 42 вида сосудистых растений. Здесь же автором показана история освоения болота, начиная с 1908 г. В статье И. В. Благовещенского [9] болото Брехово упоминается в связи с его научной и ресурсной ценностью.

Детальное изучение растительности и флоры болота Брехово было проведено И. В. Благовещенским в 1987–1989 гг. по заданию Ульяновского областного совета общества охраны природы с целью обоснования режима рационального использования и охраны этого природного объекта. Итогом работы был отчёт: Благовещенский И. В. Болото «Брехово». Материалы геоботанических и флористических исследований, рекомендации по режиму охраны. Ульяновск, 1989. 49 с. Автором была выполнена крупномасштабная геоботаническая карта (масштаб 1:5000) и детально охарактеризована растительность с позиций доминантной классификации, приведены таблицы с геоботаническими описаниями. Описанные фитоценозы были отнесены к 41 ассоциации и 9 формациям. Здесь же была дана карта «Охрана и рациональное использование болота Брехово. Распространение лекарственных растений» и приведён флористический список, включающий 175 видов. Из них 130 видов ранее для Брехова болота не указывались, в том числе редкие для области *Althaea officinalis* L., *Salix rosmarinifolia* L., *Carex atheroides* Spreng. Материалы отчёта были позднее дополнены и использованы в диссертационной работе автора 2006 г. [10] и небольшая их часть была опубликована [11, 12].

Имеется ряд публикаций Н. В. Благовещенской [13, 14 и др.], касающихся строения торфяной залежи Брехова болота, а также истории растительности северо-восточного природного и палинологического района центральной части Приволжской возвышенности по данным спорово-пыльцевого анализа торфа.

## Результаты и их обсуждение

Болото Брехово находится в 1,5 км к западу от р.п. Ишеевка Ульяновского района Ульяновской области. Оно располагается в левобережной пойме р. Свияги. С южной, юго-западной и северо-западной сторон болото окружает надпойменная терраса высотой 8–10 м. С востока и северо-востока к болоту примыкает прибрежная часть поймы Свияги, слегка приподнятая по сравнению с восточной частью болота. Площадь болота 112 га [6], протяжённость с юга на север 1600 м, с запада на восток – 1000 м, с юго-востока на северо-запад – 1900 м. Болото имеет общий уклон поверхности с запада на восток 2–3,8 м.

В водном питании Брехова болота участвуют грунтовые воды (поступают со стороны надпойменной террасы), в меньшей степени делювиальные и атмосферные осадки. Паводковые воды болото не заливают, так как прибрежная часть поймы приподнята над поверхностью торфяника [8]. Торфяная залежь имеет максимальную мощность 5,5 м, среднюю – 2,96 м [6], относится к низинному типу, лесотопяному подтипу, древесно-тростниковому виду [13, 14]. Подстиляется торф глинами и гумусированными суглинками. Датировка нижних слоёв торфа в юго-западной части болота на глубине 4.65–4,8 м – 8170±130 лет, т. е. возраст болота – предбореальный [13, 14]. Это самое древнее болото из всех изученных на территории Ульяновской области.

## Современная растительность болота Брехово

При изучении растительности болота Брехово в качестве основной задачи рассматривалось составление крупномасштабной геоботанической карты (рисунок). Последняя даёт возможность провести всесторонний анализ растительности и разработать оптимальный режим охраны для отдельных участков болота. Выделы на карте в основном устанавливались по доминантным критериям, поскольку в подобных случаях более удобно использовать доминанты, смена которых даёт более четкие границы, и сообщества с ними обычно хорошо «читаются» на аэрофотоснимках. В то же время в пояснении к карте, представленном в виде таблицы, выделы на карте, полученные на основе безранговых единиц доминантной системы, дополнялись синтаксонами эколого-флористической классификации Браун-Бланке. В рамках этой системы ниже дана характеристика растительности болота.





Карта-схема растительности болота Брехово Ульяновского района Ульяновской области  
Map-scheme of vegetation of the swamp Brekhovo, Ulyanovsk district, Ulyanovsk region



**Пояснение к карте-схеме растительности болота Брехово Ульяновского района Ульяновской области**  
**Explanation of Figure Map-scheme of vegetation of the swamp Brekhovo, Ulyanovsk district, Ulyanovsk region**

№	Сообщество (по доминантам) / Community (by dominant)	Синтаксоны эколого-флористической / классификации Syntaxons of ecological-floristic classification
1	<i>Salix cinerea</i>	Acc. / Ass. <i>Salicetum pentandro-cinereae</i>
2	<i>Salix rosmarinifolia</i>	
Сообщества с доминированием длиннокорневищных осок / Communities dominated by long-rhizome sedges		
3	<i>Carex acutiformis</i>	Acc. / Ass. <i>Caricetum acutiformis</i>
	<i>Carex acutiformis</i> + <i>Angelica archangelica</i>	
	<i>Carex riparia</i>	Acc. / Ass. <i>Caricetum ripariae</i>
	<i>Carex riparia</i> + <i>C. acutiformis</i>	
Осоковые сообщества с девясилом высоким / Sedge communities with elecampane high		
4	<i>Carex acutiformis</i> + <i>Inula helenium</i>	Acc. / Ass. <i>Caricetum acutiformis</i>
5	<i>Carex riparia</i> + <i>Deschampsia cespitosa</i>	Acc. / Ass. <i>Caricetum ripariae</i>
Сообщества с доминированием тростника / Reed-dominated communities		
6	<i>Phragmites australis</i>	Acc. / Ass. <i>Phragmitetum communis</i>
		Acc. / Ass. <i>Caricetum acutiformis</i>
		Acc. / Ass. <i>Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae</i>
		Acc. / Ass. <i>Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae</i>
7	То же с фрагментами сообществ из / Same thing with community fragments from <i>Salix cinerea</i>	То же с фрагментами ассоциации из / Same thing with community fragments from <i>Salicetum pentandro-cinereae</i>
Тростниково-разнотравные сообщества / Reed-grass communities		
8	<i>Phragmites australis</i> + <i>Eupatorium cannabinum</i> + <i>Senecio fluviatilis</i> + <i>Sonchus palustris</i>	Acc. / Ass. <i>Phragmitetum communis</i>
Тростниково-осоковые сообщества / Reed-sedge communities		
9	<i>Phragmites australis</i> + <i>Carex acutiformis</i> ; <i>Phragmites australis</i> + <i>Carex cespitosa</i> + <i>Urtica dioica</i> ; <i>Phragmites australis</i> + <i>Urtica dioica</i> + <i>Filipendula ulmaria</i>	Acc. / Ass. <i>Caricetum acutiformis</i>
		Acc. / Ass. <i>Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae</i>
		Acc. / Ass. <i>Urtico-Filipenduletum</i>
Сообщества с осокой дернистой /		
10	<i>Carex cespitosa</i>	Acc. / Ass. <i>Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae</i>
11	Сообщества из / Communities from <i>Carex cespitosa</i> с фрагментами сообществ из / with community fragments from <i>Salix cinerea</i>	Acc. / Ass. <i>Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae</i> с фрагментами сообществ acc. / with community fragments from ass. <i>Salicetum pentandro-cinereae</i>
Осоково-злаковые сообщества / Sedge-cereal communities		
12	<i>Carex cespitosa</i> + <i>Calamagrostis epigeios</i> ; <i>Carex cespitosa</i> + <i>Molinia caerulea</i>	Acc. / Ass. <i>Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae</i>
13	Осоково-злаковые сообщества /Sedge-cereal communities ( <i>Carex cespitosa</i> + <i>Alopecurus</i> <i>arundinaceus</i> ) с фрагментами сообществ из / with community fragments from <i>Salix cinerea</i>	Acc. / Ass. <i>Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae</i> с фрагментами сообществ acc. / with community fragments ass. <i>Salicetum pentandro-cinereae</i>
Сообщества с доминированием крапивы / Nettle-dominated communities		
14	<i>Urtica dioica</i> + <i>Alopecurus arundinaceus</i> ; <i>Urtica dioica</i> + <i>Phragmites australis</i>	Acc. / Ass. <i>Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae</i>
		Acc. / Ass. <i>Urtico-Filipenduletum</i>
Тростниково-крапивно-лобазниковые сообщества / Reed-nettle-grassland communities		
15	<i>Phragmites australis</i> + <i>Urtica dioica</i> + <i>Filipendula ulmaria</i>	Acc. / Ass. <i>Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae</i>



Окончание таблицы / End of the table

№	Сообщество (по доминантам) / Community (by dominant)	Синтаксоны эколого-флористической / классификации Syntaxons of ecological-floristic classification
Тростниково-крапивные сообщества с фрагментами сообществ из ивы пепельной /		
16	Phragmites australis + Urtica dioica; Phragmites australis + Carex cespitosa + Urtica dioica; Phragmites australis + Carex cespitosa; Phragmites australis + Carex acutiformis + Urtica dioica; Salix cinerea	Ассоциации: / Associations: Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae; Urtico-Filipenduletum; Caricetum acutiformis; Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae с фрагментами сообществ асс. / with community fragments ass. Salicetum pentandro-cinereae
Злаково-крапивные сообщества / Grass-nettle communities		
17	Calamagrostis epigeios + Phragmites australis + Urtica dioica	Асс. / Ass. Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae
Сообщества с доминированием злаков / Communities dominated by cereals		
18	Deschampsia cespitosa + Alopecurus arundinaceus + Rumex confertus	Асс. / Ass. Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae
	Alopecurus arundinaceus	Асс. / Ass. Alopecuretum arundinacei
	Alopecurus arundinaceus + Phragmites australis	Асс. / Ass. Alopecuretum arundinacei
	Calamagrostis epigeios	Асс. / Ass. Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae
	Calamagrostis epigeios+Urtica dioica + Deschampsia cespitosa	Асс. / Ass. Urtico-Filipenduletum
Сообщества из злаков и девясила высокого / Communities of cereals and elecampane high		
19	Calamagrostis epigeios+Inula helenium	–
	Deschampsia cespitosa+Inula helenium+Rumex confertus	Асс. / Ass. Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae
	Alopecurus arundinaceus+Urtica dioica+Inula helenium	Асс. / Ass. Alopecuretum arundinacei
	Alopecurus arundinaceus + Filipendula ulmaria + Inula helenium	
Сообщества с доминированием злаков и фрагментами сообществ из / Communities dominated by cereals and community fragments from <i>Salix cinerea</i>		
20	Molinia caerulea+Calamagrostis epigeios+Urtica dioica+Filipendula ulmaria	Асс. / Ass. Urtico-Filipenduletum
	Molinia caerulea+Calamagrostis epigeios+ Phragmites australis+Filipendula ulmaria	
	Calamagrostis epigeios+Phragmites australis + Carex cespitosa	Асс. / Ass. Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae
	Salix cinerea	Фрагменты сообществ асс. / Fragments of communities ass. Salicetum pentandro-cinereae
Сообщества заболоченного луга с пастбищным режимом / Pasture wetland communities		
21	Deschampsia cespitosa	Асс. / Ass. Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae
	Alopecurus arundinaceus	Асс. / Ass. Alopecuretum arundinacei
22	Кустарниковые сообщества на суходоле вокруг болота / Shrub communities on dry land around the swamp	
23	Сообщества с уровнем воды выше поверхности торфа или минерального субстрата / Communities with a water level above the surface of a peat or mineral substrate	
24	Растительность остепненных склонов / Vegetation of steppe slopes	
25	Дороги / Roads	
26	Овраг / Ravine	
27	Осушительные канавы / Drainage ditches	
28	Река Свяга / Sviyaga River	



**Продромус синтаксонов растительности  
болота Брехово**

**Класс Alnetea glutinosae Br.-Bl. et R. Tx. ex  
Westhoff et al. 1946**

Порядок Alnetalia glutinosae Tx. 1937

Союз Alnion glutinosae Müller et Görs 1958

Acc. Salicetum pentandro-cinereae Passarge  
1961

**Класс Phragmiti-Magnocaricetea Klika in  
Klika et Novák 1941**

Порядок Phragmitetalia communis Koch 1926

Союз Phragmition communis Koch 1926

Acc. Phragmitetum communis (Gams 1927)  
Schmale 1939

Порядок Magnocaricetalia Pignatti 1953

Союз Magnocaricion elatae Koch 1926

Acc. Caricetum atheroidis (Prokopyev 1990)  
Taran 1995

Acc. Caricetum ripariae Máthé et Kovács 1959

Acc. Caricetum acutiformis Eggler 1933

**Класс Molinio-Arrhenatheretea R. Tx. 1937**

Порядок Molinietales Koch 1926

Союз Alopecurion arundinacei Kononov 1986

Acc. Alopecuretum arundinacei Mirk. et al. 1985

Союз Deschampsion cespitosae Horvatić 1930

Acc. Carici cespitosae-Deschampsietum cespito-  
sae

Mirkin in Denisova et al. 1986

Acc. Carici vulpinae-Deschampsietum cespito-  
sae

Mirkin ex Grigorjev et al. 2002

Союз Calthion R. Tx. 1937

Acc. Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae  
Grigorjev et al. 2002

Acc. Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ul-  
mariae Bal.-Tul. 1978

**Класс Galio-Urticetea Passarge ex Kopecký  
1969**

Порядок Convolvuletalia sepium R. Tx. ex Mu-  
cina 1993

Союз Senecionion fluviatilis R. Tx. ex Moor 1958

Acc. Urtico dioicae-Filipenduletum ulmariae  
Klotz et Köck 1986

Современная растительность Брехова болота имеет весьма пёстрый характер (см. рисунок). Наиболее распространёнными являются сообщества из ивы пепельной, тростника южного, вейника наземного, осоки заострённой, о. дернистой и крапивы двудомной. Господствующими на болоте являются сообщества с доминированием *Salix cinerea* L., именно они придают болоту современный облик. По-видимому, растительные сообщества из ивы пепельной в большинстве случаев связаны с теми участками болота, где ранее разрабатывался торф и вблизи дренажных

каналов. Её появление на таких участках связано с тем, что снятие верхнего 0,5–1,5 м слоя торфа вызвало близкое к поверхности залегание грунтовых вод. Крупный ивовый массив располагается в западной части болота, ближе к его южной окраине. Сомкнутость ив здесь составляет 40–100%. Местами сплошной покров из кустарника прерывается небольшими полянками из болотного разнотравья и тростника. Довольно крупный массив из ивы пепельной наблюдается в северо-западной части болота. Примечательно, что куртины ив, первоначально возникнув на увлажненном участке, в дальнейшем разрастаются и завоевывают новые, менее увлажненные территории. Очень крупный массив из ивы пепельной имеется в южной половине центральной части болота. Здесь очень велика обводненность (глубина вода более 1 м) вследствие общего понижения поверхности болота с запада на восток и, вероятно, проводимыми ранее торфоразработками. Небольшие по площади сообщества из ив разбросаны и по остальной площади болота. Все разнообразие сообществ с ивой пепельной можно отнести к одной ассоциации системы Браун-Бланке, описанной ниже.

**Ассоциация Salicetum pentandro-cinereae  
Passarge 1961**

**Диагностический вид:** *Salix cinerea* L.

**Структура.** Средняя высота кустарникового яруса из ивы пепельной 2–4 м, покрытие 0,2–0,7. В кустарниковом ярусе кроме *Salix cinerea* могут в небольшом количестве встречаться *S. starkeana* Willd., *S. triandra* L., ещё реже *S. pentandra* L. и *S. viminalis* L., высота последней достигает 6 м. Иногда встречается *B. pubescens* Ehrh. (до 7 м). Особенности травяного яруса позволяют отнести эти сообщества к субассоциации lysimachietosum vulgaris Voč in Voč et Smagin 1993 (диагностические виды: *Lysimachia vulgaris* L., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Carex cespitosa* L.). Характер травостоя зависит от уровня стояния воды. При уровне грунтовых вод (УГВ) ниже поверхности в травяном ярусе постоянно и обильно встречаются *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Calystegia sepium* (L.) R.Br., *Urtica dioica* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., реже *Eupatorium cannabinum* L., *Cirsium canum* (L.) All., *Inula helenium* L., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth (последний при УГВ –10 – –15 см). При большей обводнённости (УГВ – 0 + 10) встречаются *Carex acutiformis* Ehrh., *Lysimachia vulgaris* L., *Symphytum officinale* L. При высокой обводнённости (УГВ более 0) травяной ярус развит намного слабее и видовое разнообразие ниже.





Сообщества из *Salix rosmarinifolia* L. встречаются небольшими участками в юго-западной и северо-западной частях болота, физиономически резко отличаются от предыдущих небольшой высотой кустарникового яруса (до 1 м). Эти сообщества фактически имеют одноярусное строение, так как высота кустарникового яруса из *Salix rosmarinifolia* не превышает высоту доминирующих трав. Покрытие ивы розмаринолистной 30–40%, всегда некоторое участие принимает ива пепельная, но с незначительным покрытием (иногда до 30%) и редко берёза пушистая. Из трав доминируют *Phragmites australis* (до 50%), *Thelypteris palustris* Schott (до 60%), *Calamagrostis epigeios* (до 15%), с меньшим покрытием встречаются *Carex cespitosa*, *Cirsium canum* (L.) All., *Filipendula ulmaria*, *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria* L., *Molinia caerulea* (L.) Moench. УГВ – 0+15. Синтаксономический статус сообществ с *Salix rosmarinifolia* не вполне ясен и требует уточнения, обычно их относят к ассоциации *Salicetum pentandro-cinereae* Passarge 1961 (*Frangulo-Salicetum cinereae* Malcuit 1929). Не менее широко распространены на Бреховом болоте сообщества с тростником южным. Он входит в состав сообществ нескольких ассоциаций, но более характерен для ассоциации, описанной ниже.

**Ассоциация *Phragmitetum communis*  
(Gams 1927) Schmale 1939**

**Характерный вид:** *Phragmites australis*.

**Структура.** Тростник южный может выступать доминантом при УГВ от –50 до +40. Образует один хорошо развитый ярус, его высота 1,5–2,5 м, покрытие 40–90%. В обильно увлажнённых участках (УГВ +30+40) тростник образует моnodоминантные сообщества (последние лучше всего выражены в центральной части болота, где тянутся сплошной полосой вдоль восточной дренажной канавы). Встречаются лишь *Lemna minor* L., *L. trisulca* L., единично *Scirpus lacustris* L. На менее увлажнённых участках (УГВ+15) развиты *Thelypteris palustris* (40%), *Typha latifolia* L. (30%), менее обильно встречаются *Carex diandra* Schrank., *Cicuta virosa* L., *Scirpus lacustris*, *Lythrum salicaria* L. Местами развиты бриевые мхи (10%), преимущественно *Drepanocladus aduncus* (Hedw.) Warnst..

При ещё меньшем увлажнении (УГВ +5 – –50) в качестве содоминантов выступают *Filipendula ulmaria* (25–60%), *Urtica dioica* (до 50%), обычна *Calystegia sepium* (до 30%), в виде примеси встречаются *Carex cespitosa*, *Epilobium palustre* L., *Lycopus europaeus* L., *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria*, *Sonchus palustris* L., *Symphytum officinale*, *Angelica archangelica* L.,

*Cirsium canum* (L.) All., *Eupatorium cannabinum* L., *Galium aparine* L., *Inula helenium* L., *Senecio fluviatilis* Wallr., *Parnassia palustris* L. Моховой ярус практически отсутствует, лишь местами *Drepanocladus aduncus* (до 10%). Рассеяно встречаются *Salix cinerea* и *S. rosmarinifolia*. Эти сообщества обычно встречаются фрагментами среди сообществ из ивы пепельной на участках, где ранее разрабатывался торф.

**Ассоциация *Caricetum atheroidis*  
(Prokorpjev 1990) Taran 1995**

Сообщества ассоциации были однажды отмечены на территории Брехова болота, где занимали довольно значительную площадь. Это моновидовые заросли *Carex atheroides* Spreng., кое-где с примесью *C. riparia* Curt., на поверхности воды спорадически встречается *Lemna minor*. Уровень воды выше поверхности на 0,5 м.

**Ассоциация *Caricetum ripariae*  
Máthé et Kovács 1959**

**Характерный вид:** *Carex riparia*.

**Структура.** Сообщества ассоциации имеют один ярус, образованный *Carex riparia*, его высота 0,7–0,9 м, покрытие в среднем 60–80%. В отдельных сообществах в качестве содоминантов выступают *Carex acuta* L. (до 40%), *C. acutiformis* Ehrh. (до 50%), *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. (до 50%). Ярус болотного разнотравья выражен слабо, постоянно, но в небольшом обилии встречается *Lythrum salicaria*, изредка присутствуют *Equisetum fluviatile* L., *Carex vesicaria*, *C. atheroides* Spreng., *Alopecurus arundinaceus* Poir., *Scirpus sylvaticus*, *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv., *Angelica archangelica* L., *A. palustris* (Boiss.) Hoffm., *Lysimachia vulgaris*, *Alisma plantago-aquatica* L., *Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray, *P. lapatifolia* (L.) S. F. Gray и др. Моховой и кустарниковый ярус отсутствуют. Микрорельеф ровный, редко кочковатый (при наличии *Deschampsia cespitosa*). Уровень воды от –5 до +60, но чаще располагается выше поверхности субстрата. Торфяная залежь отсутствует. Наибольшее распространение сообщества ассоциации имеют в восточной части болота, где тянутся сплошной полосой вдоль восточной дренажной канавы.

Сообщества из щучки дернистой, лисохвоста тростниковидного, вейника наземного, крапивы, лобазника вязолистного и осок дернистой и заострённой, рассмотренные ниже, распространены главным образом на осушенных территориях, не затронутых торфоразработками или на участках, переходных к сообществам мезофитных лугов в пойме р. Свяга. На невыработанных участках грунтовые воды залегают достаточно глубоко (УГВ –30 –60 см). Тем не менее, эта раститель-



ность так же вторична – возникла в результате осушения болота, проведённого в 20–30-е гг. Вероятно, до осушения на этих участках господствовали более гидрофильные сообщества – тростниковые, осоковые и другие.

#### **Ассоциация *Caricetum acutiformis* Egger 1933**

**Диагностические виды:** *Carex acutiformis*, *Filipendula ulmaria*.

**Структура.** Сообщества ассоциации обычно одноярусные, высотой 0,6–0,8 м, покрытие в среднем 50–80%. Доминирует *Carex acutiformis*, с высоким постоянством, но обычно с небольшим покрытием (5–10%) встречаются *Filipendula ulmaria* и *Lythrum salicaria*. С меньшим постоянством встречаются *Symphytum officinale* (3–10%), *Angelica archangelica* (5–40%), *Urtica dioica* (5–15%), *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Cirsium canum*, *Galium aparine*, *Eupatorium cannabinum*, *Phragmites australis*. Последний вид иногда образует отдельный ярус. Кустарниковый ярус обычно не выражен, моховой ярус отсутствует. Уровень воды обычно ниже поверхности, в среднем –30 см, иногда до –1 м. Мощность торфяной залежи от 0,5 до 5 м.

Сообщества ассоциации приурочены в основном к малоувлажненным участкам (чаще там, где сохранился верхний слой торфа после торфоразработок), они широко распространены на болоте Брехово, однако в целом для Ульяновской области являются довольно редкими. В составе этих сообществ встречаются ценные лекарственные растения *Inula helenium* и *Valeriana officinalis*.

#### **Ассоциация *Alopecuretum arundinacei* Mirk. et al. 1985**

**Характерный вид:** *Alopecurus arundinaceus*.

**Структура.** Сообщества ассоциации имеют один ярус (0,7–0,8 м), образованный преимущественно *Alopecurus arundinaceus*, его покрытие 30–80%. В некоторых сообществах в качестве содоминанта выступает *Deschampsia cespitosa* (до 30%). С высоким постоянством, но в небольшом обилии встречаются *Lythrum salicaria* и *Symphytum officinale*. Спорадически встречаются *Filipendula ulmaria*, *Galium aparine* L., *Potentilla anserina* L., *Ptarmica cartilaginea* (Ledeb. ex Reichenb.) Ledeb., *Scirpus lacustris*, *Thalictrum flavum* L., *Epilobium hirsutum* L. и др. В некоторых сообществах развит ярус тростника. Моховой и кустарниковый яруса отсутствуют. Уровень воды от +5 до –10 см.

Микрорельеф ровный, редко кочковатый (при наличии щучки). Сообщества распространены в центральной части болота (между магистральных дренажных каналов), на выработанных участках, в виде полос, вытянутых с севера на юг.

#### **Ассоциация *Carici cespitosae-Deschampsietum cespitosae* Mirkin in Denisova et al. 1986**

**Диагностические виды:** *Deschampsia cespitosa*, *Equisetum fluviatile*, *Carex riparia*.

**Структура.** Сообщества ассоциации обычно одноярусные, образованы преимущественно *Deschampsia cespitosa* (высота 0,5–0,8 м, покрытие 20–30%). В качестве содоминанта может выступать *Scirpus sylvaticus* (25–50%). Иногда имеется второй ярус, образованный *Phragmites australis* (25%) или *Angelica archangelica* (50%). Спорадически встречаются – *Carex riparia*, *Poa palustris* L., *Urtica dioica*, *Carduus crispus* L. и др.

Микрорельеф кочковатый, кочки образованы *Deschampsia cespitosa*, ими покрыто 20–30% площади, уровень воды обычно располагается ниже поверхности (межкочий): –12 – –20 см.

От ассоциации *Carici vulpinae-Deschampsietum*, описанной ниже, данная ассоциация отличается наличием влаголюбивых видов порядка *Magnocaricetalia*: *Equisetum fluviatile*, *Carex riparia*, *Galium palustre*, *Poa palustris*.

#### **Ассоциация *Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae* Mirkin ex Grigorjev et al. 2002**

**Диагностические виды:** *Deschampsia cespitosa*, *Potentilla anserina*, *Inula helenium*, *Symphytum officinale*.

**Структура.** Сообщества ассоциации обычно одноярусные, образованные главным образом *Deschampsia cespitosa* (высота 0,5–0,7 м, покрытие 30–90%). В ряде случаев развит ярус из *Inula helenium* (1,5–2 м). Девясил встречается с высоким постоянством, его покрытие достигает 55%. С высоким постоянством также встречаются: *Potentilla anserina* (иногда образует довольно хорошо выраженный нижний ярус, до 30%), *Symphytum officinale*, *Rumex confertus*. В качестве содоминантов могут выступать *Festuca pratensis*, *Urtica dioica*, *Phragmites australis*.

Микрорельеф кочковатый, кочки образованы *Deschampsia cespitosa*, ими занято от 30 до 95% площади. Фитоценозы данной ассоциации занимают менее увлажненные местообитания по сравнению с описанными выше. Уровень воды обычно располагается ниже поверхности (межкочий): от +5 до –70 см, в среднем –50 см.

Сообщества этой и предыдущей ассоциаций распространены преимущественно в северо-восточной части болота и по сути являются заболоченным лугом, постепенно переходящим в мезофитный луг. Приурочены к наиболее сухим участкам болота.



### Ассоциация *Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae* Grigorjev et al. 2002

**Диагностические виды:** *Carex cespitosa*, *Cirsium canum*, *Valeriana officinalis*, *Angelica palustris*.

**Структура.** Сообщества ассоциации обычно имеют двухъярусное строение. Нижний ярус образован преимущественно *Carex cespitosa*, его высота 0,6–0,9 м, покрытие в среднем 50–60%, иногда до 100%. В отдельных сообществах доминируют *Carex acutiformis* (10–50%), *C. riparia* (до 30%), *Urtica dioica* (30–90%). С высоким постоянством встречается *Filipendula ulmaria* (покрытие 5–50%) и *Lythrum salicaria*. В большинстве сообществ в той или иной степени выражен ярус *Phragmites australis* (10–90%). Спорадически встречаются – *Alopecurus arundinaceus*, *Angelica archangelica*, *A. palustris*, *Cirsium canum*, *C. arvense* (L.) Scop., *Eupatorium cannabinum*, *Inula helenium*, *Molinia caerulea*, *Valeriana officinalis* L. и др. Кустарниковый ярус обычно не выражен, однако во многих сообществах в небольшом обилии присутствует *Salix cinerea* и редко *S. rosmarinifolia*. Моховой ярус отсутствует. Микрорельеф кочковатый, кочки образованы *Carex cespitosa*, их высота 20–30 см, диаметр 30 см. Уровень воды между кочек +10 – –40 см, под кочками –20 – –60 см. Мощность торфяной залежи 2–4 м.

Сообщества ассоциации распространены почти исключительно в западной части болота. Они связаны тесной сукцессионной связью с сообществами заболоченных лугов. От ассоциации *Caricetum cespitosae* Steffen 1931 данная ассоциация отличается наличием блока диагностических видов порядка *Molinietalia* и класса *Molinio-Arrhenatheretea*.

### Ассоциация *Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae* Bal.-Tul. 1978

**Диагностические виды:** *Filipendula ulmaria*, *Lysimachia vulgaris*, *Urtica dioica*.

**Структура.** Сообщества ассоциации в большинстве случаев двухъярусные. Обычно в той или иной степени развит верхний ярус из тростника (высота 1,8–2,5 м, среднее покрытие 30–35%). Второй ярус высотой 1–1,5 м образован *Filipendula ulmaria* (среднее покрытие 15–20%), *Lysimachia vulgaris* (3–5%) и *Urtica dioica* (15–20%), *Carex cespitosa*. В отдельных случаях в качестве доминанта выступает *Calamagrostis epigeios* (до 50%). Все эти виды встречаются с высоким постоянством, однако их покрытие варьирует в очень широких пределах. Спорадически встречаются *Carduus crispus* L., *Carex acutiformis*, *Cirsium canum*, *Lythrum salicaria*, *Polemonium caeruleum* L., *Sanguisorba officinalis* L., *Scutellaria*

*galericulata* L., *Sonchus palustris* L. и др. Кустарниковый ярус отсутствует или слабо выражен, однако довольно характерна *Salix cinerea*. Моховой ярус отсутствует. Микрорельеф ровный или с отдельными кочками из *Carex cespitosa*. Уровень воды (межкочье) от 0 до –110 см, в среднем – 30 см. Мощность торфяной залежи 2–4 м.

Описанные здесь сообщества ассоциации *Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae* отличаются от ассоциации *Urtico dioicae-Filipenduletum ulmariae*, описанной ниже, наличием *Lysimachia vulgaris*, *Carex cespitosa* и *C. acutiformis*. Между тем эти ассоциации достаточно близки и связаны друг с другом постепенными переходами. Сообщества ассоциации приурочены к осушенным участкам болота с невыработанным торфом.

### Ассоциация *Urtico dioicae-Filipenduletum ulmariae* Klotz et Köck 1986

**Диагностические виды:** *Filipendula ulmaria*, *Urtica dioica*.

**Структура.** Сообщества ассоциации обычно двухъярусные. Высота верхнего яруса 1,8–2,3 м, образован чаще *Phragmites australis* (среднее покрытие 15%), реже *Angelica archangelica* (50%) и *Inula helenium* (15–25%). Нижний ярус имеет высоту 1–1,5 м, образован *Filipendula ulmaria* (15%), *Urtica dioica* (30%), *Calamagrostis epigeios* (25%), *Lythrum salicaria* (3–5%). Эти виды встречаются с высоким постоянством (IV). С меньшим постоянством и покрытием встречаются *Alopecurus arundinaceus*, *Angelica palustris*, *Carduus crispus*, *Rumex confertus* Willd., *Symphytum officinale* и др. Кустарниковый ярус отсутствует или разреженный из *Salix cinerea*. Моховой ярус отсутствует. Микрорельеф ровный или волнистый, уровень воды от –10 до –60 см. Мощность торфяной залежи 2–4 м. От ассоциации *Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae* Bal.-Tul. 1978 класса *Molinio-Arrhenatheretea* отличается отсутствием *Lysimachia vulgaris*, *Carex cespitosa* и *C. acutiformis*. Сообщества ассоциации очень широко распространены на болоте Брехово, особенно в западной части болота, преимущественно там, где торф не разрабатывался после осушения болота.

Флора болота Брехово в пределах границ, указанных на карте-схеме (см. рис. 1) составляет 175 видов. Анализ флоры в данной статье не дается, это будет сделано в отдельной работе, посвященной сравнительно-флористическому анализу болот региона.

### Рекомендации по режиму охраны и использования болота Брехово

Болото Брехово имеет очевидное научное и практическое значение. Очень мощная торфяная залежь (до 5–7 м) представляет собой эталон-





ный стратиграфический разрез голоцена для северо-восточного палинологического района центральной части Приволжской возвышенности (выполнен спорово-пыльцевой анализ и радиоуглеродные датировки); является местом произрастания ценных лекарственных растений (*Inula helenium*, *Valeriana officinalis*, *Althaea officinalis* L. и др.) и редких видов, в том числе занесенных в Красную книгу Ульяновской области [15] (*Althaea officinalis* L., *Parnassia palustris* L., *Salix rosmarinifolia* L., *Orchis militaris* L.); имеет торф, пригодный для лечебных целей; ценное охотничье угодье, в пределах охранной зоны болота обнаружены археологические стоянки бронзового века [16].

В настоящее время растительность болота Брехово и генетически связанная с ним луговая растительность поймы р. Свияги подвергаются воздействию двух антропогенных факторов: выпасу скота и сенокосению. Наиболее негативные последствия имеет первый фактор, однако выпас скота в основном производится за пределами болота, но на участках, непосредственно примыкающих к нему. Сенокосение в разумных пределах допустимо, однако на Бреховом болоте и прилегающих лугах выкашивается все, что не отравлено, и где позволяет степень заболоченности. При этом выкашиваются участки, где произрастают редкие лекарственные растения. На всей территории болота и его охранной зоны следует запретить: проведение каких-либо гидромелиоративных мероприятий; разработку торфа для нужд промышленности и сельского хозяйства; устройство летних лагерей скота на территории болота и в его охранной зоне; выпас, прогон и водопой скота; уничтожение кустарниковой растительности; разработку строительного камня (подобные работы проводились в овраге, выходящем устьем к болоту с его западной стороны, в результате чего была уничтожена часть культурного слоя поселения бронзового века).

### Заключение

Коренная растительность сохранилась лишь на части территории болота Брехово, многие растительные сообщества имеют вторичный характер, в связи с чем синтаксономическая структура весьма разнообразна. В ряде сообществ значительны ресурсы ценных лекарственных растений.

### Список литературы

1. Полевая геоботаника. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1959–1976. Т. 1–5.
2. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб. : Мир и семья-95, 1995. 992 с.
3. Игнатов М. С., Афонина О. М., Игнатова Е. А. Список мхов восточной Европы и северной Азии // *Арктоа*. 2006. № 15. С. 1–130.
4. Шенников А. П. Луга Симбирской губернии. Вып. 2. Самара : Б. и., 1924. 70 с.
5. Торфяной фонд СССР. Торфяные болота Средневолжского края. Т. 2, ч. 2. М. : Всесоюз. ин-т торфа Акад. с.-х. наук им. В. И. Ленина, 1932. 44 с.
6. Властова В. Н. Торфяной фонд Ульяновской области. М. : Б. и., 1948. 138 с.
7. ГАУО (Государственный архив Ульяновской области). Фонд Р-1181. Оп. 1. Ед. хр. 205.
8. Пискунов В. П. Морфология растительного покрова торфяного месторождения «Брехово» Ульяновской области // *Вопросы морфологии и динамики растительного покрова*. Науч. тр. Куйбышев : Изд-во КГПИ, 1973. Т. 119, вып. 3. С. 101–109.
9. Благовещенский И. В. Значение, охрана и рациональное использование болот Ульяновской области // *Краеведческие записки*. Вып. 7. Ульяновск : Приволж. кн. изд-во, 1987. С. 66–77.
10. Благовещенский И. В. Структура растительного покрова, систематический, географический и эколого-биологический анализ флоры болотных экосистем центральной части Приволжской возвышенности : дис. ... д-ра биол. наук. Ульяновск, 2006. 649 с.
11. Благовещенский И. В. Болото Брехово // *Особо охраняемые природные территории Ульяновской области*. Ульяновск : Дом печати, 1997. С. 70–71.
12. Благовещенский И. В. Черноольховые и ивовые сообщества болот центральной части Приволжской возвышенности // *Бот. журн.* 2018. Т. 103, № 7. С. 853–882.
13. Благовещенская Н. В. Опыт сопоставления возраста болот и истории растительности в голоцене Ульяновского Предволжья и сопредельных территорий // *Бот. журн.* 1985. Т. 70, № 11. С. 1452–1464.
14. Благовещенская Н. В. Динамика растительного покрова центральной части Приволжской возвышенности в голоцене. Ульяновск : Изд-во УлГУ, 2009. 282 с.
15. Красная книга Ульяновской области. М. : Буки-Веди, 2015. 550 с.
16. Буров Г. М. Археологические памятники Верхней Свияги. Ульяновск : Приволж. изд-во, 1972. 56 с.

### Образец для цитирования:

Благовещенский И. В. Растительность болота Брехово (Ульяновская область). Рекомендации по режиму охраны и использования // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 454–464. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-454-464>





## Vegetation of the Bog Brekhovo (Ulyanovsk Region). Recommendations for Regime Security and Use

### I. V. Blagovetshenskiy

Ivan V. Blagovetshenskiy, <https://orcid.org/0000-0001-7772-4734>, Ulyanovsk State University, 42 L. Tolstoy St., Ulyanovsk 432017, Russia, [globularia@mail.ru](mailto:globularia@mail.ru)

The Brekhovo mire is a natural monument of the Ulyanovsk region, it is a stratigraphic standard of the Holocene period, the place where rare and medicinal plant species grow and has significant reserves of a valuable natural resource – peat. Currently, it is exposed to a number of anthropogenic factors, which causes concern for the safety of its natural complexes. The article is based on the description of trial plots (total 96 descriptions). Field geobotanical studies (area descriptions and geobotanical mapping) were carried out according to generally accepted methods. For the classification of vegetation, the ecological-floral approach of Brown-Blanke was applied. It is established that the vegetation of the Brekhovo swamp is represented by 10 associations: Frangulo-Salicetum cinereae Malcuit 1929; Phragmitetum australis Koch 1926; Caricetum ripariae Soó 1928 em. Knapp et Staff. 1962; Caricetum atheroidis (Prokopjev 1990) Taran 1995; Caricetum atheroidis (Prokopjev 1990) Taran 1995; Carici cespitosae-Deschampsietum cespitosae Mirkin in Denisova et al. 1986; Carici vulpinae-Deschampsietum cespitosae Mirkin ex Grigorjev et al. 2002; Polemonio caeruleae-Caricetum cespitosae Grigorjev et al. 2002; Caricetum acutiformis Sauer 1937; Lysimachio vulgaris-Filipenduletum ulmariae Bal.-Tul. 1978. The native vegetation has been preserved only on the part of the Brekhovo swamp territory, and many plant communities have a secondary character, so the syntaxonomic structure is very diverse. In a number of communities, valuable resources of valuable medicinal plants are significant. **Keywords:** bogs, syntaxonomy, association, *Salix cinerea*, *Phragmites australis*, *Carex riparia*, *Deschampsia cespitosa*, *Inula helenium*, *Carex cespitosa*, *Carex acutiformis*, *Filipendula ulmaria*, *Alopecurus arundinaceus*, *Urtica dioica*, Ulyanovsk region.

Received: 25.03.2020 / Accepted: 06.04.2020 / Published: 30.11.2020

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

### References

1. *Polevaya geobotanika* [Field Geobotany]. Leningrad, Nauka. Leningr. otd-nie Publ., 1959–1976. Vols. 1–5 (in Russian).
2. Cherepanov S. K. *Sosudistye rasteniya Rossii i soprodel'nykh gosudarstv* [Vascular Plants of Russia and Neighboring Countries]. St. Petersburg, Mir i sem'ya-95 Publ., 1995. 992 p. (in Russian).
3. Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A. List of Mosses of Eastern Europe and Northern Asia. *Arctoa*, 2006, no. 15, pp. 1–130 (in Russian).
4. Shennikov A. P. *Luga Simbirskoy gubernii. Vyp. 2.* [Meadows of Simbirsk province. Iss. 2]. Samara, 1924. 70 p. (in Russian).
5. *Torfyanoy fond SSSR. Torfyanye bolota Srednevolzhskogo kraja. T. 2, ch. 2* [Peat Fund of the USSR. Peat bogs of the Middle Volga region. Vol. 2, pt. 2]. Moscow, Vsesoyuz. institut torfa Akad. s.-kh. nauk, 1932. 44 p. (in Russian).
6. Vlastova V.N. *Torfyanoy fond Ul'yanovskoy oblasti* [Peat Fund of Ulyanovsk Region]. Moscow, 1948. 138 p. (in Russian).
7. *GAUO (Gosudarstvennyy arkhiv Ul'yanovskoy oblasti). Fond R-1181. Op. 1. Ed. khr. 205* [GAUO (State Archives of the Ulyanovsk Region). Fund P-1181. Op. 1. Unit. Hr. 205] (in Russian).
8. Piskunov V. P. Morfologiya rastitel'nogo pokrova torfy-anogo mestorozhdeniya «Brekhovo» Ul'yanovskoy oblasti [Morphology of the vegetation cover of the Brekhovo peat deposit in the Ulyanovsk region]. *Voprosy morfologii i dinamiki rastitel'nogo pokrova. Nauchnye trudy* [Questions of morphology and dynamics of vegetation cover. Sci. works]. Kuybyshev, Izd-vo KGPI, 1973, vol. 119, iss. 3, pp. 101–109 (in Russian).
9. Blagoveshchenskiy I. V. Znachenie, okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie bolot Ul'yanovskoy oblasti [The importance, protection and rational use of bogs in the Ulyanovsk region.]. *Kraevedcheskie zapiski* [Local History Notes] Ul'yanovsk, Privolzhskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1987, iss. 7, pp. 66–77 (in Russian).
10. Blagoveshchenskiy I. V. *Struktura rastitel'nogo pokrova, sistematicheskii, geograficheskii i ekologo-biologicheskii analiz flory bolotnykh ekosistem tsentral'noy chasti Privolzhskoy vozvysheynosti* [Vegetation structure, systematic, geographical and ecological-biological analysis of the flora of bog ecosystems in the central part of the Volga Upland]. Diss. Dr. Sci. (Biol.). Ul'yanovsk, 2006. 649 p. (in Russian).
11. Blagoveshchenskiy I. V. Boloto Brekhovo [Bog of Brekhovo]. In: *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii Ul'yanovskoy oblasti* [Specially protected natural territories of the Ulyanovsk region]. Ul'yanovsk, Dom pechati Publ., 1997, pp. 70–71 (in Russian).
12. Blagoveshchenskiy I. V. The black alder and willow communities of the bogs in the central part of the Volga Upland. *Botanicheskii Zhurnal*, 2018, vol. 103, no. 7, pp. 853–882 (in Russian). DOI: 10.7868/S0006813618070025
13. Blagoveshchenskaya N. V. The experience of comparing the age of swamps and vegetation history in the Holocene Predvolzhya Ulyanovsk and adjacent territories. *Botanicheskii Zhurnal*, 1985, vol. 70, no. 11, pp. 1452–1464 (in Russian).
14. Blagoveshchenskaya N. V. *Dinamika rastitel'nogo pokrova tsentral'noy chasti Privolzhskoy vozvysheynosti v golotsene* [The dynamics of vegetation cover the central part of the Volga Uplands in the Holocene]. Ul'yanovsk, Izd-vo UIGU, 2009. 282 p. (in Russian).
15. *Krasnaya kniga Ul'yanovskoy oblasti* [The Red Book of the Ulyanovsk region]. Moscow, Buki-Vedi Publ., 2015. 550 p. (in Russian).
16. Burov G. M. *Arkheologicheskie pamyatniki Verkhney Sviyagi* [Archaeological Monuments of Upper Sviyaga]. Ul'yanovsk, Privolzhskoe izdatel'stvo, 1972. 56 p. (in Russian).

### Cite this article as:

Blagovetshenskiy I. V. Vegetation of the Bog Brekhovo (Ulyanovsk Region). Recommendations for Regime Security and Use. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 454–464 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-454-464>



УДК 574.47

## Мозаичность естественных галофитных экосистем на границе лесостепной и степной зон Южного Урала



Н. Н. Назаренко, А. В. Малаев, А. В. Пироженкова, Н. А. Байда

Назаренко Назар Николаевич, доктор биологических наук, профессор кафедры химии, экологии и методики обучения химии, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, nnazarenko@hotmail.com

Малаев Александр Владимирович, кандидат географических наук, заведующий кафедрой географии и методики обучения географии, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, malaev2@mail.ru

Пироженкова Алла Вячеславовна, студент 4-го года обучения, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, allapirozhenkova@mail.ru

Байда Наталья Александровна, студент 4-го года обучения, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, bayda.natashenka@mail.ru

В статье с позиций теории иерархического континуума охарактеризована мозаичность галофильных экосистем на границе лесостепной и степной зон Южного Урала на примере Троицкого государственного природного комплексного заказника. Установлено, что для галофильных сообществ засоление приводит к фрагментации травяного покрова заказника, для галофитов характерно случайное пространственное распределение, а мозаичность поддерживают степные солеустойчивые виды. Статистически достоверно выделяются только микромозаики (0,8 м), а парцеллы (8 м) и ценозы (12 м) нечеткие, наблюдается фрагментация горизонтальной структуры. Для парцелл определяется два ряда ценотического замещения – галофильный и остепненный – связанные с распределением в пространстве галофитов и степных злаков соответственно. На ценотическом уровне наблюдается четкое обособление сообществ по показателям фиторазнообразия и биотопов. Значимыми для формирования парцелл и ценозов являются внутриценотические взаимодействия между видами, переменность почвенного увлажнения и аэрация почв, кислотность (щелочность) и нарастание (снижение) минерализованности почвенного раствора.

**Ключевые слова:** мозаичность, биотопы, фитоценозы, галофильная растительность Южного Урала, Троицкий государственный природный комплексный заказник, Челябинская область.

Поступила в редакцию: 04.04.2020 / Принята: 03.06.2020 /  
Опубликована: 30.11.2020

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

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-465-476>

### Введение

Одной из важнейших составляющих биогеоценоза является его пространственная структура, или горизонтальное и вертикальное распределе-

ние в ценозе особей и их групп [1]. Ее изучение предполагает два подхода: популяционный, или выделение мозаик видов [2], и ценотический – определение многовидовых мозаик [3]. Традиционно оба подхода предполагают геометрическую оценку с картографированием мозаик [4], или ценопопуляционных локусов [5]. Сами локусы выделяются как участки с высокой (или) низкой плотностью особей [1] и различаются по размеру. При этом крупные пятна могут формироваться как группы мелких локусов [4]. Таким образом, современный подход в изучении пространственной структуры рассматривает растительный покров как континуум разномасштабных ценопопуляционных локусов [6–9], где биогеоценоз является одним из уровней мозаичности [9–11].

Локусы формируются как в результате биологических особенностей видов (биоморфы, вегетативная подвижность, особенности диссеминации и т.п.) [12], так и факторов местообитания [13]. Соответственно, оценка пространственной структуры ценозов должна быть связана с выявлением используемых ценопопуляциями ресурсов и влиянием на их формирование факторов среды [4]. Наилучшие результаты дают два подхода одновременно, когда на первом этапе определяются размеры мозаик, а на втором – экологические факторы формирования мозаик каждого уровня [10, 11, 14–18].

Тем не менее, и в последнее время такие исследования ведутся только на ценотическом уровне с использованием картографических подходов [19–22] либо оценивается мозаичность на уровне особей и клонов [23], несмотря на то что уровень микросайт – биотоп, в котором формируется внутриценотическая структура, является наименее изученным [17]. Работы, посвященные изучению пространственного континуума на разных пространственных уровнях экосистем, в России немногочисленны [16, 17, 24]. Для степей Южного Урала такая работа выполнена нами на примере степей Брединского государственного природного биологического заказника [25].

Задачей данной работы является оценка пространственной структуры галофильных экосистем пограничной зоны лесостепи и степи Южного Урала на примере галофильных ценозов Троицкого государственного природного комплексного заказника.



## Материалы и методы

В настоящее время условно естественные травянистые сообщества Южного Урала локализованы преимущественно в особо охраняемых природных территориях (ООПТ) разных типов. Примером такого ООПТ является Троицкий государственный природный комплексный заказник, расположенный в Троицком районе Челябинской области у государственной границы с Казахстаном. Организован он был в 1927 г. как лесостепной заповедник, с 1951 г. имел статус учебно-опытного хозяйства Пермского университета, далее (с 1969 г.) – государственного ботанического заказника [4, 10], а статус комплексного получил в 2001 г. [26, 27]. Научные исследования на территории заказника велись до 2012 г., затем были приостановлены в связи с прекращением учебной практики студентов биологического факультета Пермского государственного университета [27], биогеоэкологические исследования не проводились с 90-х гг. прошлого века [28]. В зональном отношении заказник расположен в подзоне северных ковыльно-разнотравных степей [29], но его растительность характерна для южных районов лесостепи [27]. Таким образом, растительность заказника является типичной переходной между южно-уральской лесостепной и степной зональной.

Для изучения галофильной растительности геоботанический профиль закладывался в специальной зоне «Солонцеватые луга»: стационар № 3, организованный еще Пермским государственным университетом (квартал 13, выделы 10, 12, 13, 16, 17). На профиле закладывались 100-метровые трансекты, состоящие из непрерывных прилегающих площадок 0,2×0,2 м, определяемых трансектной вилочкой Л. Г. Раменского [30] размером 0,2×1,0 м. На каждой площадке отмечали присутствие видов сосудистых растений. В качестве учетной единицы выбирались парциальные побеги [31], для моноцентрических видов – особь, а для плотнокустовых злаков – компактный клон [32]. Результаты заносились в базу данных, где для каждой площадки отмечалось наличие (1) или отсутствие (0) вида.

Оценка характера размещения видов выполнялась методом итераций (Analysis of runs) [33–35] по шкале П. В. Терентьева в модификации А. А. Маслова [16]. Определение размеров мозаик выполнялось по изменению дисперсии численности видов с увеличением размера площадки (Hierarchical ANOVA) [16, 35]. При этом в связи с особенностью закладки пробных площадей оценивались не площади, а линейные размеры мозаик [36]. Также выполнялся анализ плеяд сопряженных видов [37].

Объективные многовидовые мозаики выделялись методом блоков и главных компонент [14, 16, 35]. Для трансект выделялись непрерывающиеся блоки переменного размера в двух независимых противоположных направлениях с шагом 0,2 м для блоков до 2 м и 1,0 м – свыше 2 м. Расчет вклада первых трех осей главных компонент производился в пакте Statistica по алгоритму Factor Analysis, Principal components, Extraction method. Объективные размеры мозаик (уровни мозаичности) определялись по изменению вклада в суммарную дисперсию видов первых трех осей главных компонент по совместным «пикам» значений 1-й и 2-й, 1-й и 3-й, 2-й и 3-й осей.

Оценка факторов мозаичности выполнялась на основе ординации видов в осях главных компонент по величинам нагрузки (Factor Loadings) видов на эти оси и координат видов в пространстве абиотических факторов [15, 16]. Координаты определялись по положению видов в фитоиндикационных шкалах [38] почвенного увлажнения (hd), его переменности (fh), почвенной кислотности (rc), аэрации, (ae), солевого (sl), азотного режимов (nt) и содержания кальция (Ca), оцененных методом реализованной экологической ниши [39]. Интерпретация осей проведена непараметрической корреляцией [40] с использованием коэффициента tau Кендалла.

Кроме того, выполнялась кластеризация выделенных мозаик по матрице коэффициента Сёренсена–Чекановского с использованием бета-гибкой стратегии Ланса [41, 42]. Проверка классификации проводилась дискриминантным анализом [43], а оценка биотопов мозаик – ординацией выделенных мозаик в пространстве фитоиндикационных шкал [38] и осей неметрического многомерного шкалирования (НМШ) [41]. Положение мозаик в шкалах рассчитывалось методом среднего балла [38], на основе определенных координат видов, а интерпретация осей выполнялась также непараметрической корреляцией [40] с использованием коэффициента tau-Кендалла.

## Результаты и их обсуждение

Изученные галофильные сообщества характеризуются низким видовым разнообразием – на профиле зарегистрировано только 6 видов, образующих три плеяды из пар сопряженных видов: *Artemisia absinthium* L. (1) и *Stipa tirsia* Steven (4); *Festuca valesiaca* Gaudin (3) и *Salicornia europaea* L. (5); *Koeleria cristata* (L.) Pers. (2) и *Petrosimonia litwinowii* Korsh. (6) (рис. 1). Отдельно от выделенных плеяд формируются пятна *Astragalus sulcatus* L. (7), несопряженные ни с одним указанным выше видом.



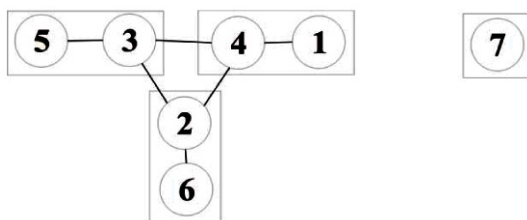


Рис. 1. Плеяды сопряженных видов галофильных сообществ Троицкого заказника (нумерация видов соответствует нумерации в тексте)

Fig. 1. Pleiades of conjugate species of halophytic communities of the Troitsky preserve (the numbering of species corresponds to the numbering in the text)

Анализ характера пространственного размещения видов галофильных сообществ (табл. 1) показывает, что галофиты характеризуются случайным распределением – показатель  $t$  таких видов,

как *Salicornia europaea*, *Petrosimonia litwinowii* и *Astragalus sulcatus* близки к нулю. Также случайное распределение характерно и для *Artemisia absinthium* и *Festuca valesiaca* ( $t < -2$ ). Соответственно, плеяда *Festuca valesiaca* – *Salicornia europaea* также имеет случайный характер распределения. Наконец, распределение только двух видов определяется как контактиозное – *Stipa tirsia* и *Koeleria cristata* (сильноконтактиозное), причем оба вида характерны для степных травостоев и являются солестойкими, а не галофитами. Таким образом, засоление приводит к фрагментации травяного покрова (для всех видов характерна низкая встречаемость) и нарушению пространственной организации ценопопуляций, приводящему к формированию случайного пространственного распределения, а мозаичность поддерживают исключительно степные солеустойчивые виды.

Таблица 1 / Table 1

**Оценка характера размещения ценопопуляций видов галофильных экосистем Троицкого заказника на разных уровнях мозаичности\***

**Assessment of the species coenopopulation's patterns in halophytic ecosystems of the Troitsky preserve at different levels of mosaics**

Виды / Species		$t$	Мозаики, м / Mosaics, m																
№	%		0,8	1,2	1,4	1,8	4	5	6	7	8	10	11	12	14	15	16	18	19
1	2,6	-1,2								+		+				+			+
2	10,0	-14,5				+				+		+			+		+		
3	9,2	-1,2	+		+		+							+		+	+		
4	3,4	-8,9		+		+			+		+		+		+		+		
5	2,6	0,6																	
6	2,2	0,5										+		+		+			
7	1,4	0,3						+				+			+		+		

Примечание. \* – показаны мозаики, для которых определены «пики» (+) дисперсии численности видов, % обозначена встречаемость на профиле.

Note. \* – mosaics are shown for which the «peaks» (+) of the species abundance variance are defined, % the occurrence on the profile is indicated.

Характер пространственного распределения ценопопуляций видов (см. табл. 1) указывает на то, что мозаики для галофильных травостоев формируются исключительно крупномасштабные (свыше 10 м). Сложная микромозаичность, связанная с изменением характера пространственного размещения особей, характерна только для плотнотравных степных злаков *Festuca valesiaca* (3) и *Stipa tirsia* (4). При этом изменение характера размещения особей в пространстве напрямую не связано с сопряженностью видов в ценопопуляциях, поскольку для пар сопряженных видов практически не определяются одинаковые уровни «пиков». Для ценопопуляций выделяются три уровня (10, 14 и 16 м) на которых отмечается изменение пространственной структуры для трех и более видов одновременно.

При этом для шести видов определяется нескольких «пиков» дисперсии численности для блоков разного размера. Это указывает на изменение характера размещения вида с увеличением масштаба и означает, что при увеличении размеров площадок для вида будет определяться иной характер размещения. Например, вид с контактиозным размещением может быть определен как случайный. Таким образом, оценка характера пространственного размещения зависит от того, какой размер учетной площадки принят как базовый, а исследования на основе учетных площадок большего размера, чем минимальный размер учетной единицы особи для данной биоморфы, не только не дают реальный характер пространственного размещения вида, но могут давать искаженную информацию об этом размещении.





Оценка многовидовых мозаик галофильных экосистем Троицкого заказника (рис. 2) определяет резкое отличие вклада первой оси в суммарную дисперсию от очень близких вкладов второй и третьей осей, что маркирует наличие неболь-

шого числа обособленных эколого-ценотических групп видов растений. Также наблюдается рост вклада в суммарную дисперсию для первой оси, что указывает на наличие ведущего фактора, меняющегося на разных уровнях мозаичности.

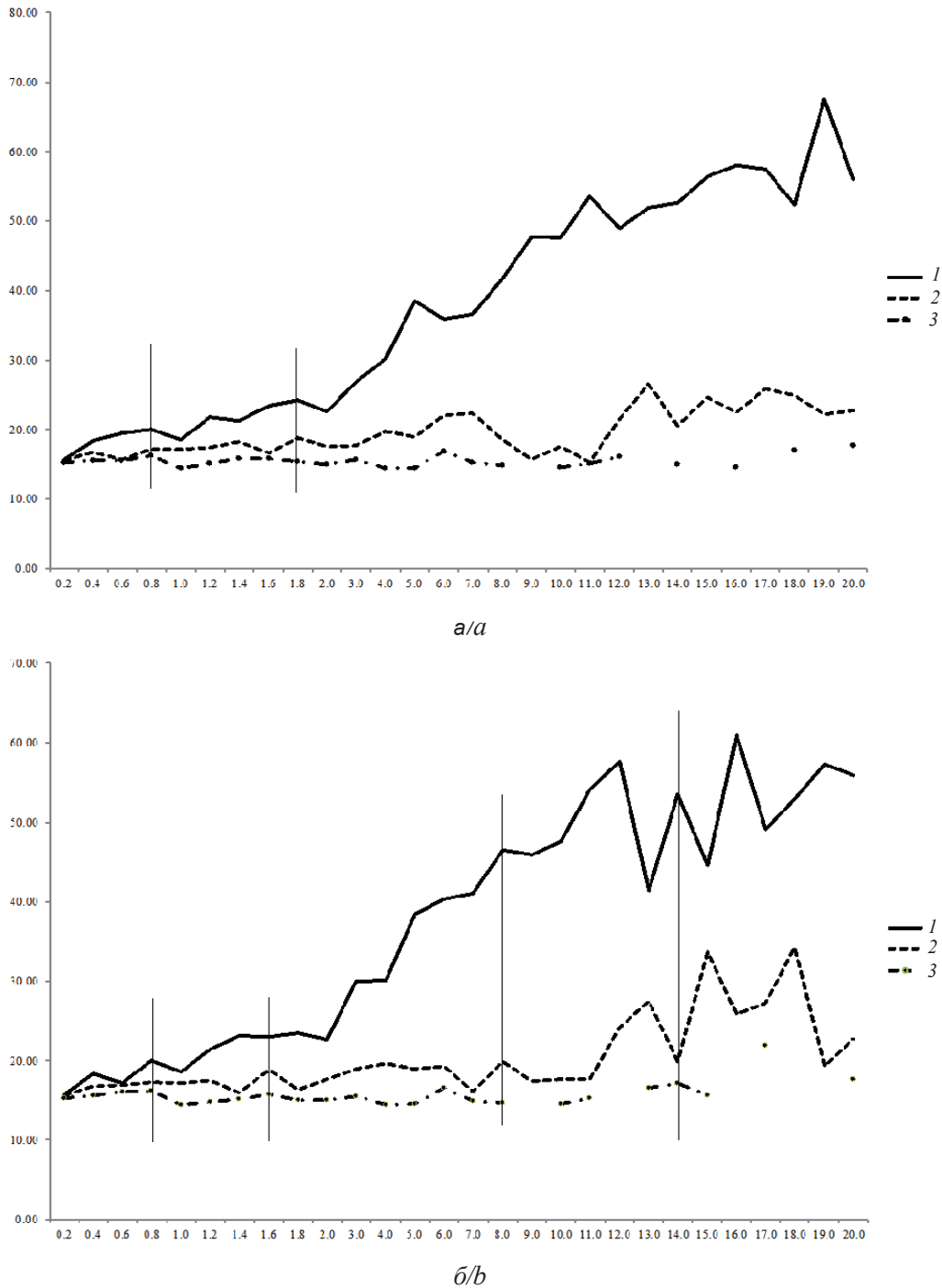


Рис. 2. Уровни мозаичности галофильных экосистем Троицкого заказника ( $a$ ,  $b$  – варианты анализа, по оси ординат – вклад оси, %; по оси абсцисс – размер блока, м; 1, 2, 3 – номера осей, горизонталями отмечены уровни мозаичности)

Fig. 2. Patterns levels of halophytic ecosystems of the Troitsky preserve ( $a$ ,  $b$  – analysis variants, on the ordinate axis – the contribution of the principal component axis, %; on the abscissa axis – the size of the block, m; 1, 2, 3 – axis numbers, horizontally marked levels of patterns)



Для обоих вариантов (см. рис. 2) анализа выделяется только один общий уровень микро-мозаик размером 0,8 м, но при этом для первого варианта определяются объективные многовидовые мозаики размером 1,8 и 9,0 м (см. рис. 2, а), а для второго варианта – 1,6, 8,0 и 14,0 м (см. рис. 2, б). Таким образом, для галофильных травостоев доказано наличие разномасштабных единиц трех уровней – микромозаичного, парцеллярного и ценотического, но засоление приводит к фрагментации травяного покрова и нарушению пространственной организации групп травянистых видов на парцеллярном и

ценотическом уровнях, в результате возникают неустойчивость горизонтальной структуры, неустойчивость самих засоленных экосистем и, соответственно, нечеткость иерархического континуума.

Оценка влияния абиотических факторов на формирование многовидовых мозаик предполагает выделение трех осей ординации, соответственно идентифицировались три группы ведущих факторов (табл. 2). При этом оценка влияния абиотических факторов проведена не только для однозначно выделяемых мозаик, но и для некоторых других.

Таблица 2 / Table 2

Идентификация ведущих факторов распределения видов галофильных экосистем Троицкого заказника на многовидовые мозаики (метод главных компонент)\*  
 Identification of the principal factors of species distribution into multi-species mosaics in halophytic ecosystems of the Troitsky preserve (Principal Components)\*

Размер, м / Dimensions, m	Ось / Axis	Фактор / Factor						
		hd	fh	rc	sl	Ca	nt	ae
0,8	1	0,24	-0,14	0,14	0,05	-0,43	0,05	-0,10
	2	-0,14	-0,52	-0,43	-0,52	0,14	0,43	-0,59
	3	0,24	0,05	0,33	-0,14	-0,05	0,05	0,10
1,6-1,8	1	0,14	<u>-0,24</u> <b>0,71</b>	<u>0,05</u> 0,43	<u>-0,24</u> <b>0,90</b>	<u>0,05</u> -0,33	-0,05	<u>-0,20</u> <b>0,68</b>
	2	<u>-0,24</u> -0,14	<u>-0,62</u> -0,33	<u>-0,52</u> -0,43	<u>-0,43</u> -0,14	<u>0,24</u> 0,14	<u>0,33</u> 0,43	<u>-0,68</u> -0,39
	3	<u>-0,05</u> 0,24	<u>-0,24</u> 0,05	<u>0,05</u> 0,14	<u>-0,43</u> 0,05	<u>0,24</u> -0,24	<u>-0,05</u> 0,43	<u>-0,20</u> 0,10
8,0	1	<u>0,05</u> 0,14	<b>0,62</b> 0,14	<u>0,33</u> 0,05	<b>0,62</b> 0,14	<u>-0,43</u> -0,33	<u>0,05</u> 0,14	<u>0,59</u> 0,10
	2	<u>0,33</u> 0,14	<u>-0,05</u> -0,24	0,05	<u>-0,24</u> -0,43	<u>-0,14</u> 0,05	<u>0,33</u> 0,14	<u>-0,10</u> -0,20
	3	<u>0,05</u> -0,43	<u>0,43</u> <b>-0,62</b>	<u>0,14</u> <b>-0,71</b>	<u>0,43</u> -0,43	<u>-0,05</u> 0,24	<u>0,05</u> 0,14	<u>0,39</u> <b>-0,68</b>
14,0	1	<u>0,05</u> 0,14	<b>0,62</b> 0,52	<u>0,33</u> 0,43	<b>0,62</b> 0,52	<u>-0,43</u> -0,33	<u>0,05</u> -0,05	<u>0,59</u> 0,59
	2	<u>0,05</u> 0,14	<u>0,43</u> 0,52	<u>0,14</u> 0,24	<u>0,43</u> 0,52	<u>-0,24</u> -0,52	<u>0,05</u> 0,14	<u>0,39</u> 0,49
	3	<b>0,62</b> 0,24	<u>0,05</u> -0,14	<u>0,33</u> -0,05	<u>-0,14</u> -0,33	<u>-0,43</u> -0,24	0,24	<u>0,10</u> -0,20

Примечание. \* – шифр факторов приведен в методике; в числителе / знаменателе в случае отличий представлены первый и второй варианты выделения блоков соответственно; полужирным выделены статистически значимые величины тау-Кендалла.

Note. \* – the index of the factors is given in the method; the numerator / denominator, in case of differences, shows the first and second variants of block allocation, respectively; the statistically significant Tau-Kendall values are highlighted in bold.

Формирование микромозаик 0,8 м для обоих вариантов анализа связано с уменьшением содержания в почве кальция, ухудшением почвенной аэрации и ростом щелочности почвенного раствора (положительная корреляция с режимом кислотности). Микромозаики 1,8 м статистически значимо связаны с переменностью режима увлажнения и почвенной аэрацией (в одном ва-

рианте – уменьшением, в другом – увеличением) и с минерализованностью почвенного раствора (в одном варианте статистически значимая положительная корреляция). Также для одного варианта анализа отмечено влияние нарастания кислотности и увеличения содержания в почве азота. На парцеллярном уровне (8 м) статистически значимыми являются режим переменности



увлажнения, а также солевой режим и для второго варианта анализа – кислотность почв и улучшение аэрации. Помимо этого, отмечается влияние роста почвенного азота (для одного варианта) и уменьшение содержания почвенного кальция (для другого варианта). Наконец, на ценоотическом уровне (14 м) для обоих вариантов анализа влияют увеличение переменной почвенного увлажнения и рост минерализованности почвенного раствора (в одном варианте показатели статистически значимы). Также для одного варианта статистически значим рост почвенного увлажнения, а для другого – нарастание почвенной аэрации. Отмечается также влияние уменьшения содержания в почве кальция.

Таким образом, при нарастании засоления эдафотопов определяющими пространственную организацию травянистых сообществ на всех уровнях в первую очередь являются «классические» факторы солончаков и солонцов – контрастность увлажнения, аэрация почв и рост или уменьшение засоления почв, а также связанные с ними режимы кислотности и азота.

Классификация выделенных многовидовых мозаик на парцеллярном и ценоотическом уровнях (где влияние абиотических факторов наименее однозначное) связана с выделением разных наборов видов растений для разных уровней мозаичности [18] и определением таких группировок, как «микрофитохор» (парцеллярный) и «мезофитохор» (биотоп) [17].

Для галофильных экосистем на парцеллярном уровне (8 м) определяется восемь микрофитохор: 1) *Festuca valesiaca* – *Koeleria cristata* (L.) Pers. – *Salicornia europaea* L. – *Petrosimonia litwinowii* Korsh; 2) *Festuca valesiaca* – *Salicornia europaea* – *Petrosimonia litwinowii*; 3) *Festuca valesiaca* – *Petrosimonia litwinowii*; 4) *Koeleria cristata*; 5) *Festuca valesiaca* – *Koeleria cristata*; 6) *Festuca valesiaca*; 7) *Festuca valesiaca* – *Koeleria cristata* – *Artemisia absinthium* L.; 8) *Artemisia absinthium* – *Festuca valesiaca*. Фактически наблюдается три группы парцелл – 1) степных злаков с содоминированием галофильных видов, 2) степных злаков и 3) полынных со степными злаками, переходных между первыми двумя группами. Дискриминантный анализ показал 100% точность классификации, при этом видами с высокой информативностью (включены в модель на основе статистически значимых величин лямбда Уилкса и *F*-критерия) являются два доминанта *Festuca valesiaca* и *Koeleria cristata*, а также *Astragalus sulcatus* L., характерный для парцелл, переходных между галофильными парцеллами и парцеллами степных злаков.

На ценоотическом уровне (14 м) определяются 5 мезофитохор: 1) *Festuca valesiaca* – *Koeleria cristata* (L.) Pers. – *Salicornia europaea* L. – *Petrosimonia litwinowii* Korsh; 2) *Festuca valesiaca* – *Koeleria cristata*; 3) *Festuca valesiaca*; 4) *Artemisia absinthium* – *Koeleria cristata*; 5) *Festuca valesiaca* – *Petrosimonia litwinowii*. В данном случае видно, что часть фитоценохор идентифицируется не только на парцеллярном, но и на ценоотическом уровне, а часть парцелл формируют новые крупные ценохоры. Это указывает на то, что на разных уровнях для оценки сообществ могут использоваться разные виды, и то, что масштаб исследований будет определять выделение синтаксонов растительности, флористический состав и другие показатели фиторазнообразия. Оценка классификации методами дискриминантного анализа дала также 100% точность. На ценоотическом уровне определяется 5 информативных видов – кроме вышеуказанных типчака, тонконога и астрагала к ним также относятся *Petrosimonia litwinowii* и *Stipa tirsia*.

Ординацией ценоотических мозаик галофильных травянистых ценозов методом НМШ определяются две ведущие оси, как на парцеллярном, так и на ценоотическом уровнях. При этом на парцеллярном уровне на формирование ценоотической структуры влияют практически все абиотические факторы, за исключением азотного режима почв (табл. 3), а для режимов переменной увлажнения и аэрации почвы определяющим является как их рост, так и уменьшение. На ценоотическом уровне определяющими ценоотическую структуру остаются только четыре режима – уменьшение переменной почвенного увлажнения, улучшение аэрации почв, рост кислотности и нарастание (снижение) минерализованности почвенного раствора, т.е. набор абиотических факторов, характерных именно для засоленных биотопов.

Оценка положения выделенных фитоценохор галофильных ценозов в осях НМШ и фитоиндикационных шкалах методами дискриминантного анализа показала 100% точность классификации на обоих уровнях мозаичности, что указывает на их ценоотическую и биотопическую специфичность. При этом на обоих уровнях значимыми являются внутриценоотические взаимодействия (оси НМШ), а для формирования парцелл также режим почвенного увлажнения и солевой режим.

Ординация парцелл в пространстве показателей фиторазнообразия (численности и встречаемости видов) показала наличие двух рядов ценоотического замещения парцелл (рис. 3, а) – «галофильный» (вдоль первой дискриминантной



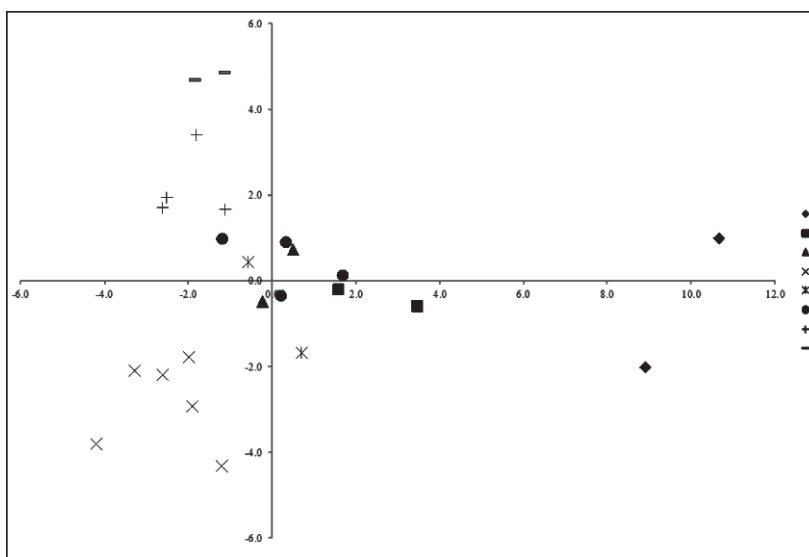
Таблица 3 / Table 3

**Идентификация факторов ординации мозаик галофильных сообществ Троицкого заказника  
(неметрическое многомерное шкалирование – NMS)\*  
Identification of the mosaics ordination factors in halophytic ecosystems of the Troitsky preserve  
(Non-metric Multidimensional Scaling – NMS)\***

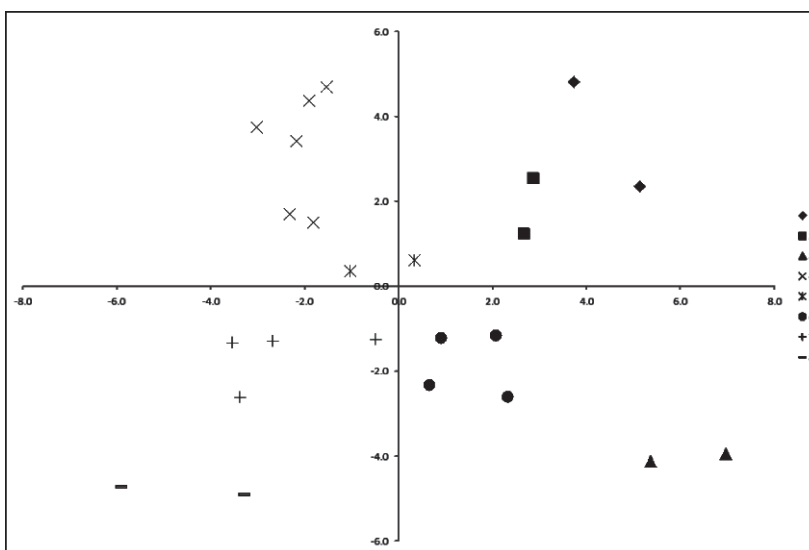
Ось / Axis	Фактор / Factor						
	hd	fh	gc	sl	Ca	nt	ae
8 м							
NMS1	<b>0,44</b>	<b>0,44</b>	<b>0,46</b>	0,16	<b>-0,66</b>	0,27	<b>0,43</b>
NMS2	0,07	<b>-0,35</b>	-0,25	<b>-0,63</b>	-0,07	0,25	<b>-0,33</b>
14 м							
NMS1	-0,24	<b>-0,60</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,60</b>	0,22	0,31	<b>-0,51</b>
NMS2	0,07	0,33	0,20	<b>0,56</b>	0,22	-0,18	0,24

Примечание. \* – шифр факторов приведен в методике; полужирным выделены статистически значимые величины тау-Кендалла.

Note. \* – the index of the factors is given in the method; the statistically significant Tau-Kendall values are highlighted in bold.



a/a



b/b



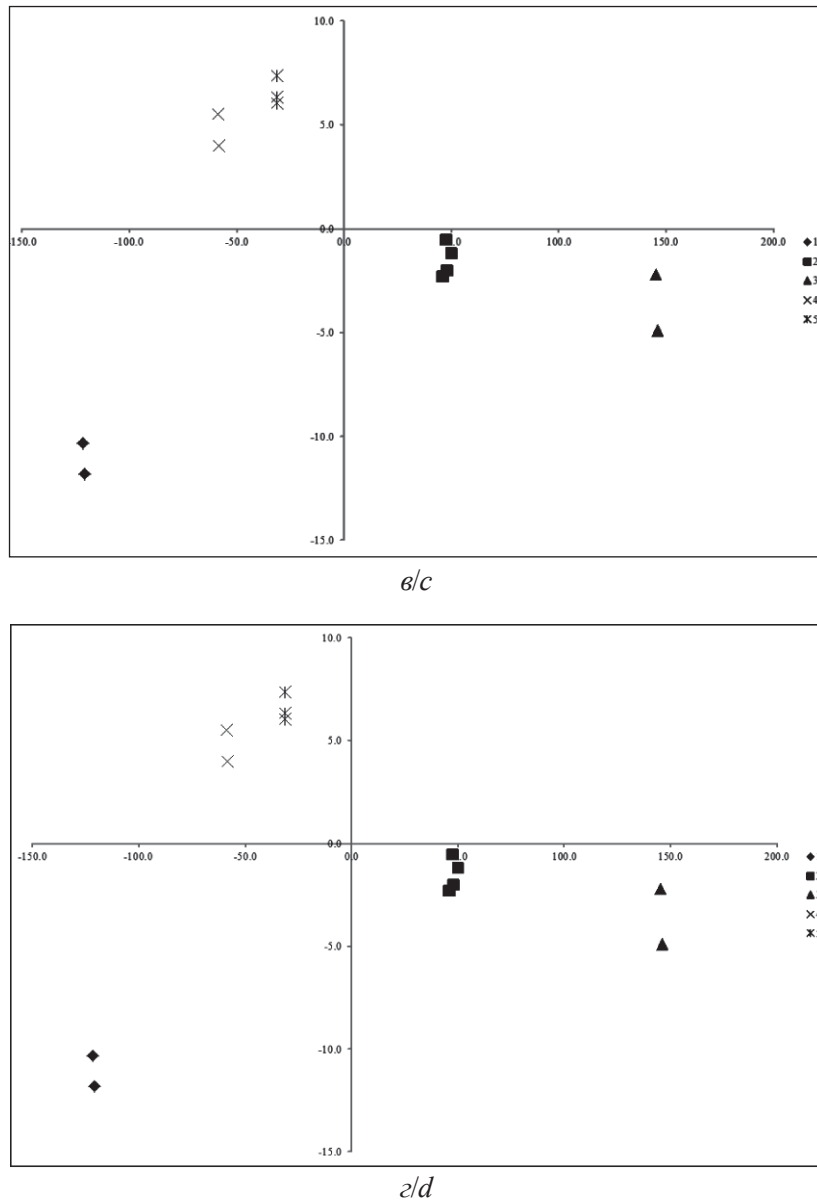


Рис. 3. Ординация мозаик галофильных ценозов (8 м – *a*, *b* и 14 м – *c*, *d*) в пространстве показателей фиторазнообразия (*a*, *b*) и в эколого-ценотическом пространстве (*b*, *d*). На графиках показаны первые две дискриминантные оси Fig. 1. Halophytic coenoses patterns ordination (8 m – *a*, *b* and 14 m – *c*, *d*) in the dimensions of phytodiversity indicators (*a*, *b*) and in the ecological-coenotic dimension (*b*, *d*). The graphs show the first and second discriminant axes

оси – абсциссы) и «остепненный» (определяемый второй дискриминантной осью, ординатой), связанный с распределением в парцеллах, соответственно, галофитов и степных злаков. В эколого-ценотическом пространстве (см. рис. 3, *b*) такие ряды не образуются, хотя биотопы парцелл формируют достаточно четкие «пятна», указывающие на специфичность их биотопов.

На ценотическом уровне (см. рис. 3, *e*, *z*) в пространстве показателей фиторазнообразия и

эколого-ценотическом пространстве мезофито-ценохоры четкого ценотического и абиотического рядов не образуют, но при этом наблюдается их обособление, что указывает на специфичность видового состава, показателей фиторазнообразия видов и биотопов галофильных ценозов.

#### Выводы

Для галофильных экосистем Троицкого государственного природного комплексного



заказника засоление приводит к фрагментации травяного покрова и нарушению пространственной организации ценопопуляций, приводящему к формированию случайного пространственного распределения, а мозаичность поддерживают исключительно степные солеустойчивые виды.

Методами многомерной статистики подтверждается наличие иерархического континуума, но однозначно определяются только микромозаики 0,8 м, а парцеллярные и ценогические мозаики размером 8 и 12 м нечеткие. В связи с несоответствием экосистем природным факторам и с увеличением их экстремальности (засоление) наблюдается фрагментация горизонтальной структуры вплоть до упрощения пространственной организации. В результате возникает пространственная неустойчивость и неустойчивость самих экосистем.

В зависимости от масштаба мозаичности галофитных сообществ на разных уровнях одни и те же виды имеют как одинаковый, так и различный ценогический вклад в формирование сообществ, соответственно для оценки мозаик могут использоваться как одни и те же, так и разные виды. Информативными («верными») при классификации сообществ видами при этом могут быть не доминанты или эдификаторы. Важным фактором при классификации является размер пробных площадок и расположение их в фитокамене, в зависимости от чего будет определяться флористический состав и другие показатели фиторазнообразия и экологическая специфика классифицированных сообществ.

Для галофитных сообществ определяется большое количество парцеллярных мозаик, часть из которых характерна и для ценогического уровня, а часть – формируют новые ценохоры. Для парцелл определяется два ряда ценогического замещения – «галофильный» и «остепненный» – связанные с распределением в пространстве, соответственно, галофитов и степных злаков. На ценогическом уровне наблюдается четкое обособление сообществ по показателям фиторазнообразия и биотопов. Значимыми для формирования парцелл и ценозов являются внутривидовые взаимодействия между видами, а также переменность почвенного увлажнения и аэрация почв, кислотность (щелочность) и нарастание (снижение) минерализованности почвенного раствора, т.е. набор абиотических факторов, характерных именно для засоленных биотопов.

## Список литературы

1. Фардеева М. Б., Исламова Г. Р., Чижикова Н. А. Анализ пространственно-возрастной структуры растений на основе информационно-статистических подходов // Учен. зап. Казан. ун-та. Естеств. науки. 2008. Т. 150, кн. 4. С. 226–240.
2. Миркин Б. М., Розенберг Г. С. Анализ мозаичности травянистых растительных сообществ. 1. Популяционный уровень // Биологические науки. 1976. № 12. С. 127–134.
3. Миркин Б. М., Розенберг Г. С. Анализ мозаичности травянистых растительных сообществ. 2. Ценогический уровень // Биологические науки. 1977. № 2. С. 121–126.
4. Ценопопуляции растений (развитие и взаимоотношения) : сб. науч. тр. М. : Наука, 1977. 213 с.
5. Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии) : сб. науч. тр. М. : Наука, 1988. 181 с.
6. O'Neil R. V., Anders D. L. de, Waide J. B., Allen T. F. H. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 1986. 153 p.
7. Austin M. P., Smith T. M. A new model for the continuum concept // Vegetatio. 1989. Vol. 83, № 1–2. P. 35–47. DOI: 10.1007/bf00031679
8. Collins S. L., Glenn S. M., Roberts D. W. The hierarchical continuum concept // Journal of Vegetation Science. 1993. Vol. 4, iss. 2. P. 149–156. DOI: 10.2307/3236099
9. Maarel van der E. Pattern and process in plant community: fifty years after A. S. Watt // Journal of Vegetation Science. 1996. Vol. 7, iss. 1. P. 19–28. DOI: 10.2307/3236412
10. Collins S. L., Glenn S. M. A hierarchical analysis of species' abundance patterns in grassland vegetation // American Naturalist. 1990. № 135, iss. 5. P. 633–648. DOI: 10.1086/285066
11. Martinez K. A., Gibson D. J., Middleton B. A. Core-satellite species hypothesis and native versus exotic species in secondary succession // Plant Ecology. 2015. № 216, iss. 3. P. 419–427. DOI: 10.1007/s11258-015-0446-z
12. Василевич В. И. Статистические методы в геоботанике. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. 232 с.
13. Pelissier R., Goreaud F. A practical approach to the study of spatial structure in simple cases of heterogeneous vegetation // Journal of Vegetation Science. 2001. № 12. P. 99–108.
14. Маслов А. А. О совместном применении метода блоков и метода главных компонент для анализа мозаичности лесных сообществ. 1. Выделение осей // Бюл. МОИП. Отд. Биологический. 1983. Т. 88, вып. 6. С. 73–79.
15. Маслов А. А. О совместном применении метода блоков и метода главных компонент для анализа мозаичности лесных сообществ. 2. Идентификация осей экологическими факторами // Бюл. МОИП. Отд. Биологический. 1985. Т. 90, вып. 4. С. 107–117.
16. Маслов А. А. Количественный анализ горизонтальной структуры лесных сообществ. М. : Наука, 1990. 160 с.



17. Заугольнова Л. Б. Иерархический подход к анализу лесной растительности малого речного бассейна (на примере Приокско-Террасного заповедника) // Бот. журн. 1999. Т. 84, № 8. С. 42–56.
18. Заугольнова Л. Б., Истомина И. И., Тихонова Е. В. Анализ растительного покрова лесной катены в антропогенном ландшафте (на примере бассейна р. Жилетовки, Подольский район Московской области) // Бюл. МОИП. Отд. Биологический. 2000. Т. 105, вып. 4. С. 42–52.
19. Ogureeva G. N., Miklyayeva I. M., Bocharnikov M. V., Dudov S. V., Tuvshintoghtog I., Zhargalsajhan L. The spatial organization and diversity of eastern Mongolian steppes // *Arid Ecosystems*. 2011. Vol. 1, iss. 1. P. 29–37. DOI: 10.1134/S2079096111010070
20. Горнов А. В. Особенности горизонтальной структуры внутрилесных лугов Нерусско-Деснянского полесья // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1 (5). С. 1219–1222.
21. Kholboeva S. A., Namzalov B. B., Tsyrenova M. G. Features of the spatial organization of forest-steppe vegetation in a valley of Dzhida River (Western Transbaikalia) // *Arid Ecosystems*. 2013. Vol. 3, iss. 3. P. 165–171. DOI: 10.1134/s2079096113030049
22. Леонова Н. А., Крупенина М. М. Пространственная динамика Присурской дубравы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2018. № 3 (23). С. 92–97. DOI: 10.21685/2307-9150-2018-3-7
23. Беляев А. Ю., Васфилова Е. С. Особенности клоновой структуры и некоторые характеристики куртин клонов солодки в популяциях на Южном Урале и в Приуралье // Вестн. ОГУ. 2010. № 5 (111). С. 87–93.
24. Уланова Н. Г., Маслов А. А. Многомерный анализ горизонтальной структуры растительности вырубки // Бот. журн. 1989. Т. 74, № 9. С. 1316–1323.
25. Назаренко Н. Н., Перлов Е. Д. Мозаичность степных экосистем Брединского государственного природного биологического заказника // Самар. науч. вестн. 2018. Т. 7, № 4. С. 85–93. DOI: 10.24411/2309-4370-2018-14115
26. Потапова Н. А., Назырова Р. И., Забелина Н. М., Исаева-Петрова Л. С., Коротков В. Н., Очагов Д. М. Сводный список особо охраняемых природных территорий Российской Федерации (справочник). Ч. II. М. : ВНИИприроды, 2006. 364 с.
27. Гашек В. А., Захаров В. Д. Орнитофауна Троицкого заказника (Челябинская область) // Фауна Урала и Сибири. 2018. № 1. С. 163–183. DOI: 10.24411/2411-0051-2018-10115
28. Антонова Л. А. Роль профессора А. Н. Пономарева в развитии ботанических исследований в Троицком лесостепном заповеднике (к 100-летию со дня рождения, 1906–2006 гг.) // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Биология. 2008. Вып. 9 (25). С. 111–114.
29. Колесников Б. П. Растительность Челябинской области // Природа Челябинской области. Челябинск : Юж.-Урал. кн. изд-во, 1964. С. 135–158.
30. Раменский Л. Г. Учет и описание растительности (на основе проективного метода) // Избранные работы – проблемы и методы изучения растительного покрова. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1971. С. 57–105.
31. Смирнова О. В. Объем счетной единицы при изучении ценопопуляций растений различных биоморф // Ценопопуляции растений (Основные понятия и структура). М. : Наука, 1976. С. 72–80.
32. Смирнова О. В. Структура травяного покрова широколиственных лесов. М. : Наука, 1987. 208 с.
33. Терентьев П. В. Применение метода итераций в количественном учете животных // Применение математических методов в биологии. Л. : Изд-во ЛГУ, 1964. С. 105–110.
34. Maslov A. A. Small-scale patterns of forest plants and environmental heterogeneity // *Vegetatio*. 1989. Vol. 84, iss. 1. P. 1–7. DOI: 10.1007/bf00054661
35. Xiaobing Dai, Maarel van der E. Transect-based patch size frequency analysis // *Journal of Vegetation Science*. 1997. Vol. 8, iss. 6. P. 865–872. DOI: 10.2307/3237031
36. Kershaw K. A. The Use of Cover and Frequency in the Detection of Pattern in Plant Communities // *Ecology*. 1957. Vol. 38, iss. 2. P. 291–299. DOI: 10.2307/1931688
37. Нешатаев Ю. Н. Методы анализа геоботанических материалов. Л. : Изд-во ЛГУ, 1987. 192 с.
38. Didukh Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv : Phytosociocentre, 2011. 176 p.
39. Маслов А. А. К оценке параметров экологических ниш лесных растений при помощи индикационных шкал // Перспективы теории фитоценологии. Тарту : Изд-во АН ЭССР, 1988. С. 105–110.
40. Persson S. Ecological indicator values as an aid in the interpretation of ordination diagrams // *Journal of Ecology*. 1981. Vol. 69, iss. 1. P. 71–84. DOI: 10.2307/2259816
41. Legendre L., Legendre P. Numerical ecology. Amsterdam : Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
42. McCune B., Grace J. B. Analysis of Ecological Communities. Gleneden Beach, Oregon: MjM SoftWare Design, 2002. 300 p.
43. McLachlan G. J. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. Wiley-Interscience: Hoboken, 2004. 580 p.

**Образец для цитирования:**

Назаренко Н. Н., Малаев А. В., Пирожженкова А. В., Байда Н. А. Мозаичность естественных галофитных экосистем на границе лесостепной и степной зон Южного Урала // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 465–476. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-465-476>



## Patterns in Natural Halophytic Grasslands at the Border of Forest-Steppe and Steppe Zones of South Ural

**N. N. Nazarenko, A. V. Malaev,  
A. V. Pirozhenkova, N. A. Bayda**

Nazar N. Nazarenko, <https://orcid.org/0000-0002-2425-3649>, South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 48 Bazhova St., Chelyabinsk 454074, Russia, nnazarenko@hotmail.com

Aleksandr V. Malaev, <https://orcid.org/0000-0001-9192-2817>, South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 48 Bazhova St., Chelyabinsk 454074, Russia, malaev2@mail.ru

Alla V. Pirozhenkova, <https://orcid.org/0000-0001-5684-1835>, South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 48 Bazhova St., Chelyabinsk 454074, Russia, allapirozhenkova@mail.ru

Natalya A. Bayda, <https://orcid.org/0000-0002-3627-958X>, South Ural State Humanitarian Pedagogical University, 48 Bazhova St., Chelyabinsk 454074, Russia, bayda.natashenka@mail.ru

The patterns (mosaicity) in natural halophytic grasslands at the border of Forest-steppe and Steppe zones of South Ural were characterized by the hierarchical continuum concept theory for the Troitskiy state natural complex preserve example. It was established, that the grass canopy is fragmented by salinization impact, the individual's random distribution is typical of halophytes and salt-tolerant steppe species form patterns. Only the micro-patterns (0,8 m) level is statistically significant, parcels (8 m) and coenotics (12 m) are fuzzy and fragmentation of mosaicity is observed. There are two coenotics series defined for parcels – halophytic and steppe, relating to the distribution of halophytes and steppe grasses respectively. There is clear coenosis. Separation is observed by phytodiversity and biotopes descriptions. The intracoenotic interactions between species, soil moistening variability, soil aeration and acidity (alkalinity) and soil mineralization increase (decrease) are significant for parcels and coenosis forming.

**Keywords:** mosaicity, biotopes, phytochorologic units, halophilic grassland vegetation of South Ural, Troitskiy state natural complex preserve, Chelyabinsk region.

Received: 04.04.2020 / Accepted: 03.06.2020 / Published: 30.11.2020

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

## References

- Fardeeva M. B., Islamova G. R., Chizhikova N. A. Analysis of Spatial-Temporal Plant Structure on the Basis of Informational-Statistical Approaches. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Estestvennye Nauki*, 2008, vol. 150, no. 4, pp. 226–240 (in Russian).
- Mirkin B. M., Rozenberg G. S. Analysis of mosaics of herbaceous plant communities. 1. Population level. *Biologicheskie nauki*, 1976, no. 12, pp. 127–134 (in Russian).
- Mirkin B. M., Rozenberg G. S. Analysis of mosaics of herbaceous plant communities. 2. Coenotic level. *Biologicheskie nauki*, 1977, no. 2, pp. 121–126 (in Russian).
- Cenopopulyacii rastenij (razvitie i vzaimootnosheniya)* [Plant coenopopulations (development and relationships)]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 213 p. (in Russian)
- Cenopopulyacii rastenij (ocherki populyacionnoj biologii)* [Plant coenopopulations (essays on population biology)]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 181 p. (in Russian).
- O'Neil R. V., Anders D. L. de, Waide J. B., Allen T. F. H. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1986. 153 p.
- Austin M. P., Smith T. M. A new model for the continuum concept. *Vegetatio*, 1989, vol. 83, no. 1–2, pp. 35–47. DOI: 10.1007/bf00031679
- Collins S. L., Glenn S. M., Roberts D. W. The hierarchical continuum concept. *Journal of Vegetation Science*, 1993, vol. 4, iss. 2, pp. 149–156. DOI: 10.2307/3236099
- Maarel van der E. Pattern and process in plant community: fifty years after A. S. Watt. *Journal of Vegetation Science*, 1996, vol. 7, iss. 1, pp. 19–28. DOI: 10.2307/3236412
- Collins S. L., Glenn S. M., A hierarchical analysis of species' abundance patterns in grassland vegetation. *American Naturalist*, 1990, no. 135, iss. 5, pp. 633–648. DOI: 10.1086/285066
- Martinez K. A., Gibson D. J., Middleton B. A. Core-satellite species hypothesis and native versus exotic species in secondary succession. *Plant Ecology*, 2015, no. 216, iss. 3, pp. 419–427. DOI: 10.1007/s11258-015-0446-z
- Vasilevich V. I. *Statisticheskie metody v geobotanike* [Statistical methods in geobotany]. Leningrad, Nauka, Leningradskoe otd-nie Publ., 1969. 232 p. (in Russian).
- Pelissier R., Goreaud F. A practical approach to the study of spatial structure in simple cases of heterogeneous vegetation. *Journal of Vegetation Science*, 2001, no. 12, pp. 99–108. DOI: 10.2307/3236678
- Maslov A. A. On the joint application of the block method and the Principal Component method for analyzing the mosaic of forest communities. 1. The allocation of the axes. *Byulleten' MOIP. Otdel Biologicheskij*, 1983, vol. 88, iss. 6, pp. 73–79 (in Russian).
- Maslov A. A. On the joint application of the block method and the Principal Component method for analyzing the mosaic of forest communities. 2. Identification of axes by environmental factors. *Byulleten' MOIP. Otdel Biologicheskij*, 1985, vol. 90, iss. 4, pp. 107–117 (in Russian).
- Maslov A. A. *Kolichestvennyj analiz gorizont'noj struktury lesnyh soobshchestv* [Quantitative analysis of the horizontal structure of forest communities]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 160 p. (in Russian).
- Zaugolnova L. B. Hierarchical approach to the analysis of forest vegetation of small river basin (with special reference of the Prioksko-Terrasny reserve). *Botanicheskij Zhurnal*, 1999, vol. 84, no. 8, pp. 42–56 (in Russian).
- Zaugolnova L. B., Istomina I. I., Tihonova E. V. Analysis of vegetation of a forest Catena in antropogenic landscape (on the example of the river basin of Gilyetovki, Podolsk district, Moscow region). *Byulleten' Moskovskogo Obschestva Ispytatelei Prirody, Otdel Biologicheskii*, 2000, vol. 105, iss. 4, pp. 42–52 (in Russian).
- Ogureeva G. N., Miklyaeva I. M., Bocharnikov M. V., Dudov S. V., Tuvshintoghtog I., Zhargalsajhan L. The





- spatial organization and diversity of eastern Mongolian steppes. *Arid Ecosystems*, 2011, vol. 1, iss. 1, pp. 29–37. DOI: 10.1134/S2079096111010070
20. Gornov A. V. The specific properties of the horizontal structure of the forest meadows in the Nerussa-Desna Polesye. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1 (5), pp. 1219–1222 (in Russian).
21. Kholboeva S. A., Namzalov B. B., Tsyrenova M. G. Features of the spatial organization of forest-steppe vegetation in a valley of Dzhida River (Western Transbaikalia). *Arid Ecosystems*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 165–171. DOI: 10.1134/s2079096113030049
22. Leonova N. A., Krupenina M. M. Spatial dynamics of Prisursky Oak Grove. *University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, 2018, no. 3 (23), pp. 92–97 (in Russian). DOI: 10.21685/2307-9150-2018-3-7
23. Belyaev A. Yu., Vasfilova E. S. Features of the clonal structure and some characteristics of licorice clones in populations in the Southern Urals and the Urals. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2010, no. 5 (111), pp. 87–93 (in Russian).
24. Ulanova N. G., Maslov A. A. Multivariate analysis of the horizontal vegetation structure of a glade. *Botanicheskii Zhurnal*, 1989, vol. 74, no. 9, pp. 1316–1323 (in Russian).
25. Nazarenko N. N., Perlov E. D. Patterns in grassland vegetation of Bredinskiy state natural wildlife preserve. *Samara Journal of Science*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 85–93 (in Russian). DOI: 10.24411/2309-4370-2018-14115
26. Potapova N. A., Nazyrova R. I., Zabelina N. M., Isaeva-Petrova L. S., Korotkov V. N., Ochagov D. M. *Svodnyi spisok osobo ohranyaemykh prirodnykh territorij Rossijskoi Federatsii (spravochnik)* [General list of specially protected natural territories of the Russian Federation (reference book), part II]. Moscow, VNIIPrirody, 2006. 364 p. (in Russian).
27. Gashek V. A., Zaharov V. D. Avifauna of the Troitsk Nature Reserve (the Chelyabinsk region). *Fauna of the Urals and Siberia*, 2018, no. 1, pp. 163–183 (in Russian). DOI: 10.24411/2411-0051-2018-10115
28. Antonova L. A. [The contribution of professor A. N. Ponomarev to development of botanical researches to Troitsk forest-steppe reserve (to the 100<sup>th</sup> birthday 1906–2006)]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya*, 2008, no. 9 (25), pp. 111–114 (in Russian).
29. Kolesnikov B. P. *Rastitel'nost' Chelyabinskoy oblasti. Priroda Chelyabinskoy oblasti* [Vegetation of the Chelyabinsk region. Nature of the Chelyabinsk region]. Chelyabinsk, Yuzh-Ural. kn. izd-vo, 1964, pp. 135–158 (in Russian).
30. Ramenskij L. G. Uchet i opisaniye rastitel'nosti (na osnove proektivnogo metoda) [Inventory and description of vegetation (based on the projective method)]. In: *Izbranye raboty – problemy i metody izucheniya rastitel'nogo pokrova* [Selected proceeding – problems and methods of studying vegetation cover]. Leningrad, Nauka, Leningradskoe otd-nie, 1971, pp. 57–105 (in Russian).
31. Smirnova O. V. Ob'em schetnoj edinicy pri izuchenii cenopopulyacij rastenij razlichnykh biomorf [The volume of the counting unit in the study of plant coenopopulations of various biomorphs]. In: *Cenopopulyacii rastenij (Osnovnye ponyatiya i struktura)* [Plant coenopopulations (basic concepts and structure)]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 72–80 (in Russian).
32. Smirnova O. V. *Struktura travyanogo pokrova shirokolistvennykh lesov* [The structure of the herbaceous cover of broad-leaved forests]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 208 p. (in Russian).
33. Terent'ev P. V. Primenenie metoda iteracij v kolichestvennom uchete zhitovnykh [Application of the iteration method in the quantitative accounting of animals]. In: *Primenenie matematicheskikh metodov v biologii* [Application of mathematical methods in biology]. Leningrad, Izd-vo LGU, 1964, pp. 105–110 (in Russian).
34. Maslov A. A. Small-scale patterns of forest plants and environmental heterogeneity. *Vegetatio*, 1989, vol. 84, iss. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1007/bf00054661
35. Xiaobing Dai, Maarel van der E. Transect-based patch size frequency analysis. *Journal of Vegetation Science*, 1997, vol. 8, iss. 6, pp. 865–872. DOI: 10.2307/3237031
36. Kershaw K. A. The Use of Cover and Frequency in the Detection of Pattern in Plant Communities. *Ecology*, 1957, vol. 38, iss. 2, pp. 291–299. DOI: 10.2307/1931688
37. Neshataev Yu. N. *Metody analiza geobotanicheskikh materialov* [Methods for geobotanical materials analyzing]. Leningrad, Izd-vo LGU, 1987. 192 p. (in Russian).
38. Didukh Ya. P. *The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication*. Kyiv, Phytosociocentre, 2011. 176 p.
39. Maslov A. A. K otsenke parametrov ekologicheskikh nish lesnykh rastenii pri pomoshchi indikatsionnykh shkal [Assess the parameters of ecological niches of forest plants using indicator scales]. In: *Perspektivy teorii fitocenologii* [Prospects of the theory of phytocenology]. Tartu, Izd-vo AN ESSR, 1988, pp. 105–110 (in Russian).
40. Persson S. Ecological indicator values as an aid in the interpretation of ordination diagrams. *Journal of Ecology*, 1981, vol. 69, iss. 1, pp. 71–84. DOI: 10.2307/2259816
41. Legendre L., Legendre P. *Numerical Ecology*. Amsterdam, Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
42. McCune B., Grace J. B. *Analysis of Ecological Communities*. Glenden Beache, Oregon, MjM SoftWare Design, 2002. 300 p.
43. McLachlan G. J. *Discriminant analysis and statistical pattern recognition*. Wiley-Interscience, Hoboken, 2004. 580 p.

#### Cite this article as:

Nazarenko N. N., Malaev A. V., Pirozhenkova A. V., Bayda N. A. Patterns in Natural Halophytic Grasslands at the Border of Forest-Steppe and Steppe Zones of South Ural. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 465–476 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-465-476>

## PERSONALIA

## Юбилей Светланы Петровны Муштаковой

Светлана Петровна Муштакова – доктор химических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заведующий кафедрой общей и неорганической химии с 1988 по 2017 г., проректор по учебной работе Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского с 1996 по 2003 г. Светлана Петровна – известный в широких кругах российской научной общественности ученый-аналитик, активно работающий в области разработки спектроскопических методов анализа с использованием методов компьютерного прогнозирования свойств и многомерных методов обработки данных.



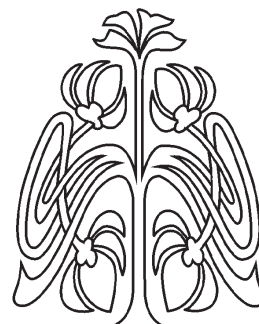
С. П. Муштакова родилась 8 октября 1945 г. в г. Саратове. В 1963 г. окончила с золотой медалью школу № 21 г. Сызрани и поступила на химический факультет Саратовского государственного университета (СГУ). С первого курса Светлана Петровна начала активно заниматься научной работой на кафедре аналитической химии под руководством старшего научного сотрудника Н. С. Фруминой. Начиная со студенческих лет Светлана Петровна активно занималась общественной работой, принимала участие в художественной самодеятельности факультета.

По окончании обучения Светлана Петровна получила диплом с отличием и по распределению в 1968 г. была принята на должность старшего научного сотрудника в отдел аналитической химии НИИ Химии СГУ. Важным этапом научного становления Светланы Петровны стала трехлетняя стажировка в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН СССР под руководством профессора Л. А. Грибова. В 1972 г. Светлана Петровна успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Изучение электронного строения дифениламина и его замещенных методами электронной спектроскопии и квантовой химии».

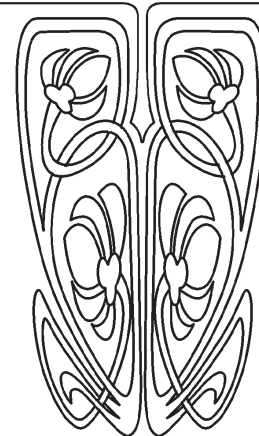
В 1976–1987 гг. работала доцентом кафедры аналитической химии, одновременно в этот период выполняла обязанности заместителя декана химического факультета СГУ.

В 1987 г. защитила докторскую диссертацию «Теория действия и применение органических редокс-реагентов ряда дифениламина в спектрофотометрическом анализе» в Совете ГЕОХИ РАН (г. Москва), в 1988 г. получила ученое звание профессора.

С 1988 по 2017 г. профессор С. П. Муштакова являлась заведующим кафедрой общей и неорганической химии СГУ, а с 1996 по 2003 г. – проректором по учебной работе СГУ. Организованность и четкость работы всегда отличали деятельность Светланы Петровны на ответственных постах. За успехи в работе она награждена медалью «За трудовую доблесть», знаками «Почетный



ПРИЛОЖЕНИЯ





работник высшего профессионального образования» и «Изобретатель СССР», грамотами Минобрнауки РФ, ЦК ВЛКСМ, губернатора Саратовской области.

С. П. Муштаковой создано новое научное направление химического факультета СГУ, связанное с применением методов компьютерного моделирования химических систем.

На кафедре общей и неорганической химии С. П. Муштаковой и сотрудниками проведены систематические исследования по прогнозированию свойств, спектрально-аналитических характеристик и направлений рационального применения в анализе окислительно-восстановительных органических реагентов на основе теоретического и экспериментального исследования конформационных возможностей, электронного строения и механизма реакции окисления в различных средах.

Исследования взаимосвязей строение–свойство для ряда молекул ароматических аминов на основе квантово-химического моделирования легли в основу разработки теоретического подхода к прогнозированию свойств ароматических аминов и позволили предсказать, оптимизировать и реализовать на практике методики каталитического определения ионов металлов редкой платиновой группы и золота в слабокислой среде в сложных матрицах.

В 2008 г. под руководством Светланы Петровны начаты работы, связанные с применением хемометрических методов обработки данных для спектрометрических методов анализа. Проведенные исследования позволили разработать методологию многомерного анализа для качественного и количественного анализа объектов сложного состава методами ЯМР, ИК и электронной спектроскопии. Хемометрические методы положены в основу разработки методик оценки подлинности продуктов питания, спиртных напитков, лекарственных препаратов и др.

Светлана Петровна является автором более 450 научных публикаций, в том числе монографии «Аналитическая химия кальция» (изд-во «Наука», Москва), учебника «Квантовая химия» в

соавторстве с профессором Л. А. Грибовым (гриф Минобрнауки РФ), 16 авторских свидетельств.

Исследования профессора С. П. Муштаковой и сотрудников были поддержаны грантами ИНТАС (1998–1999), РФФИ (1998–2000 и 2000–2003), Минобрнауки России (2013), Российского научного фонда (2018–2021), а также индивидуальными грантами от Международной Соросовской программы (1994–1995, 1998), Президента РФ «Молодые кандидаты и их научные руководители» (2004–2005, 2016–2017).

Светлана Петровна – талантливый высококвалифицированный педагог, руководитель 16 кандидатских и научный консультант 2 докторских диссертаций. В период работы на кафедре общей и неорганической химии С. П. Муштаковой были разработаны общий курс «Квантовая механика и квантовая химия», специальные курсы «Элементы теории групп и ее приложение в химии», «Спектроскопические методы исследования соединений». Новаторство с учетом специфики преподаваемых курсов всегда отличало преподавательскую деятельность Светланы Петровны. Так, модульная система оценки была внедрена изначально при преподавании курса «Квантовая механика и квантовая химия» и ее успешно используют и в настоящее время.

Светлана Петровна пользуется заслуженным авторитетом и уважением научной общности, коллег и учеников. Требовательность к себе и ученикам, доброжелательность и скромность – характерные качества Светланы Петровны.

*С юбилеем, глубокоуважаемая  
Светлана Петровна!  
Доброго Вам здоровья и успехов  
во всех начинаниях!*

*Н. А. Бурмистрова,  
доктор химических наук, доцент,*

*Ю. Б. Монахова,  
доктор химических наук,*

*сотрудники кафедры общей и неорганической химии Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского*