

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

№ 3 (35)

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

- Кириллова И. Г., Макеева И. Ю.** Действие регуляторов роста с антиоксидантными свойствами на биохимические показатели клубней растения картофеля 3
- Тарасов С. С., Веселов А. П.** Окислительный гомеостаз прорастающих семян пшеницы в зависимости от продолжительности ультразвукового воздействия 13
- Соболева О. М., Кондратенко Е. П.** Влияние СВЧ-обработки на относительную засухоустойчивость яровых и озимых злаков 27

БОТАНИКА

- Таймазова Н. С., Муслимов М. Г.** Изучение солеустойчивости районированных в Дагестане сортов озимой пшеницы по морфометрическим показателям 36
- Кузьменко И. Н., Колясникова Н. Л.** Особенности семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) в Предуралье 45

ЗООЛОГИЯ

- Фролова Е. Н., Гапонов С. П.** Описание фolidоза *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva в бассейне Среднего Дона 56

ЭКОЛОГИЯ

- Бархатов А. С., Снегин Э. А.** Фенотипическая структура популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности 68
- Асанов А. Ю.** Некоторые особенности способа оценки численности рыб в малых водных объектах с помощью подводной видеокамеры 85
- Сотникова Ю. М., Федяев В. В., Григориади А. С., Гарипова М. И., Махмутов А. Р., Галин И. Р., Новоселова Е. И., Ямалеева А. А., Фархутдинов Р. Г.** Оценка фиторемедиационного потенциала сельскохозяйственных растений при нефтяном загрязнении почвы 99

UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION

NATURAL SCIENCES

№ 3 (35)

2021

CONTENTS

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF PLANTS

- Kirillova I.G., Makeeva I.Yu.* The effect of growth regulators with antioxidant properties on the biochemical parameters of potato plant tubers 3
- Tarasov S.S., Veselov A.P.* Oxidative homeostasis of germinating wheat seeds depending on the ultrasonic effect's duration 13
- Soboleva O.M., Kondratenko E.P.* The effect of microwave treatment on the relative drought resistance of spring and winter cereals 27

BOTANY

- Taymazova N.S., Muslimov M.G.* The study of salt resistance of winter wheat varieties zoned in Dagestan according to morphometric indicators 36
- Kuzmenko I.N., Kolyasnikova N.L.* The features of seed productivity of *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) in the Preduralye region 45

ZOOLOGY

- Frolova E.N., Gaponov S.P.* Description of *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva pholidosis in the Middle Don's basin 56

ECOLOGY

- Barkhatov A.S., Snegin E.A.* Phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex population in urbanized landscapes in the South Central Russian Upland 68
- Asanov A.Yu.* The method's features for assessing the number of fish in small reservoirs and watercourses using an underwater video camera 85
- Sotnikova Yu.M., Fedyaev V.V., Grigoriadi A.S., Garipova M.I., Makhmutov A.R., Galin I.R., Novoselova E.I., Yamaleeva A.A., Farkhutdinov R.G.* Assessment of the agricultural plants' phytoremediation potential under oil pollution of the soil 99

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF PLANTS

УДК 581.1:635.21:631.6:547.56
doi:10.21685/2307-9150-2021-3-1

Действие регуляторов роста с антиоксидантными свойствами на биохимические показатели клубней растения картофеля

И. Г. Кириллова¹, И. Ю. Макеева²

^{1,2}Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Орел, Россия
¹kirillovairinai@gmail.com, ²makeevainna@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последнее время значительное внимание уделяется изучению механизма действия синтетических и природных регуляторов роста на элементы продукционного процесса растений. Одним из возможных путей регуляции физиологических процессов является применение физиологически активных соединений, обладающих антиоксидантной активностью. Целью настоящего исследования было изучение действия синтетических регуляторов роста – антиоксиданта амбиола и «Энергии-М», а также природного антиоксиданта – кофейной кислоты на биохимические показатели клубней растения картофеля. *Материалы и методы.* В качестве объекта исследования использованы растения картофеля сорта Жуковский ранний селекции ВНИИ КХ (Коренёво, Россия) и сорта Вега (Norika, Германия). Растения выращивали в почвенной культуре в условиях вегетационного домика. Обработку синтетическими регуляторами проводили путем замачивания посадочных клубней в водных растворах амбиола – 60 мг/л, «Энергия-М» – 100 мг/л в течение 2 ч. Обработку растений 0,1 мМ раствором кофейной кислоты проводили путем опрыскивания через 15 сут после появления всходов. Контрольные растения обрабатывали водой. Концентрацию сахарозы определяли биохимическим методом с использованием резорцинового реактива, содержание крахмала – по методу Эверса, содержание белка – по методу Кьельдаля, содержание зольных элементов и клетчатки – по методике Ермакова, определение аскорбиновой кислоты – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. *Результаты.* Обработка регуляторами роста повысила содержание крахмала в клубнях растений: под действием амбиола и «Энергии-М» на 10 % (сорт Вега), под действием кофейной кислоты – на 12 % (сорт Жуковский ранний) по сравнению с контролем. Одновременно показано увеличение концентрации сахарозы в клубнях под влиянием изучаемых антиоксидантов у обоих сортов картофеля. Большой эффект проявил регулятор роста «Энергия-М», увеличение составило почти 30 % (на примере сорта картофеля Вега) против контроля. Напротив, содержание другого полисахарида – целлюлозы – под действием кремнеукусина «Энергия-М» снизилось на 18 % у картофеля сорта Вега. Антиоксидант амбиол и «Энергия-М» увеличили содержание белка в клубнях картофеля сорта Вега на 44 и 15 % соответственно. Вышеуказанные синтетические регуляторы роста значительно повысили также содержание зольных элементов в клубнях: амбиол – на 57 %,

Энергия-М – на 50 % против контроля. Обработка растений природным антиоксидантом кофейной кислотой способствовала значительному накоплению аскорбиновой кислоты в клубнях картофеля сорта Жуковский ранний. Увеличение составило приблизительно в 2 раза по сравнению с контролем. *Выводы.* Таким образом, проведенное исследование по действию регуляторов роста с антиоксидантными свойствами амбиола, «Энергии-М» и кофейной кислоты на растения картофеля позволили выявить их эффективность в отношении качественных показателей клубней. Отмечена интенсификация полимеризации, что сказалось на увеличении содержания крахмала (на примере обоих изученных сортов) и белка (сорт Вега). Вероятно, это увеличение связано с действием индолилуксусной кислоты в клубнях. Увеличение зольности клубней сорта Вега, возможно, обусловлено усилением активного транспорта ионов через мембрану клеток запасующей ткани клубня за счет активизации транспортных АТФ-аз под действием ауксинов. Анализ полученных результатов по действию регуляторов роста с антиоксидантными свойствами позволяет рекомендовать вышеуказанные физиологически активные соединения (амбиол, «Энергия-М» и кофейная кислота) практикам картофелеводства с целью улучшения качественного состава клубней.

Ключевые слова: регуляторы роста, антиоксиданты, амбиол, Энергия-М, кофейная кислота, качественный состав клубней, картофель

Для цитирования: Кириллова И. Г., Макеева И. Ю. Действие регуляторов роста с антиоксидантными свойствами на биохимические показатели клубней растения картофеля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 3–12. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-1

The effect of growth regulators with antioxidant properties on the biochemical parameters of potato plant tubers

I.G. Kirillova¹, I.Yu. Makeeva²

^{1,2}Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

¹kirillovairinai@gmail.com, ²makeevainna@inbox.ru

Abstract. *Background.* Recently, considerable attention has been paid to the study of the mechanism of synthetic and natural growth regulators' action on the elements of the plant production process. One of the possible ways to regulate physiological processes is the use of physiologically active compounds with antioxidant activity. The purpose of this research is to study the effect of synthetic growth regulators – the antioxidant ambiol and Energia-M, as well as the natural antioxidant – caffeic acid on the biochemical parameters of potato plant tubers. *Materials and methods.* Potato plants of the Zhukovsky Early variety selected by All-Russian Research Institute of Potato Farming (Korenevo, Russia) and the Vega variety (Norika, Germany) were used as the object of research. The plants were grown in a soil culture in the conditions of a growing house. Treatment with synthetic regulators was carried out by soaking the planting tubers in aqueous solutions of ambiol – 60 mg/l, “Energy-M” – 100 mg/l for 2 hours. Treatment of plants with 0.1 mM solution of caffeic acid was carried out by spraying 15 days after the emergence of seedlings. Control plants were treated with water. The concentration of sucrose was determined by the biochemical method using resorcinol reagent, the starch content – by the Evers method, the protein content – by the Kjeldahl method, the content of ash elements and fiber – by the Ermakov method, the determination of ascorbic acid – by the HPLC method. *Results.* Treatment with growth regulators increased the starch content in plant tubers: under the action of ambiol and Energia-M by 10 % (Vega variety), under the action of caffeic acid – by 12 % (Zhukovsky early variety) compared to the control. At the same time, an increase in the concentration of sucrose in tubers under the influence of the studied antioxidants was

shown in both potato varieties. A greater effect was shown by the growth regulator “Energia-M”, an increase of almost 30 % (for example, the Vega potato variety) against the control. On the contrary, the content of another polysaccharide – cellulose under the action of siliceauxin “Energia-M” decreased by 18 % in Vega potatoes. The antioxidant ambiol and Energia-M increased the protein content in the tubers of the Vega potato variety by 44 and 15 %, respectively. The above-mentioned synthetic growth regulators also significantly increased the content of ash elements in tubers: ambiol – by 57 %, Energia-M – by 50 % against the control. Treatment of plants with the natural antioxidant caffeic acid contributed to a significant accumulation of ascorbic acid in potato tubers of the Zhukovsky early variety. The increase was approximately 2 times compared to the control. *Conclusions.* Thus, the study on the effect of growth regulators with antioxidant properties of ambiol, “Energia-M” and caffeic acid on potato plants revealed their effectiveness in relation to the quality indicators of tubers. An intensification of polymerization was noted, which resulted in an increase in the starch content (on the example of both studied varieties) and the protein content (Vega variety). This increase is probably due to the action of IAA in tubers. The increase in the ash content of Vega tubers is probably due to the increased active transport of ions through the cell membrane of the storage tissue of the tuber due to the activation of transport ATPase under the action of auxins. The analysis of the obtained results on the action of growth regulators with antioxidant properties allows us to recommend the above physiologically active compounds (ambiol, “Energia-M” and caffeic acid) to potato growing practitioners in order to improve the quality of the tuber composition.

Keywords: growth regulators, antioxidants, ambiol, “Energia-M”, caffeic acid, qualitative composition of tubers, potatoes

For citation: Kirillova I.G., Makeeva I.Yu. The effect of growth regulators with antioxidant properties on the biochemical parameters of potato plant tubers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennyye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):3–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-1

Введение

Одним из возможных механизмов регуляции продукционного процесса растений является применение регуляторов роста, которые, как известно, позволяют наиболее полно использовать потенциальные возможности роста растений в нужном направлении, а также повышать устойчивость растений к действию стрессовых факторов [1–2]. К синтетическим регуляторам роста с антиоксидантными свойствами относятся амбиол (производное пуриновых оснований) и «Энергия-М» (кремнеауксин, где кремний находится в биологически активной форме). В литературе имеются сведения, что регулятор роста амбиол положительно влияет на рост и продуктивность картофеля [1]. В отношении кремнийорганического регулятора роста «Энергия-М» в литературе есть указания, что обработка данным регулятором роста растений увеличивает содержание крахмала, клейковины в зерновках, повышает активность антиоксидантных ферментов и, как следствие, продуктивность растений [3–6]. Показано также, что соединение фенольной природы – кофейная кислота, относящаяся к гидроксокоричным кислотам, обладает антиоксидантными функциями [7]. В литературе отмечается стимулирование фотохимической активности хлоропластов и чистой продуктивности фотосинтеза растений картофеля под действием кофейной кислоты, повышение вододерживающей способности листьев и интенсивности транспирации, уменьшение содержания продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) у растений, обогащенных кофейной кислотой, в стрессовых условиях [8–9]. Однако

данных по влиянию кофейной кислоты на физиолого-биохимические показатели, в частности картофеля, все еще недостаточно.

В связи с вышесказанным целью данной работы являлось изучение действия биологически активных органических соединений (амбиола, «Энергии-М» и кофейной кислоты) на качественный состав клубней картофеля. В задачи исследования входило изучение влияния данных регуляторов на содержание крахмала, сахарозы, белка, клетчатки, зольных элементов и аскорбиновой кислоты в клубнях картофеля.

Материалы и методы

Объектом исследования были растения картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Жуковский ранний селекции ВНИИ КХ (Коренёво, Россия) и сорта Вега (Norika, Германия). Растения выращивали в почвенной культуре на серой лесной среднесуглинистой почве в условиях типового вегетационного домика площадью 180 м² на агробиостанции Орловского госуниверситета. В сосуде с 10 кг почвы выращивали одно растение и поддерживали влажность почвы на уровне 60 % от полной влагоемкости. В период закладки опытов в почву вносили оптимальное количество азота, фосфора и калия 230, 70, 310 мг элемента на 1 кг почвы соответственно.

Обработку синтетическими регуляторами проводили путем замачивания посадочных клубней в водных растворах амбиола – 60 мг/л, «Энергия-М» – 100 мг/л в течение 2 ч. Контрольные клубни замачивали в воде. Обработку растений 0,1 мМ раствором кофейной кислоты («Sigma», США) проводили путем опрыскивания растений через 15 сут после появления всходов. Контрольные растения опрыскивали водой.

Концентрацию сахарозы определяли биохимическим методом с использованием резорцинового реактива [10]. Содержание крахмала определяли по методу Эверса, содержание белка – по методу Кьельдаля [11], содержание зольных элементов и клетчатки – по методике Ермакова [12]. Определение аскорбиновой кислоты проводили методом ВЭЖХ с использованием хроматографа «Милихром А-02».

Исследование клубней проводили через неделю после снятия почвенной культуры. Клубни хранились при температуре 3–4 °С в контейнерах.

На рисунках представлены средние арифметические из пяти биологических повторностей и их стандартные ошибки. Достоверность результатов оценивали с помощью критерия Стьюдента, считая достоверными различия при уровне доверительной вероятности выше 0,95 [13].

Результаты и обсуждение

Как показали исследования, обработка регуляторами роста положительно сказалась на содержании крахмала в клубнях растений. Так, содержание этого углевода в изучаемом сорте Вега под действием амбиола и «Энергии-М» возросло на 10 %, под действием кофейной кислоты – на 12 % у растений картофеля сорта Жуковский ранний по сравнению с контролем (рис. 1). Вероятно, увеличение содержания крахмала под действием изучаемых регуляторов роста связано с действием фитогормона – индолилуксусной кислоты (ИУК). Ранее нами показано, что антиоксиданты амбиол и кофейная кислота способствовали увеличению содержания данного фитогормона в органах картофеля [7, 14].

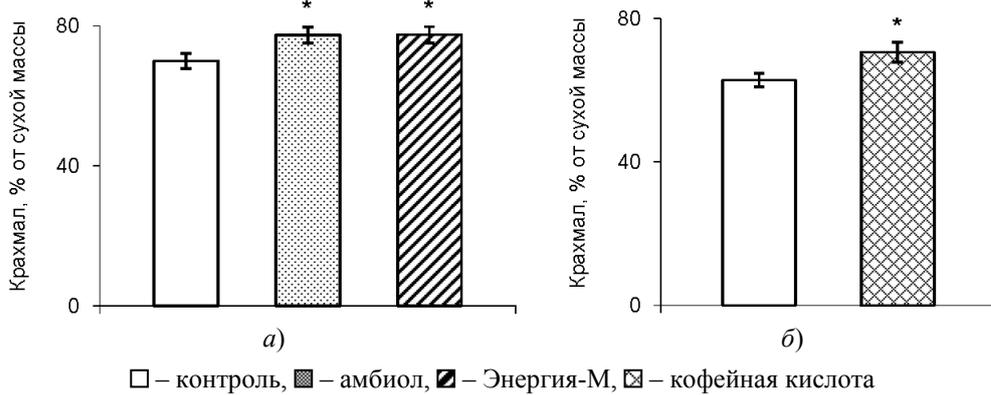


Рис. 1. Действие регуляторов роста на содержание крахмала в клубнях картофеля сорта Вега (а) и сорта Жуковский ранний (б)

Примечание. * – достоверные отличия от контроля при 95 % уровне значимости.

В литературе имеются данные, что ИУК стимулирует перевод осмотически активных соединений в полимерные, что может способствовать усилению направленного транспорта ассимилятов в запасующие органы – клубни [15]. Что касается влияния кремнеауксина «Энергия-М», то экзогенный ауксин, входящий в состав данного регулятора роста, также может оказывать аналогичный эффект.

Определение содержания сахарозы – основной транспортной формы ассимилятов – показало увеличение ее концентрации под влиянием изучаемых антиоксидантов (рис. 2). Положительный эффект отмечен у всех изученных сортов картофеля, при этом более эффективным оказался регулятор роста «Энергия-М», увеличение содержания сахарозы в данном варианте составило почти 30 %. Возрастание содержания сахарозы, вероятно, связано с действием гормонов-ауксинов, которые, как известно, обладают аттрагирующим действием.

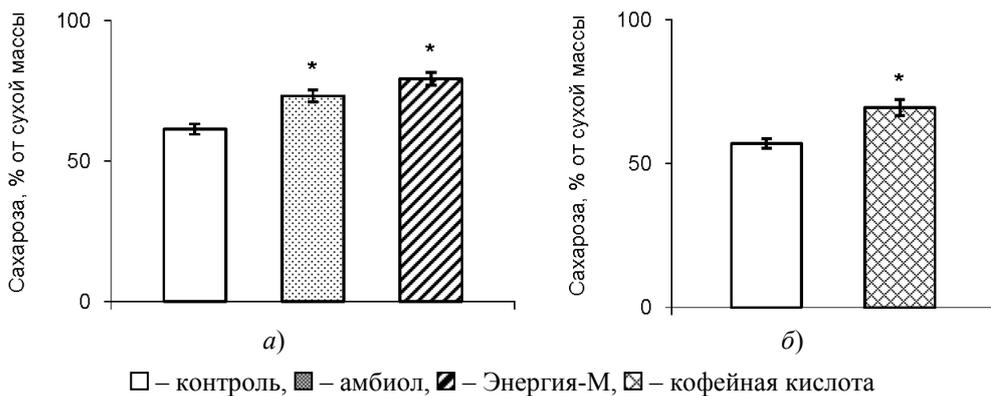


Рис. 2. Влияние регуляторов роста на содержание сахарозы в клубнях картофеля сорта Вега (а) и сорта Жуковский ранний (б)

Примечание. * – достоверные отличия от контроля при 95 % уровне значимости.

Определение содержания сырой клетчатки в клубнях показало несколько иную картину. Не выявлено положительного эффекта амбиола в отношении содержания целлюлозы в клубнях. Вместе с тем отмечено снижение количества данного полисахарида на 18 % при действии регулятора роста «Энергия-М» (табл. 1). По литературным данным [17], в картофеле содержится от 0,52 до 1,77 % клетчатки по сырой массе. Известно, что чем выше содержание клетчатки, тем более утолщены клеточные стенки клеток запасочной ткани клубней картофеля, что может затруднять их дальнейшую переработку с целью получения крахмала.

Таблица 1
Действие синтетических регуляторов роста на качественные показатели клубней растения (сорт Вега), % от сухой массы

Вариант	Клетчатка	Зольные элементы	Белок
Контроль	8,4 ± 0,5	2,8 ± 0,1	2,7 ± 0,1
Амбиол	7,4 ± 0,4	4,4 ± 0,2*	3,9 ± 0,2*
«Энергия-М»	6,9 ± 0,3*	4,2 ± 0,2*	3,1 ± 0,1*

Примечание. * – достоверные отличия от контроля при 95 % уровне значимости.

Изучаемые синтетические регуляторы роста значительно повысили содержание зольных элементов в клубнях приблизительно в равной степени: амбиол – на 57 %, «Энергия-М» – на 50 % против контроля (табл. 1). Наши данные в отношении кремнеауксина согласуются с другими исследованиями [5]. Повышение зольности клубней может быть следствием более активного транспорта ионов через мембраны клеток клубней под действием ИУК. Как известно, ИУК активизирует работу АТФ-аз.

Вместе с тем ценность картофеля определяется не только наличием в клубнях углеводов, но и содержанием азотистых веществ, главным образом, белков. Содержание белка в клубнях – это важный качественный показатель, поскольку среди всех растительных белков именно белки картофеля являются наиболее ценными, что определяется наличием незаменимых аминокислот. По нашим данным, амбиол и «Энергия-М» увеличили содержание белка в клубнях картофеля на 44 и 15 % против контроля соответственно (табл. 1). В литературе имеются сведения, что кремний влияет на азотный обмен растений. В частности, способствует усвоению азота из почвы, повышает активность фермента нитратредуктазы, что может способствовать биосинтезу аминокислот и, как следствие, биосинтезу белка [16].

Наряду с вышеуказанными биохимическими показателями важным качественным показателем клубней картофеля является содержание аскорбиновой кислоты, которая является природным антиоксидантом. Результаты наших исследований показали, что обработка растений антиоксидантом кофейной кислотой значительно (в 2 раза) повысила концентрацию аскорбиновой кислоты по сравнению с контролем (рис. 3). Механизм влияния кофейной кислоты на содержание аскорбата пока остается не выясненным и требует дальнейшего изучения.

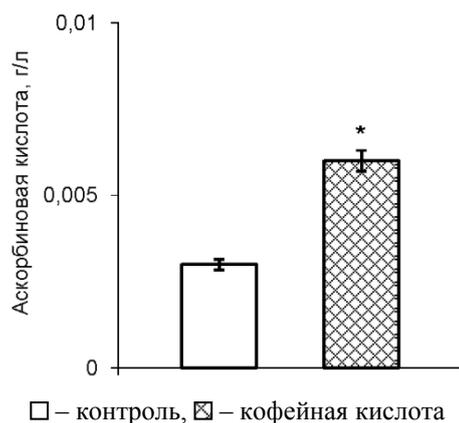


Рис. 3. Влияние кофейной кислоты на содержание аскорбиновой кислоты в клубнях картофеля сорта Жуковский ранний

Примечание. * – достоверные отличия от контроля при 95 % уровне значимости.

Проведенное исследование по действию регуляторов роста с антиоксидантными свойствами амбиола, «Энергии-М» и кофейной кислоты на растения картофеля позволило выявить их эффективность в отношении качественных показателей клубней, а именно: изучаемые регуляторы увеличили содержание крахмала как наиболее ценного полисахарида, что связано с усиленной полимеризацией и интенсификацией транспорта ассимилятов в клубни. Подтверждением этого является увеличение концентрации сахарозы в клубнях под действием всех изученных антиоксидантов. Показано положительное влияние амбиола и кремнеуксина на содержание белка и зольность клубней картофеля сорта Вега. Не отмечено существенного эффекта данных регуляторов в отношении содержания целлюлозы в клубнях. Кофейная кислота способствовала накоплению витамина С в клубнях картофеля сорта Жуковский ранний.

Таким образом, анализ полученных результатов по действию физиологически активных веществ с антиоксидантными свойствами позволяет рекомендовать данные соединения (амбиол, «Энергия-М» и кофейная кислота) практикам картофелеводства с целью улучшения качественного состава клубней.

Список литературы

1. Ладыженская Э. П., Платонова Т. А., Евсюнина А. С., Кораблева Н. П. Изменение ростовых процессов в клубнях картофеля (*Solanum tuberosum* L.) под действием природных и синтетических регуляторов роста // *Агрохимия*. 2009. № 9. С. 32–37.
2. Шаповал О. А., Можарова И. П. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве // *Защита и карантин растений*. 2019. № 4. С. 9–14.
3. Самсонова Н. Е., Капустина М. В., Зайцева З. Ф. Влияние соединений кремния и минеральных удобрений на урожайность яровых зерновых культур и содержание в них антиоксидантных ферментов // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 66–74.
4. Самсонова Н. Е., Зайцева З. Ф., Капустина М. В., Антонова Н. А. Влияние соединений кремния и сложного НРК-удобрения на водный режим листьев и урожайность яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2014. № 9. С. 58–66.

5. Козлов А. В., Уромова И. П., Куликова А. Х. Влияние кремнийсодержащих стимуляторов роста на биологическую продуктивность и показатели качества озимой пшеницы и картофеля // Вестник Мининского университета. 2016. Вып. 1. С. 31–42.
6. Кириллова И. Г. Действие кремнийорганического регулятора роста Энергия-М на элементы антиоксидантной системы картофеля // Экобиотех. 2019. Т. 2, № 3. С. 260–264.
7. Пузина Т. И., Макеева И. Ю. Участие кофейной кислоты в регуляции продукционного процесса картофеля *Solanum tuberosum* // Агрохимия. 2015. № 6. С. 63–68.
8. Макеева И. Ю., Пузина Т. И. Участие кофейной кислоты в регуляции физиологических процессов растений картофеля в условиях гипотермии // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2017. № 2. С. 60–65.
9. Макеева И. Ю. Действие кофейной кислоты на показатели водообмена у *Solanum tuberosum* // Повышение эффективности сельскохозяйственной науки в современных условиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Орел : ВНИИЗБК, 2015. С. 92–95.
10. Туркина М. В., Соколова С. В. Изучение мембранного транспорта сахарозы в растительной ткани // Физиология растений. 1972. Т. 19, № 5. С. 9–12.
11. Практикум по агрохимии : учеб. пособие / под ред. В. Г. Минеева. 2-е изд., перераб. и доп. М. : МГУ, 2001. 689 с.
12. Ермаков А. И. Методы биохимического исследования растений. Л. : Агропромиздат, 1987. 430 с.
13. Лакин Г. Ф. Биометрия. М. : Высш. шк., 1990. 113 с.
14. Кириллова И. Г., Евсюнина А. С., Пузина Т. И., Кораблева Н. П. Влияние амбиола и 2-хлорэтилфосфоновой кислоты на содержание фитогормонов в листьях и клубнях картофеля // Прикладная биохимия и микробиология. 2003. Т. 39, № 2. С. 237–241.
15. Роньжина Е. С., Мокронос А. Т. Донорно-акцепторные отношения и участие цитокининов в регуляции транспорта и распределения органических веществ в растениях // Физиология растений. 1994. Т. 41, № 3. С. 448–459.
16. Козлов А. В., Уромова И. П., Фролов Е. А., Мозолева К. Ю. Физиологическое значение кремния в онтогенезе культурных растений и при их защите от фитопатогенов // Международный студенческий научный вестник. Биологические науки. 2015. № 1. С. 39.
17. Плешков Б. П. Биохимия сельскохозяйственных растений. М. : Колос, 1980. 495 с.

References

1. Ladyzhenskaya E.P., Platonova T.A., Evsyunina A.S., Korableva N.P. Change in growth processes in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) under the impact of natural and synthetic growth regulators. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2009;(9):32–37. (In Russ.)
2. Shapoval O.A., Mozharova I.P. Plant growth regulators in agriculture. *Zashchita i karantin rasteniy = Plant protection and quarantine*. 2019;(4):9–14. (In Russ.)
3. Samsonova N.E., Kapustina M.V., Zaytseva Z.F. Impact of silicon compounds and mineral fertilizers on the yield of spring grain crops and the content of antioxidant enzymes in them. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2013;(10):66–74. (In Russ.)
4. Samsonova N.E., Zaytseva Z.F., Kapustina M.V., Antonova N.A. Influence of silicon compounds and complex NPK fertilization on the water regime of leaves and the yield of spring wheat. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2014;(9):58–66. (In Russ.)
5. Kozlov A.V., Uromova I.P., Kulikova A.Kh. Influence of silicon-containing growth stimulants on biological productivity and quality indicators of winter wheat and potatoes. *Vestnik Mininskogo universiteta = Bulletin of Minin University*. 2016;(1):31–42. (In Russ.)
6. Kirillova I.G. The action of the organosilicon growth regulator Energiya-M on the elements of the antioxidant system of potatoes. *Ekobiotekh. = Ecobiotech*. 2019;2(3): 260–264. (In Russ.)

7. Puzina T.I., Makeeva I.Yu. The participation of caffeic acid in the regulation of the production process of potatoes *Solanum tuberosum*. *Agrokimiya = Agrochemistry*. 2015; (6):63–68. (In Russ.)
8. Makeeva I.Yu., Puzina T.I. Participation of caffeic acid in the regulation of physiological processes in potato plants under hypothermia. *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin Orel State Agrarian University*. 2017;(2):60–65. (In Russ.)
9. Makeeva I.Yu. Effect of caffeic acid on water exchange rates in *Solanum tuberosum*. *Povyshenie effektivnosti sel'skokhozyaystvennoy nauki v sovremennykh usloviyakh: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov = Improving the efficiency of agricultural science in modern conditions: proceedings of an International scientific and practical conference of young scientists and specialist*. Orel: VNIIZBK, 2015:92–95. (In Russ.)
10. Turkina M.V., Sokolova S.V. Study of membrane transport of sucrose in plant tissue. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 1972;19(5):9–12. (In Russ.)
11. Mineev V.G. (ed.). *Praktikum po agrokimii: ucheb. posobie = Workshop on agrochemistry: textbook*. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: MGU, 2001:689. (In Russ.)
12. Ermakov A.I. *Metody biokhimitskogo issledovaniya rasteniy = Biochemical research methods of plants*. Leningrad: Agropromizdat, 1987:430. (In Russ.)
13. Lakin G.F. *Biometriya = Biometrics*. Moscow: Vyssh. shk., 1990:113. (In Russ.)
14. Kirillova I.G., Evsyunina A.S., Puzina T.I., Korableva N.P. The effect of ambiol and 2-chloroethylphosphonic acid on the content of phytohormones in the leaves and tubers of potatoes. *Prikladnaya biokimiya i mikrobiologiya = Applied biochemistry and microbiology*. 2003;39(2):237–241. (In Russ.)
15. Ron'zhina E.S., Mokronosov A.T. Donor-acceptor relations and participation of cytokinins in the regulation of transport and distribution of organic substances in plants. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 1994;41(3):448–459. (In Russ.)
16. Kozlov A.V., Uromova I.P., Frolov E.A., Mozoleva K.Yu. Physiological significance of silicon in ontogeny of cultivated plants and in their protection from phytopathogens. *Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik. Biologicheskie nauki = International student scientific bulletin. Biological sciences*. 2015;(1):39.
17. Pleshkov B.P. *Biokimiya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy = Biochemistry of agricultural plants*. Moscow: Kolos, 1980:495. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Григорьевна Кириллова

кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники, физиологии и биохимии растений, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева (Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, 95)

E-mail: kirillovairinai@gmail.com

Irina G. Kirillova

Candidate of biological sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of botany, plant physiology and biochemistry, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomolskaya street, Orel, Russia)

Инна Юрьевна Макеева

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники, физиологии и биохимии растений, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева (Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, 95)

E-mail: makeevainna@inbox.ru

Inna Yu. Makeeva

Candidate of biological sciences, associate professor of the sub-department of botany, plant physiology and biochemistry, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomolskaya street, Orel, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 02.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.06.2021

Принята к публикации / Accepted 28.06.2021

УДК 591.13:636.92+577.11
doi:10.21685/2307-9150-2021-3-2

Окислительный гомеостаз прорастающих семян пшеницы в зависимости от продолжительности ультразвукового воздействия

С. С. Тарасов¹, А. П. Веселов²

¹Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия,
Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

¹Tarasov_ss@mail.ru, ²veselov-ap@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ультразвук активно используется для воздействия на живые организмы, однако его физиологическое действие остается не до конца исследованным. В связи со способностью ультразвуковой волны генерировать в водной среде активные формы кислорода особое внимание, с нашей точки зрения, стоит уделить окислительному гомеостазу и первичному протеолизу запасного питательного вещества у прорастающих семян. В качестве основного показателя стоит выделить окислительную модификацию белков (ОМБ), так как именно они являются основными ловушками биорадикалов, но при этом их оборот в растительных тканях остается не исследованным. Целью работы явилось изучить влияние разного времени ультразвукового воздействия на уровень ОМБ, перекисного окисления липидов (ПОЛ), активности цистеиновой протеиназы и экспрессии ее гена (СР) в прорастающих семенах пшеницы. *Материалы и методы.* В качестве объекта исследования использовали семена пшеницы (*Triticum aestivum* L.), сорта «Экада – 70» 2018 г. сбора. Семена помещали в водную среду ультразвуковой ванны «УНИТРА – УНИМА» УМ – 4. Обработку проводили в течение 5, 10 и 20 мин, контролем служили семена, замоченные, но не обработанные ультразвуком. По окончании в семенах определяли уровень ПОЛ путем определения концентрации малонового диальдегида (МДА), ОМБ регистрации 2,4 – динитрофенилгидразонов (2,4 – ДНФГ), активности цистеиновой протеиназы и экспрессии гена (СР). *Результаты.* Эксперименты выявили зависимость исследуемых показателей от времени ультразвукового воздействия. Показано увеличение содержания МДА в прорастающих семенах пшеницы после ультразвукового воздействия. Содержание 2,4 – ДНФГ имело волнообразную динамику, статистически значимо не изменялось в прорастающих семенах, подверженных ультразвуковому воздействию в течение 5 мин, увеличивалось в образцах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 10 мин, и снижалось в семенах, обработанных ультразвуком в течение 20 мин. Активность исследуемой протеиназы была выше в образцах после пятиминутной ультразвуковой обработки и ниже контрольных значений в семенах после 20 мин действия ультразвуком. Экспрессия гена (СР) была выше в прорастающих семенах, подверженных пяти- и десятиминутной ультразвуковой обработке, с последующим падением ниже контроля. *Выводы.* Установлено усиление процессов ПОЛ, волнообразная динамика ОМБ и первичная активация протеолиза с последующим ингибированием в прорастающих семенах пшеницы после ультразвукового воздействия, гомеостаз белков более толерантен к действию АФК по сравнению с липидами.

Ключевые слова: окислительная модификация белков, перекисное окисление липидов, цистеиновые протеиназы, семена пшеницы, прорастание семян, ультразвук

Для цитирования: Тарасов С. С., **Веселов А. П.** Окислительный гомеостаз прорастающих семян пшеницы в зависимости от продолжительности ультразвукового воздействия // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 13–26. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-2

Oxidative homeostasis of germinating wheat seeds depending on the ultrasonic effect's duration

S.S. Tarasov¹, **A.P. Veselov**²

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russia

¹Tarasov_ss@mail.ru, ²veselov-ap@yandex.ru

Abstract. Background. Ultrasound is actively used to influence living organisms, but its physiological effect remains not fully understood. In connection with the ability of ultrasonic waves to generate reactive oxygen species in an aqueous medium, special attention, from our point of view, should be paid to oxidative homeostasis and primary proteolysis of a reserve nutrient in germinating seeds. As the main indicators, attention should be paid to the proteins' oxidative modification (POM), since they are the main traps of bioradicals, but their turnover in plant tissues remains unexplored. The purpose of the research is to study the effect of different times of ultrasonic exposure on the level of POM, lipid peroxidation (LPO), cysteine proteinase activity and expression of its gene (CP) in germinating wheat seeds. **Materials and methods.** Wheat seeds (*Triticum aestivum* L.), "Ekada-70" variety, collected in 2018, were used as the object of the study. The seeds were placed in an aqueous medium of an ultrasonic bath "UNITRA – UNIMA" UM – 4. The treatment was carried out for 5, 10, and 20 minutes; seeds soaked but not sonicated served as a control. At the end, the level of lipid peroxidation was determined in the seeds by the level of malonic dialdehyde (MDA) concentration, OMB registration of 2,4 – denitrophenylhydrazones (2,4 – DNPH), cysteine proteinase activity and gene expression (CP). **Results.** The experiments revealed the dependence of the studied parameters on the time of ultrasonic exposure. An increase in MDA content in germinating wheat seeds was shown after ultrasonic exposure. The content of 2,4 – DNPH had a wave-like dynamics, did not statistically significantly change in germinating seeds exposed to ultrasound for 5 min, increased in samples that were exposed to ultrasound for 10 min, and decreased in seeds treated with ultrasound for 20 minutes. The activity of the studied proteinase was higher in the samples after 5 minutes of ultrasonic treatment and lower than the control values in the seeds after 20 minutes of sonication. Gene expression (SR) was higher in germinating seeds subjected to 5–10 minutes ultrasonic treatment, followed by a fall below the control. **Conclusions.** The intensification of LPO processes, the wave-like dynamics of POM and the primary activation of proteolysis with subsequent inhibition in germinating wheat seeds after ultrasound exposure were established; protein homeostasis is more tolerant to the action of ROS compared to lipids.

Keywords: oxidative modification of proteins, lipid peroxidation, cysteine proteinases, seeds of wheat, seed germination, ultrasound

For citation: Tarasov S.S., **Veselov A.P.** Oxidative homeostasis of germinating wheat seeds depending on the ultrasonic effect's duration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):13–26. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-2

Введение

Применению ультразвука уделяется большое внимание в современной науке и технике [1–3]. Его используют в медицине [4–5], пищевой и химической промышленности [6–11], в сельском хозяйстве [12–14]. Несмотря на активное применение в хозяйственной деятельности, его физиологическое действие на организм остается не до конца исследованным.

Особый интерес ультразвукового воздействия, с нашей точки зрения, лежит в изучении окислительного гомеостаза и первичного протеолиза запасного питательного вещества при прорастании семян. Так, в литературе отсутствует информация о влиянии ультразвука на перекисное окисление липидов (ПОЛ), окислительную модификацию белков (ОМБ), активность и экспрессию генов цистеиновых протеиназ (СР). Однако имеются данные о его воздействии на морфометрические показатели прорастающих семян [15–16], известна также способность ультразвука генерировать в водных растворах активные формы кислорода (АФК) [17], влиять на активность ферментов [18], экспрессию генов [19] и конформацию биомолекул [20]. При этом отмечается как активирующее влияние на ряд вышеуказанных процессов, так и ингибирующее. В связи с тем, что уровень окислительного гомеостаза зависит от степени генерации АФК и действия ряда ферментов [21], исследование содержания продуктов ПОЛ и ОМБ в прорастающих семенах является актуальной задачей современной физиологической науки.

Стоит также отметить, что в научной литературе отсутствует информация по обороту окисленных белков в растительных объектах и их взаимосвязи с уровнем ПОЛ и протеолизом запасного вещества, что также свидетельствует о важности и необходимости исследования данных процессов у растений.

На основании вышеизложенного целью нашей работы явилось изучение влияния разных по времени ультразвукового воздействия на уровень ПОЛ, ОМБ, активности цистеиновой протеиназы и экспрессии ее гена в прорастающих семенах пшеницы.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали семена пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта «Экада – 70». Семена обрабатывали ультразвуком через 24 ч после замачивания. Исследуемые семена помещали в водную среду ультразвуковой ванны «УНИТРА – УНИМА» УМ – 4, мощность – 25 кГц. Обработку проводили в течение 5, 10 и 20 мин, контролем служили одновременно замоченные, но не обработанные ультразвуком семена. По окончании обработки в семенах регистрировали уровень ПОЛ путем определения концентрации МДА, ОМБ путем определения производных 2,4 – ДНФГ, активности кислой (рН – 4,5) цистеиновой протеиназы и экспрессии ее гена (СР). Определение содержания МДА проводили согласно методике, основанной на его способности реагировать с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) с образованием окрашенных производных [22]. Продукты ОМБ определяли по методике, основанной на способности окисленных белков взаимодействовать с 2,4 – ДНФГ [23], при этом метод был нами модифицирован применительно к растительным объектам. Растительный материал массой 1 г растирали

в форфоровой ступке с 9 мл фосфатного буфера pH 7,2, полученный гомогенат центрифугировали 15 мин при 3000 g, а супернатант использовали для анализа. Активность протеиназ определяли по методике Ансона [24]. Экспрессию гена CP в прорастающих семенах определяли полуколичественно с помощью полимеразной цепной реакции по конечной точке, с последующей визуализацией в агарозном геле [25]. Для этого 0,05 г растительного материала гомогенизировали с использованием набора для выделения тотальной РНК (Extract RNA («Евроген», Россия). Комплементарную ДНК (кДНК) синтезировали, используя набор для обратной транскрипции ОТ-1 с M-MLV обратной транскриптазой и со случайными гексануклеотидными (random) праймерами («Синтол», Россия). В качестве референсного гена использовался ген актина [26]. Подбор праймеров проводили по кодирующим участкам генов актина и CP в программе Primer-BLAST (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast>) по аннотированным последовательностям AY841792.2 [27] и KC775780.1 [28]. Полученные праймеры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Нуклеотидные последовательности праймеров для проведения ПЦР в режиме реального времени

Ген	Последовательность, 5'-3'	Номер аннотированной последовательности в NCBI
CP	F: CTCTCCGTCTTCAAGGCCAA	AY841792.2
	R: TCTTGAGCCCCAGGAAGGTC	
Актин	F: CTTTCGTTTGGATCTCGCTGG	KC775780.1
	R: GCCAATCGTGATGACCTGAC	

Количественную оценку ампликонов проводили путем анализа агарозного геля и выражали в условных единицах (отн. ед.) [29].

Полученные результаты концентраций продуктов окисления белков и липидов, активность фермента и относительное содержание транскриптов иРНК CP обрабатывали статистически, рассчитывали среднее арифметическое (M) и стандартные отклонения (σ) с использованием программы Microsoft Excel 2010 [30].

Результаты исследования

Одним из основных продуктов ПОЛ является МДА, данный метаболит был зафиксирован в значительных количествах во всех исследуемых образцах. Наиболее низкое его содержание было отмечено в контрольных прорастающих семенах пшеницы, а в образцах, на которые действовали ультразвуком, отмечалось существенное увеличение содержания МДА ($P \leq 0,05$) (рис. 1,а). Так, у прорастающих семян, подверженных 5-минутному воздействию ультразвуком, его содержание увеличивается вдвое, через десять минут действия ультразвуком существенных изменений, по сравнению с предыдущим измерением, не отмечается ($P \geq 0,05$). Максимальное содержание МДА зафиксировано в семенах, подверженных 20-минутному ультразвуковому воздействию, что в три раза больше, чем в контрольных образцах ($P \leq 0,05$).

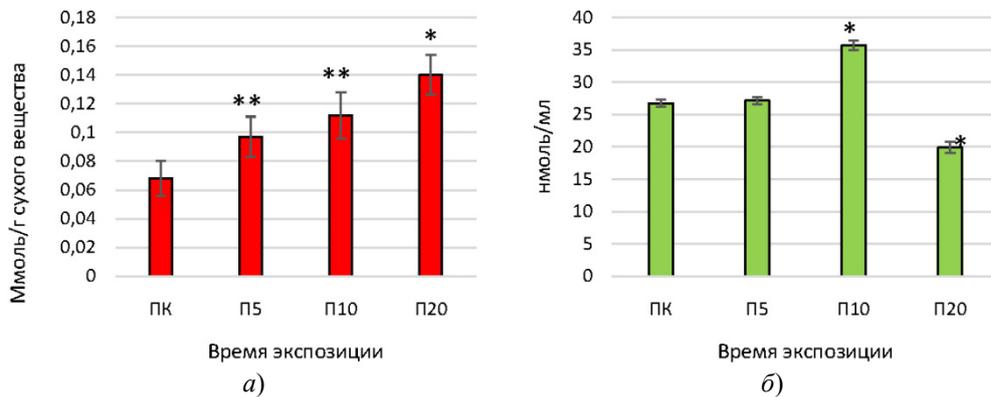


Рис. 1. Содержание малонового диальдегида (а) и сумма всех продуктов окислительной модификации белков (б) в прорастающих семенах пшеницы в зависимости от времени ультразвукового воздействия, где ПК – контроль, П5, П10 и П20 – прорастающие семена, подверженные ультразвуковому воздействию в течение 5, 10 и 20 мин соответственно; * $p \leq 0,05$ относительно контроля по критерию Стьюдента; ** – достоверные различия в сравнении с контролем по критерию Крускала – Уоллиса

Динамика содержания продуктом ОМБ отличается от таковой продуктов ПОЛ. Содержание окисленных белковых метаболитов в образцах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 5 мин, не отличается от контроля ($P \geq 0,05$). Десятиминутное воздействие исследуемым нами фактором показало увеличение содержания продуктов ОМБ примерно на треть по сравнению с контролем ($P \leq 0,05$). Уровень ОМБ в прорастающих семенах пшеницы, на которые действовали ультразвуком в течение 20 мин, оказался ниже даже по сравнению с контрольными образцами (рис. 1,б).

Анализ фракционного состава исследуемых нами продуктов ОМБ выявил преобладание альдегид и кетон-денитрофенилгидразонов нейтрального характера, при этом не наблюдалось преобладание какого-либо из этих продуктов. Содержание же алифатических альдегид и кетон-денитрофенилгидразонов основного характера ниже, чем таковых нейтрального характера. Стоит также отметить явное преобладание по содержанию альдегид-денитрофенилгидразонов по сравнению с кетон-денитрофенилгидразонами (рис. 2).

Анализируя динамику содержания продуктов ПОЛ и ОБМ, отметим ее независимость относительно времени ультразвукового воздействия. Статистически значимые изменения содержания МДА были зафиксированы уже в образцах после пятиминутного ультразвукового воздействия, а содержание 2,4 – денитрофенилгидразонов начинало отличаться от контрольных значений только после десятиминутного действия ультразвуком. Долговременная, двадцатиминутная обработка ультразвуком существенно усиливала образование и накопление МДА, но снизила содержание продуктов ОМБ.

Известно, что в обороте окисленных белков важную роль играет протеолитический комплекс [31–33]. Поэтому, изучая уровень окислительного гомеостаза, стоит уделять внимание распаду окисленных метаболитов. Показательно влияние ультразвука на активность тиоловых протеиназ в прорастающих семенах пшеницы (рис. 3,а). Выявлено стимулирующее кратковременное действие на активность исследуемой протеиназы ультразвуком

(в течение 5 мин). Последующее воздействие постепенно снижало активность цистеиновых протеиназ. Действие в течение 10 мин приводило к падению активности исследуемого нами фермента до уровня контроля, а двадцатиминутное воздействие снижало ее примерно на треть по сравнению с контролем.

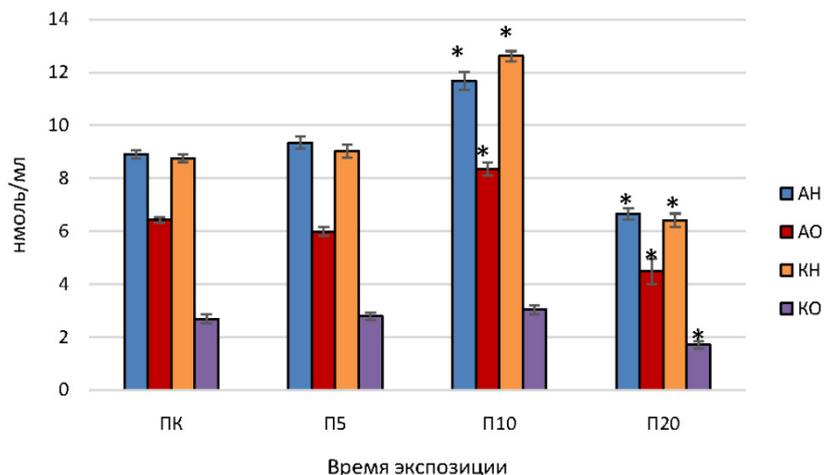


Рис. 2. Фракционный состав 2,4 – денитрофенилгидразонов – продуктов окислительной модификации белков в прорастающих семенах пшеницы в зависимости от времени ультразвукового воздействия:

АН – алифатические альдегид-денитрофенилгидразоны нейтрального характера;
 АО – алифатические альдегид-денитрофенилгидразоны основного характера;
 КН – алифатические кетон-денитрофенилгидразоны нейтрального характера;
 КО – алифатические кетон-денитрофенилгидразоны основного характера,
 другие обозначения такие же, как и на рис. 1

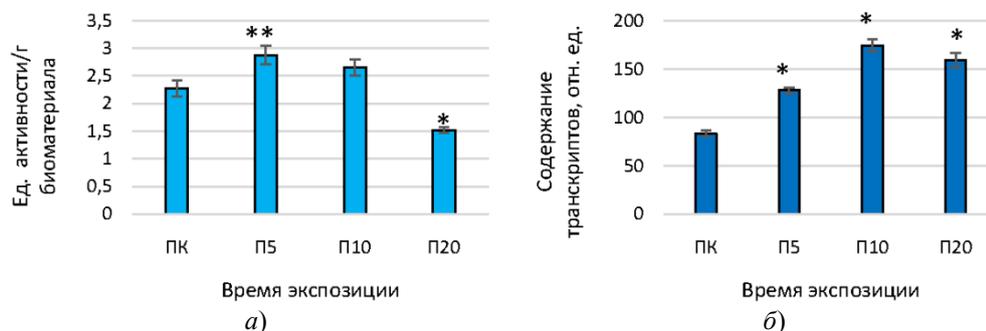


Рис. 3. Активность цистеиновых протеиназ (а) и экспрессия гена СР (б) в прорастающих семенах гороха в зависимости от времени ультразвукового воздействия (обозначения такие же, как и на рис. 1)

Полученные данные о накоплении транскрипта иРНК гена СР показывают его зависимость от ультразвукового воздействия (рис. 3,б). Установлено увеличение содержания транскрипта иРНК гена СР в прорастающих семенах пшеницы при 5-минутном ультразвуковом воздействии ($P \leq 0,05$). При дальнейшем действии ультразвуком на прорастающие семена пшеницы экспрессия гена СР была остановлена, что проявилось в отсутствии увеличения

иРНК в образцах. В семенах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 20 мин содержание транскриптом иРНК гена CP становится ниже относительно других опытных образцов.

Обсуждение результатов

Усиление процессов перекисного окисления липидов и окислительной модификации белков в прорастающих семенах пшеницы после ультразвукового воздействия, вероятно, связано с генерацией активных форм кислорода под действием ультразвука [34–37]. Например, при исследовании ультразвуковых сенсбилизаторов, которые использовали для борьбы с раковыми клетками, показана чувствительность порфирина к ультразвуку в зависимости от присутствующего иона металла, причем порфирин Zn (II) и Pd (II) является наиболее эффективным в образовании синглетного кислорода и гидроксильных радикалов [38]. Было также обнаружено, что разложение протопорфина IX одновременно сопровождается образованием ОН с увеличением выходной мощности ультразвукового генератора [39], способность ультразвука генерировать NO-группы из L-аргинина [40].

Снижение содержания окисленных белков, вероятно, связано с синергетическим эффектом действия ультразвука на саму белковую молекулу, а также на протеолитические ферменты. По-видимому, активируется процесс протеолиза запасного вещества, что в итоге ускоряет и процесс деградации окисленных белков.

Как видно по результатам нашего эксперимента, гомеостаз белков более толерантен к действию АФК по сравнению с липидами. Вероятно, это связано с тем, что в прорастающих семенах пшеницы содержание белков и ферментов, участвующих в их метаболизме, существенно выше по сравнению с липидами [41–42]. Другой возможной причиной устойчивого белкового окислительного гомеостаза по сравнению с липидным у суточных прорастающих семян пшеницы является то, что большая часть белков находится в покоящемся состоянии, а липиды почти полностью задействованы в метаболизме [43–44].

Активация цистеиновых протеиназ в прорастающих семенах пшеницы, подверженных 5-минутному воздействию ультразвуком, вероятно, связана с увеличением общей доступности белкового субстрата для исследуемого фермента. Падение активности фермента связано с действием АФК на его структуру, в том числе нарушением целостности, дезактивацией активных центров путем окисления некоторых, входящих в их состав аминокислот.

Усиление уровня экспрессии гена CP в образцах после 5-минутной ультразвуковой обработки, возможно, происходит в связи с денатурирующим действием ультразвуковой волны, связанным с разрушением водородных связей между азотистыми основаниями, что, по сути, приводит к формированию транскрипционных пузырей, это позволяет ускорить работу ДНК зависимой РНК полимеразы, тем самым увеличить скорость считывания информации с исследуемого гена. Долговременное ультразвуковое воздействие, напротив, снижает уровень экспрессии гена CP, что, вероятно, происходит из-за нарушения целостности первичной структуры ДНК в результате механического разурешения фосфодиэфирных связей и окисления нуклеотидов в составе

ДНК. Кроме этого, происходит дезактивация ферментов транскрипции за счет повышенной генерации АФК.

Заключение

1. Показано большее содержание малонового диальдегида (МДА) в прорастающих семенах пшеницы, подверженных ультразвуковому воздействию. Содержание 2,4 – ДНФГ изменялось статистически незначимо в прорастающих семенах, подверженных ультразвуковому воздействию в течение 5 мин, достоверно увеличивалось в образцах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 10 мин и достоверно снижалось в семенах, обработанных ультразвуком в течение 20 мин.

2. Активность цистеиновых протеиназ увеличивалась после 5-минутной обработки ультразвуком с последующим падением в динамике и снижалась ниже уровня в образцах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 20 мин.

3. В прорастающих семенах пшеницы, подверженных 5-минутному ультразвуковому воздействию, достоверно показано усиление экспрессии гена СР, с последующей почти полной остановкой транскрипции, что проявлялось в отсутствии накопления иРНК гена СР в семенах, на которые воздействовали ультразвуком в течение 10 мин, и снижением транскриптов в образцах после 20-минутной обработки.

Список литературы

1. Maresca D., Lakshmanan A., Abedi M. [et al.]. Biomolecular Ultrasound and Sonogenetics // *Annu Rev Chem Biomol Eng.* 2018. Vol. 7, T. 9. P. 229–252. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060817-084034>
2. Naeve I., Mommens M., Arukwe A., Kjørsvik E. Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in female Atlantic salmon (*Salmo salar*) // *Physiol Rep.* 2018. Vol. 6, T. 9. P. 136–140. URL: <https://doi.org/10.14814/phy2.13640>
3. Chen L. D., Ruan S. M., Lin Y. [et al.]. Comparison between M-score and LR-M in the reporting system of contrast-enhanced ultrasound LI-RADS // *Eur Radiol.* 2019. Vol. 29, T. 8. P. 4249–4257. URL: <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5927-8>
4. Methachan B., Thanappapasr K. Polymer-Based Materials in Cancer Treatment: From Therapeutic Carrier and Ultrasound Contrast Agent to Theranostic Applications // *Ultrasound Med Biol.* 2017. Vol. 43, T. 1. P. 69–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2016.09.009>
5. Zhou L. Q., Li P., Cui X. W., Dietrich C. F. Ultrasound nanotheranostics in fighting cancer: Advances and prospects // *Cancer Lett.* 2020. Vol. 1, T. 470. P. 204–219. URL: <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2019.11.034>
6. Hu A., Zheng J., Qiu T. Industrial experiments for the application of ultrasound on scale control in the Chinese sugar industry // *Ultrason Sonochem.* 2006. Vol. 13, T. 4. P. 329–333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2005.05.005>
7. Alarcon-Rojo A. D., Janacua H., Rodriguez J. C. [et al.]. Power ultrasound in meat processing // *Meat Sci.* 2015. Vol. 107. P. 86–93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.015>
8. Arvanitoyannis I. S., Kotsanopoulos K. V., Savva A. G. Use of ultrasounds in the food industry-Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods // *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2017. Vol. 57, T. 9. P. 109–128. URL: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.860514>

9. Gallo M., Ferrara L., Naviglio D. Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective // *Foods*. 2018. Vol. 7, Iss. 10. URL: <https://doi:10.3390/foods7100164>
10. Kiss A. A., Geertman R., Wierschem M. [et al.]. Ultrasound-assisted emerging technologies for chemical processes // *Chem Technol Biotechnol*. 2018. Vol. 93, Iss. 5. P. 1219–1227. URL: <https://doi:10.1002/jctb.5555>
11. Bera S., Mondal D. A role for ultrasound in the fabrication of carbohydrate-supported nanomaterials // *Ultrasound*. 2019. Vol. 22, № 2. P. 131–156. URL: <https://doi:10.1007/s40477-019-00363-8>
12. Ribeiro F. R., Tedeschi L. O. Using real-time ultrasound and carcass measurements to estimate total internal fat in beef cattle over different breed types and managements // *Anim Sci*. 2012. Vol. 90, T. 9. P. 3259–3265. URL: <https://doi:10.2527/jas.2011-4697>
13. Stouffer J. R. History of ultrasound in animal science // *Ultrasound Med*. 2004. Vol. 23 (5). P. 577–584. URL: <https://doi:10.7863/jum.2004.23.5.577>
14. Hasan M. M., Bashir T., Bae H. Use of Ultrasonication Technology for the Increased Production of Plant Secondary Metabolites // *Molecules*. 2017. Vol. 22, Iss. 7. P. 1046. URL: <https://doi:10.3390/molecules22071046>
15. Ding J., Johnson J., Chu Y. F., Feng H. Enhancement of γ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 283. P. 239–247. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.136>
16. Miano A. C., Sabadoti V. D., Augusto P. E. D. Combining Ionizing Irradiation and Ultrasound Technologies: Effect on Beans Hydration and Germination // *Food Sci*. 2019. Vol. 84 (11). P. 3179–3185. URL: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14819>
17. Okada K., Kudo N., Hassan M. A. [et al.]. Threshold curves obtained under various gaseous conditions for free radical generation by burst ultrasound - Effects of dissolved gas, microbubbles and gas transport from the air // *Ultrason Sonochem*. 2009. Vol. 16, № 4. P. 512–618. URL: <https://doi:10.1016/j.ultsonch.2008.11.010>
18. Gebicka L., Gebicki J. L. The effect of ultrasound on heme enzymes in aqueous solution // *Enzyme Inhib*. 1997. Vol. 12, T. 2. P. 133–141. URL: <https://doi:10.3109/14756369709035814>
19. Ogawa R., Watanabe A., Morii A. Ultrasound up-regulates expression of heme oxygenase-1 gene in endothelial cells // *Med Ultrason*. 2015. Vol. 42, Iss. 4. P. 467–475. URL: <https://doi:10.1007/s10396-015-0635-3>
20. Jiang Z., Yao K., Yuan X. [et al.]. Effects of ultrasound treatment on physico-chemical, functional properties and antioxidant activity of whey protein isolate in the presence of calcium lactate // *Sci Food Agric*. 2018. Vol. 98, Iss. 4. P. 1522–1529.
21. Davies M. J. Protein oxidation and peroxidation // *Biochem*. 2016. Vol. 473, Iss. 7. P. 805–825. URL: <https://doi:10.1042/BJ20151227>
22. Стальная И. Д., Гаришвили Т. Г. Метод определения малонового диальдегида // *Современные методы в биохимии*. М. : Медицина, 1977. С. 66–68.
23. Дубинина Е. Е. [и др.]. Окислительные модификации белков сыворотки крови человека, метод ее определения // *Вопросы медицинской химии*. 1995. Т. 41, № 1. С. 24–26.
24. Александрова И. Ф., Веселов А. П., Ефременко Ю. П. Протеолитическая активность прорастающих семян пшеницы при тепловом стрессе // *Физиология растений*. 1999. Т. 46, № 1. С. 223.
25. Gál A. B., Carnwath J. W., Dinnyes A. [et al.]. Comparison of real-time polymerase chain reaction and end-point polymerase chain reaction for the analysis of gene expression in preimplantation embryos // *Reprod Fertil Dev*. 2006. Vol. 18, № 3. P. 365–371. doi:10.1071/rd05012

26. Молекулярно-генетические и биохимические методы в современной биологии растений / под ред. Вл. В. Кузнецова, В. В. Кузнецова, Г. А. Романова. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 487 с.
27. Patent CN (200410088515/8)-B 08-NOV-2004 A *Triticum aestivum* Cysteine Proteinase Gene and Its Utilization / Jing R., Zang Q., Guo Z., Chang X. ; Chinese Academy of Agricultural Sciences ; Institute of Crop Germplasm Resources.
28. Lu S. Zn²⁺ blocks annealing of complementary single-stranded DNA in a sequence-selective manner // *Sci Rep*. 2014. Vol. 4. P. 5464. URL: <https://doi:10.1038/srep05464>
29. Schmittgen T. D., Zakrajsek B. A., Mills A. G. [et al.]. Quantitative reverse transcription-polymerase chain reaction to study mRNA decay: comparison of endpoint and real-time methods // *Anal Biochem*. 2000. Vol. 285, Iss. 2. P. 194–204. doi:10.1006/abio.2000.4753
30. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М. : Практика, 1999. 459 с.
31. Дубинина Е. Е. Продукты метаболизма кислорода в функциональной активности клеток. СПб., 2006. 396 с.
32. Jung T., Höhn A., Grune T. The proteasome and the degradation of oxidized proteins: Part II - protein oxidation and proteasomal degradation // *Redox Biol*. 2014. Vol. 2. P. 99–104. URL: <https://doi:10.1016/j.redox.2013.12.008>
33. Raynes R., Pomatto L. C., Davies K. J. Degradation of oxidized proteins by the proteasome: Distinguishing between the 20S, 26S, and immunoproteasome proteolytic pathways // *Mol Aspects Med*. 2016. Vol. 50. P. 41–55. URL: <https://doi:10.1016/j.mam.2016.05.001>
34. He L. L., Wang X., Wu X. X. [et al.]. Protein damage and reactive oxygen species generation induced by the synergistic effects of ultrasound and methylene blue // *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*. 2015. Vol. 134. P. 361–366. URL: <https://doi:10.1016/j.saa.2014.06.121>
35. Duco W., Grosso V., Zaccari D., Soltermann A. T. Generation of ROS mediated by mechanical waves (ultrasound) and its possible applications // *Methods*. 2016. Vol. 109. P. 141–148. URL: <https://doi:10.1016/j.ymeth.2016.07.015>
36. Jia C., Xu L., Han T. [et al.]. Generation of Reactive Oxygen Species in Heterogeneously Sonoporated Cells by Microbubbles with Single-Pulse Ultrasound // *Ultrasound Med Biol*. 2018. Vol. 44, № 5. P. 1074–1085. URL: <https://doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2018.01.006>
37. Escoffre J. M., Campomanes P., Tarek M., Bouakaz A. New insights on the role of ROS in the mechanisms of sonoporation-mediated gene delivery // *Ultrason Sonochem*. 2020. Vol. 64. P. 1049–1098. URL: <https://doi:10.1016/j.ultsonch.2020.104998>
38. Giuntini F., Foglietta F., Marucco A. M. [et al.]. Insight into ultrasound-mediated reactive oxygen species generation by various metal-porphyrin complexes // *Free Radic Biol Med*. 2018. Vol. 121. P. 190–201. URL: <https://doi:10.1016/j.freeradbiomed.2018.05.002>
39. Wang P., Wang X., Zhang K. [et al.]. The spectroscopy analyses of PpIX by ultrasound irradiation and its sonotoxicity in vitro // *Ultrasonics*. 2013. Vol. 53, Iss. 5. P. 935–942. URL: <https://doi:10.1016/j.ultras.2012.10.019>
40. Zhang K., Xu H., Jia X. [et al.]. Ultrasound-Triggered Nitric Oxide Release Platform Based on Energy Transformation for Targeted Inhibition of Pancreatic Tumor // *ACS Nano*. 2016. Vol. 10, Iss. 12. P. 816–828. URL: <https://doi:10.1021/acsnano.6b04921>
41. Lane B. G. Cellular desiccation and hydration: developmentally regulated proteins, and the maturation and germination of seed embryos // *FASEB*. 1991. Vol. 5, № 14. P. 2893–2901. URL: <https://doi:10.1096/fasebj.5.14.175235>
42. Liu Y., Han C., Deng X. [et al.]. Integrated physiology and proteome analysis of embryo and endosperm highlights complex metabolic networks involved in seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Plant Physiol*. 2018. Vol. 229. P. 63–76. URL: <https://doi:10.1016/j.jplph.2018.06.011>

43. Yadav S. P., Ahuja V. P., Das H. K. Changes in amino acid composition of proteins in developing wheat embryo during seed germination // *Indian J. Biochem Biophys.* 1972. Vol. 9, № 4. P. 350–351.
44. Lowe L. B., Ries S. K. Endosperm protein of wheat seed as a determinant of seedling growth // *Plant Physiol.* 1973. Vol. 51, № 1. P. 57–60. URL: <https://doi:10.1104/pp.51.1.57>

References

1. Maresca D., Lakshmanan A., Abedi M. [et al.]. Biomolecular Ultrasound and Sonogenetics. *Annu Rev Chem Biomol Eng.* 2018;7(9):229–252. Available at: <https://doi:10.1146/annurev-chembioeng-060817-084034>
2. Naeve I., Mommens M., Arukwe A., Kjorsvik E. Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in female Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Physiol Rep.* 2018;6(9):136–140. Available at: <https://doi:10.14814/phy2.13640>
3. Chen L.D., Ruan S.M., Lin Y. [et al.]. Comparison between M-score and LR-M in the reporting system of contrast-enhanced ultrasound LI-RADS. *Eur Radiol.* 2019;29(8):4249–4257. Available at: <https://doi:10.1007/s00330-018-5927-8>
4. Methachan B., Thanappapasr K. Polymer-Based Materials in Cancer Treatment: From Therapeutic Carrier and Ultrasound Contrast Agent to Theranostic Applications. *Ultrasound Med Biol.* 2017;43(1):69–82. Available at: <https://doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2016.09.009>
5. Zhou L.Q., Li P., Cui X.W., Dietrich C.F. Ultrasound nanotheranostics in fighting cancer: Advances and prospects. *Cancer Lett.* 2020;1(470):204–219. Available at: <https://doi:10.1016/j.canlet.2019.11.034>
6. Hu A., Zheng J., Qiu T. Industrial experiments for the application of ultrasound on scale control in the Chinese sugar industry. *Ultrason Sonochem.* 2006;13(4):329–333. Available at: <https://doi:10.1016/j.ultsonch.2005.05.005>
7. Alarcon-Rojo A.D., Janacua H., Rodriguez J.C. [et al.]. Power ultrasound in meat processing. *Meat Sci.* 2015;107:86–93. Available at: <https://doi:10.1016/j.meatsci.2015.04.015>
8. Arvanitoyannis I.S., Kotsanopoulos K.V., Savva A.G. Use of ultrasounds in the food industry-Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2017;57(9):109–128. Available at: <https://doi:10.1080/10408398.2013.860514>
9. Gallo M., Ferrara L., Naviglio D. Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective. *Foods.* 2018;7(10). Available at: <https://doi:10.3390/foods7100164>
10. Kiss A.A., Geertman R., Wierschem M. [et al.]. Ultrasound-assisted emerging technologies for chemical processes. *Chem Technol Biotechnol.* 2018;93(5):1219–1227. Available at: <https://doi:10.1002/jctb.5555>
11. Bera S., Mondal D. A role for ultrasound in the fabrication of carbohydrate-supported nanomaterials. *Ultrasound.* 2019;22(2):131–156. Available at: <https://doi:10.1007/s40477-019-00363-8>
12. Ribeiro F.R., Tedeschi L.O. Using real-time ultrasound and carcass measurements to estimate total internal fat in beef cattle over different breed types and managements. *Anim Sci.* 2012;90(9):3259–3265. Available at: <https://doi:10.2527/jas.2011-4697>
13. Stouffer J.R. History of ultrasound in animal science. *Ultrasound Med.* 2004;23(5):577–584. Available at: <https://doi:10.7863/jum.2004.23.5.577>
14. Hasan M.M., Bashir T., Bae H. Use of Ultrasonication Technology for the Increased Production of Plant Secondary Metabolites. *Molecules.* 2017;22(7):1046. Available at: <https://doi:10.3390/molecules22071046>
15. Ding J., Johnson J., Chu Y.F., Feng H. Enhancement of γ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.)

- treated with and without power ultrasound. *Food Chemistry*. 2019;283:239–247. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.136>
16. Miano A.C., Sbadoti V.D., Augusto P.E.D. Combining Ionizing Irradiation and Ultrasound Technologies: Effect on Beans Hydration and Germination. *Food Sci*. 2019; 84(11):3179–3185. Available at: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14819>
 17. Okada K., Kudo N., Hassan M.A. [et al.]. Threshold curves obtained under various gaseous conditions for free radical generation by burst ultrasound - Effects of dissolved gas, microbubbles and gas transport from the air. *Ultrason Sonochem*. 2009;16(4): 512–618. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.11.010>
 18. Gebicka L., Gebicki J.L. The effect of ultrasound on heme enzymes in aqueous solution. *Enzyme Inhib*. 1997;12(2):133–141. Available at: <https://doi.org/10.3109/14756369709035814>
 19. Ogawa R., Watanabe A., Morii A. Ultrasound up-regulates expression of heme oxygenase-1 gene in endothelial cells. *Med Ultrason*. 2015;42(4):467–475. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10396-015-0635-3>
 20. Jiang Z., Yao K., Yuan X. [et al.]. Effects of ultrasound treatment on physico-chemical, functional properties and antioxidant activity of whey protein isolate in the presence of calcium lactate. *Sci Food Agric*. 2018;98(4):1522–1529.
 21. Davies M.J. Protein oxidation and peroxidation. *Biochem*. 2016;473(7):805–825. Available at: <https://doi.org/10.1042/BJ20151227>
 22. Stal'naya I.D., Garishvili T.G. Method for determination of malonic dialdehyde. *Sovremennye metody v biokhimii = Modern methods in biochemistry*. Moscow: Meditsina, 1977:66–68. (In Russ.)
 23. Dubinina E.E. [et al.]. Oxidative modifications of human blood serum proteins, a method for its determination. *Voprosy meditsinskoy khimii = Issues of medical chemistry*. 1995;41(1):24–26. (In Russ.)
 24. Aleksandrova I.F., Veselov A.P., Efremenko Yu.R. Proteolytic activity of germinating wheat seeds under heat stress. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 1999;46(1):223. (In Russ.)
 25. Gál A.B., Carnwath J.W., Dinnyes A. [et al.]. Comparison of real-time polymerase chain reaction and end-point polymerase chain reaction for the analysis of gene expression in preimplantation embryos. *Reprod Fertil Dev*. 2006;18(3):365–371. doi:10.1071/rd05012
 26. Kuznetsov V.I., Kuznetsov V.V., Romanov G.A. (eds.). *Molekulyarno-geneticheskie i biokhimicheskie metody v sovremennoy biologii rasteniy = Molecular genetic and biochemical methods in modern plant biology*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011:487. (In Russ.)
 27. Patent CH (200410088515/8)-B 08-NOV-2004 *A Triticum aestivum Cysteine Proteinase Gene and Its Utilization*. Jing R., Zang Q., Guo Z., Chang X.; Chinese Academy of Agricultural Sciences; Institute of Crop Germplasm Resources.
 28. Lu S. Zn²⁺ blocks annealing of complementary single-stranded DNA in a sequence-selective manner. *Sci Rep*. 2014;4:5464. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep05464>
 29. Schmittgen T.D., Zakrajsek B.A., Mills A.G. [et al.]. Quantitative reverse transcription-polymerase chain reaction to study mRNA decay: comparison of endpoint and real-time methods. *Anal Biochem*. 2000;285(2):194–204. doi:10.1006/abio.2000.4753
 30. Glants S. *Mediko-biologicheskaya statistika = Biomedical statistics*. Moscow: Praktika, 1999:459. (In Russ.)
 31. Dubinina E.E. *Produkty metabolizma kisloroda v funktsional'noy aktivnosti kletok = Oxygen metabolism products in the functional activity of cells*. Saint-Petersburg, 2006: 396. (In Russ.)
 32. Jung T., Höhn A., Grune T. The proteasome and the degradation of oxidized proteins: Part II - protein oxidation and proteasomal degradation. *Redox Biol*. 2014;2:99–104. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2013.12.008>

33. Raynes R., Pomatto L.C., Davies K.J. Degradation of oxidized proteins by the proteasome: Distinguishing between the 20S, 26S, and immunoproteasome proteolytic pathways. *Mol Aspects Med.* 2016;50:41–55. Available at: <https://doi:10.1016/j.mam.2016.05.001>
34. He L.L., Wang X., Wu X.X. [et al.]. Protein damage and reactive oxygen species generation induced by the synergistic effects of ultrasound and methylene blue. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2015;134:361–366. Available at: <https://doi:10.1016/j.saa.2014.06.121>
35. Duco W., Grosso V., Zaccari D., Soltermann A.T. Generation of ROS mediated by mechanical waves (ultrasound) and its possible applications. *Methods.* 2016;109:141–148. Available at: <https://doi:10.1016/j.ymeth.2016.07.015>
36. Jia C., Xu L., Han T. [et al.]. Generation of Reactive Oxygen Species in Heterogeneously Sonoporated Cells by Microbubbles with Single-Pulse Ultrasound. *Ultrasound Med Biol.* 2018;44(5):1074–1085. Available at: <https://doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2018.01.006>
37. Escoffre J.M., Campomanes P., Tarek M., Bouakaz A. New insights on the role of ROS in the mechanisms of sonoporation-mediated gene delivery. *Ultrason Sonochem.* 2020; 64:1049–1098. Available at: <https://doi:10.1016/j.ultsonch.2020.104998>
38. Giuntini F., Foglietta F., Maruccio A.M. [et al.]. Insight into ultrasound-mediated reactive oxygen species generation by various metal-porphyrin complexes. *Free Radic Biol Med.* 2018;121:190–201. Available at: <https://doi:10.1016/j.freeradbiomed.2018.05.002>
39. Wang P., Wang X., Zhang K. [et al.]. The spectroscopy analyses of PpIX by ultrasound irradiation and its sonotoxicity in vitro. *Ultrasonics.* 2013;53(5):935–942. Available at: <https://doi:10.1016/j.ultras.2012.10.019>
40. Zhang K., Xu H., Jia X. [et al.]. Ultrasound-Triggered Nitric Oxide Release Platform Based on Energy Transformation for Targeted Inhibition of Pancreatic Tumor. *ACS Nano.* 2016;10(12):10 816–10 828. Available at: <https://doi:10.1021/acsnano.6b04921>
41. Lane B.G. Cellular desiccation and hydration: developmentally regulated proteins, and the maturation and germination of seed embryos. *FASEB.* 1991;5(14):2893–2901. Available at: <https://doi:10.1096/fasebj.5.14.175235>
42. Liu Y., Han C., Deng X. [et al.]. Integrated physiology and proteome analysis of embryo and endosperm highlights complex metabolic networks involved in seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol.* 2018;229:63–76. Available at: <https://doi:10.1016/j.jplph.2018.06.011>
43. Yadav S.P., Ahuja V.P., Das H.K. Changes in amino acid composition of proteins in developing wheat embryo during seed germination. *Indian J. Biochem Biophys.* 1972; 9(4):350–351.
44. Lowe L.B., Ries S.K. Endosperm protein of wheat seed as a determinant of seedling growth. *Plant Physiol.* 1973;51(1):57–60. Available at: <https://doi:10.1104/pp.51.1.57>

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Сергеевич Тарасов

старший преподаватель кафедры ботаники, физиологии и защиты растений, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия (Россия, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 97)

Sergei S. Tarasov

Senior lecturer of the sub-department of botany, physiology and plant protection, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy (97 Gagarina avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

E-mail: Tarasov_ss@mail.ru

Александр Павлович Веселов

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры биохимии
и биотехнологии, Национальный
исследовательский Нижегородский
государственный университет
имени Н. И. Лобачевского (Россия,
г. Нижний Новгород, проспект
Гагарина, 23)

E-mail: veselov-ap@yandex.ru

Alexander P. Veselov

Doctor of biological sciences, professor,
professor of the sub-department
of biochemistry and biotechnology,
Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod (23 Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.06.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.08.2021

Принята к публикации / Accepted 28.08.2021

Влияние СВЧ-обработки на относительную засухоустойчивость яровых и озимых злаков

О. М. Соболева¹, Е. П. Кондратенко²

¹Кемеровский государственный медицинский университет
Минздрава России, Кемерово, Россия

²Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия,
Кемерово, Россия

^{1,2}meer@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение засухоустойчивости основных продовольственных культур при нарастающих изменениях климата и погоды на планете – одна из актуальнейших задач, стоящих перед учеными. Необходимость поиска новых эффективных, недорогих, безопасных методов обусловила появление данной работы. *Цель исследований* – определить характер влияния СВЧ-обработки на засухоустойчивость яровых и озимых злаков. *Материалы и методы.* Определяли относительную засухоустойчивость методом проращивания семян в растворе осмотика (сахарозы). Объектами служили семена яровой мягкой пшеницы сорта Новосибирская 31, ярового ячменя сорта Сибиряк, ярового овса сорта Креол, озимой ржи сорта Петровна, озимой мягкой пшеницы сорта Московская 56, озимой тритикале сорта Омская. Схема эксперимента включала в себя восемь вариантов, сочетающих разные концентрации растворов сахарозы (1,4, 7,4, 16,6 %) и СВЧ-обработку (частота магнетрона 2,45 ГГц, мощность 0,42 Вт, экспозиция 11 с). Контролем служил вариант с дистиллированной водой, без СВЧ-обработки. Семена проращивали при температуре 21 °С в течение семи суток. На седьмые сутки определяли результаты прорастания семян и выражали их в процентах к контролю. *Результаты.* Наличие повышенного осмотического давления при прорастании семян злаков (без СВЧ-обработки) приводит к уменьшению числа проростков. Увеличение концентрации сахарозы в растворе снижает количество проросших жизнеспособных семян. Однако степень этого уменьшения сильнее выражена у яровых культур. Действие высокого осмотического давления на прорастающие семена (без предварительной СВЧ-обработки) приводит к тому, что все изучаемые озимые хлебные злаки относятся к группе со средней засухоустойчивостью, яровые – к группе слабоустойчивых. Предварительная СВЧ-обработка семян существенно повышает засухоустойчивость проростков злаков, что особенно ярко проявляется у яровых. *Выводы.* Электромагнитное поле влияет на уровень засухоустойчивости озимых и яровых злаков. Положительный эффект электромагнитного поля СВЧ, проявляющийся в увеличении относительной засухоустойчивости злаков, более выражен для яровых культур. Наиболее существенное повышение относительной засухоустойчивости при СВЧ-обработке зарегистрировано для семян ярового ячменя сорта Сибиряк.

Ключевые слова: электромагнитное поле сверхвысокой частоты, СВЧ, засухоустойчивость, стимулирующий эффект, пшеница, ячмень, овес, тритикале, рожь

Для цитирования: Соболева О. М., Кондратенко Е. П. Влияние СВЧ-обработки на относительную засухоустойчивость яровых и озимых злаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 27–35. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-3

The effect of microwave treatment on the relative drought resistance of spring and winter cereals

O.M. Soboleva¹, E.P. Kondratenko²

¹Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia

²Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russia

^{1,2}meer@yandex.ru

Abstract. *Background.* Increasing the drought resistance of the main food crops in the face of increasing climate and weather changes on the planet is one of the most urgent tasks facing scientists. The need to find new effective, inexpensive, safe methods led to the appearance of this work. The purpose of the research is to determine the nature of the effect of microwave treatment on the drought resistance of spring and winter cereals. *Materials and methods.* The relative drought resistance was determined by the method of germination of seeds in a solution of osmotic (sucrose). The research objects were the seeds of spring wheat varieties Novosibirskaya 31, spring barley varieties Sibiryak, spring oat varieties Kreol, winter rye varieties Petrovna, soft winter wheat varieties Moscovskaya 56, winter triticale varieties Omskaya. The experimental scheme included 8 variants combining different concentrations of sucrose solutions (1.4, 7.4, 16.6 %) and microwave processing (magnetron frequency 2.45 GHz, power 0.42 W, exposure 11 sec.). The control was a variant with distilled water, without microwave treatment. The seeds were germinated at a temperature of 21 °C for seven days. On the seventh day, seed germination was determined and expressed as a percentage of the control. *Results.* The presence of increased osmotic pressure during the germination of cereal seeds (without microwave treatment) leads to a decrease in the number of seedlings. An increase in the concentration of sucrose in the solution reduces the number of sprouted viable seeds. However, the degree of this decrease is more pronounced in spring crops. The effect of high osmotic pressure on germinating seeds (without preliminary microwave treatment) leads to the fact that all the studied winter cereals belong to the group with medium drought resistance, spring cereals – to the group of weakly resistant ones. Preliminary microwave treatment of seeds significantly increases the drought resistance of cereal seedlings, which is especially pronounced in spring crops. *Conclusions.* The electromagnetic field has a positive effect on the level of drought resistance of winter and spring cereals. The stimulating effect of the microwave EMF is more intense in relation to spring crops – soft wheat, barley, oats, however, it also has a positive effect on the resistance to water deficiency of winter crops – rye, wheat, triticale. At the same time, the most significant increase in relative drought resistance during microwave treatment was registered for spring barley seeds of the Sibiryak variety.

Keywords: ultrahigh frequency electromagnetic field, microwave, drought resistance, stimulating effect, wheat, barley, oats, triticale, rye

For citation: Soboleva O.M., Kondratenko E.P. The effect of microwave treatment on the relative drought resistance of spring and winter cereals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):27–35. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-3

Введение

Растет научный интерес к изучению абиотических стрессов растений, одним из которых является водный дефицит. Антропогенное изменение климата увеличивает частоту и продолжительность засушливых периодов по всей планете [1–2], что делает все более важным изучение реакции растений и сельскохозяйственных культур на засуху, а также способы повышения

адаптивных способностей к ней. Дефицит воды относится к абиотическому стрессу [3], который ограничивает рост и продуктивность сельскохозяйственных культур, создает угрозы для глобальной продовольственной безопасности и здоровья человека [4–5]. Сельское хозяйство многих стран страдает от засухи, приводящей к снижению урожайности основных продовольственных культур более чем на 50 % и качества получаемой продукции [6–7], особенно в засушливых и полузасушливых регионах [8–9]. По прогнозам ученых, в мировом масштабе потери урожая от засухи могут составить до 30 % к 2025 г. по сравнению с текущим урожаем предыдущих лет [10]. Это заставляет вести поиск новых технологий и методов, способных нивелировать последствия водного дефицита. Точек приложения при этом может быть несколько – селекция засухоустойчивых линий и сортов, временное повышение резистентности растения к недостатку влаги или изменение свойств среды произрастания и т.д.

В настоящее время принято несколько направлений борьбы, предотвращения или минимизации последствий водного дефицита для растений. Однако по-прежнему актуальным остается поиск новых методов повышения засухоустойчивости культур, обладающих при этом простотой исполнения, высокой эффективностью, экологической безопасностью. К таким методам, возможно, стоит отнести воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), положительное влияние которого сказывается на отдельных физиолого-биохимических показателях растений злаков [11–12]. В связи с вышесказанным поставлена цель исследования – определить характер влияния СВЧ-обработки на засухоустойчивость яровых и озимых злаков.

Материалы и методы

Относительную засухоустойчивость растений определяли по методу Н. Н. Кожушко [13] с модификациями [14]. Физиологической основой данного метода является способность семян неодинаково прорасти в растворах сахарозы разной концентрации. Подсчитывая число семян, проросших на седьмой день, в расчет берут те, что имеют развитый зародышевый корешок. Семена этой категории развивают сосущую силу, превышающую сосущую силу осмотического раствора [15]. В противном случае прорастания не происходит.

В качестве объектов использовали семена репродукции 2019 г. следующих культур: яровой мягкой пшеницы сорта Новосибирская 31, ярового ячменя сорта Сибиряк, ярового овса сорта Креол, озимой ржи сорта Петровна, озимой мягкой пшеницы сорта Московская 56, озимой тритикале сорта Омская. Схема эксперимента включала в себя восемь вариантов: 1) контроль, без СВЧ-обработки, дистиллированная вода; 2) СВЧ-обработка, дистиллированная вода; 3) без СВЧ-обработки, р-р сахарозы 1,4 %; 4) СВЧ-обработка, р-р сахарозы 1,4 %; 5) без СВЧ-обработки, р-р сахарозы 7,4 %; 6) СВЧ-обработка, р-р сахарозы 7,4 %; 7) без СВЧ-обработки, р-р сахарозы 16,6 %; 8) СВЧ-обработка, р-р сахарозы 16,6 %.

Предварительно определили всхожесть всех культур, она составила 97,6–98,4 %. Для определения засухоустойчивости отбирали здоровые, хорошо выполненные семена, которые перед проращиванием обеззараживали

в формалине (3 мл 40 % раствора на 1 л воды) в течение 3–5 мин. Половину отобранных семян обработали в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (частота магнетрона 2,45 ГГц, мощность 0,42 Вт, экспозиция 11 с). Проращивание семян (необработанных и СВЧ-обработанных) проводили в стерильных чашках Петри на фильтровальной бумаге. В опытных вариантах в чашки добавляли растворы сахарозы с концентрацией 1,4; 7,4 и 16,6 %, которые создавали повышенное осмотическое давление 3,0; 9,0 и 18,0 атм. соответственно. Сразу после приготовления раствор сахарозы кипятили в течение 5 мин, после охлаждения для предотвращения развития плесневых грибов и бактерий добавляли в него 2–3 капли формалина на 1 л. Семена культуры раскладывали по 30 шт. в чашку Петри. В каждую чашку наливали по 5 мл раствора сахарозы (опыт), в контрольном варианте наливали 5 мл дистиллированной воды. Семена проращивали при температуре 21 °С в течение семи суток. На седьмые сутки определяли прорастание семян, для чего подсчитывали все проросшие семена, имеющие заметный зародышевый корень. Находили процентное отношение семян, проросших в растворе осмотика соответствующей концентрации, к контрольным значениям всхожести.

Все измерения проведены в трехкратной аналитической повторности; в таблицах приведены средние и ошибка среднего. Достоверность отличий по сравнению с контролем находили по F -критерию при уровне значимости $p \leq 0,05$ (в таблицах достоверные различия обозначены знаком *).

Результаты и обсуждение

Изучение относительной засухоустойчивости яровых и озимых злаков показало, что данный признак обладает сортоспецифичностью (табл. 1). Так, относительно контрольного варианта (проращивание с дистиллированной водой и без СВЧ-обработки) количество проросших семян при осмотическом давлении 3 атм. колеблется от 90,5 % для семян яровой пшеницы, до 96,2 % для семян озимой пшеницы. В среднем все изучаемые в работе озимые злаки демонстрируют несколько более высокую всхожесть при данной концентрации осмотика: 94,7 против 91,6 % для яровых. Это свидетельствует о более высокой засухоустойчивости озимых культур при относительно невысоком дефиците влаги – при прочих равных условиях изучаемые сорта озимых ржи, тритикале и пшеницы лучше противостоят небольшому осмотическому стрессу, чем яровые пшеница, ячмень и овес. При воздействии ЭМП СВЧ среднее число проросших семян у яровых и озимых культур становятся практически одинаковым: 95,7 и 95,5 %, соответственно. Таким образом, влияние ЭМП СВЧ практически уравнивает относительную засухоустойчивость исследуемых сортов злаков при невысоком уровне водного дефицита.

Как и ожидалось, увеличение концентрации сахарозы в растворе для проращивания семян негативно сказывается на прорастании последних – у всех культур отмечается одинаковая тенденция к существенному снижению числа жизнеспособных семян к седьмому дню прорастания. Однако степень этого уменьшения у разных групп злаков различна. Так, для озимых культур при осмотическом давлении 18 атм. характерно снижение количества всхожих семян относительно нормальных условий прорастания примерно наполовину – количество проросших семян составляет от 47,3 до 51,7 % (в среднем, для всех трех культур показатель равен 49,5 %). Однако для яровых

Таблица 1

Относительная засухоустойчивость яровых злаков, % относительно контроля

Режим обработки	Концентрация раствора сахарозы, %	Культура, сорт					
		Яровая мягкая пшеница, Новосибирская 31	Яровой ячмень, Сибиряк	Яровой овес, Креол	Озимая рожь, Петровна	Озимая мягкая пшеница, Московская 56	Озимая тритикале, Омская
Без СВЧ-обработки	1,4	90,5* ± 6,5	92,6 ± 7,1	91,7 ± 6,4	94,5 ± 6,3	96,2* ± 7,1	93,4* ± 6,3
	7,4	76,2 ± 4,3	79,1* ± 4,8	78,0* ± 3,8	82,3* ± 4,1	81,6 ± 6,4	84,5 ± 5,2
	16,6	24,4* ± 1,8	23,8* ± 2,6	31,1 ± 2,2	51,7* ± 3,0	49,4* ± 4,7	47,3 ± 2,6
СВЧ-обработка	1,4	96,2 ± 6,7	96,3* ± 6,6	94,5* ± 6,1	95,6 ± 5,9	96,5 ± 5,1	94,4* ± 8,1
	7,4	83,7* ± 5,2	84,6 ± 5,4	82,3* ± 4,9	88,2* ± 6,2	84,7* ± 6,2	84,8* ± 5,3
	16,6	51,1* ± 2,0	55,4* ± 3,2	52,8 ± 1,8	57,7 ± 3,4	56,0* ± 3,3	55,9 ± 2,8

Примечание. *Различия достоверны при $p \leq 0,05$.

злаков эти значения более существенны и составляют в среднем 26,4 %, т.е. в 1,9 раза меньше по сравнению с озимыми. Этот факт может объясняться тем, что озимым культурам в начале вегетационного периода нередко приходится прорасти в более неблагоприятных условиях недостаточного увлажнения, в то время как посев яровых чаще производится в сроки, когда запас весенней влаги в почвах еще достаточен. Таким образом, озимые, видимо, изначально более приспособлены к дефициту воды на первых этапах развития проростка. Это дает им возможность нарастить необходимую вегетативную массу и лучше подготовиться к зимнему периоду.

В результате исследований образцы изучаемых культур были разделены на пять групп по устойчивости к засухе при осмотическом давлении 18 атм. (соответствуют 16,6 % раствору сахарозы): I – неустойчивые (от 0,0 до 18,0 % проросших семян в условиях высокого осмотического давления), II – слабоустойчивые (19,0–36,0 % проросших семян), III – среднеустойчивые (37,0–54,0 % проросших семян), IV – с устойчивостью выше средней (55,0–72,0 % проросших семян), V – высокоустойчивые (73,0 % и более проросших семян). У зерновых злаков не обнаружено сортов, относящихся к первой или пятой группе. Таким образом, среди изучаемых сортов отсутствуют как неустойчивые, так и высокоустойчивые к засухе сортоотипы.

Действие высокого осмотического давления на прорастающие семена (без предварительной СВЧ-обработки) указывает на то, что все изучаемые озимые хлебные злаки относятся к третьей группе со средней засухоустойчивостью, яровые – ко второй группе слабоустойчивых.

Проведенная обработка семян в электромагнитном поле сверхвысокой частоты показывает, что данный физический фактор способен существенно повысить засухоустойчивость проростков злаков. Данная тенденция отмечена для всех культур, однако ярче выражена у яровых. Так, при сравнении количества проросших семян при давлении 3 атм. и СВЧ-обработке относительно числа проростков при том же давлении, но без СВЧ-обработки в среднем по всем сортам яровых злаковых отмечена разница в 4,5 %, в то время как для озимых это отличие составляет только 0,8 %. Однако для давления 18 атм. подобные соотношения более значительны и составляют, соответственно, 2,0 раза для яровых и 14,1 % для озимых. Таким образом, яровые демонстрируют более сильный положительный отклик на действие электромагнитного поля, чем озимые культуры.

Более высокий процент проросших семян отражает способность сорта использовать скудные запасы влаги в почве, что говорит о его засухоустойчивости в начальные стадии развития [15]. Таким образом, определение относительной засухоустойчивости при использовании повышенного осмотического давления может сориентировать исследователя и товаропроизводителя о более вероятном поведении злаков тех или иных сортов в реальных полевых условиях. Это выражается и в категориях относительной засухоустойчивости. Так, после СВЧ-обработки четыре из шести изучаемых сортов перешли в группу с устойчивостью выше средней. При этом наиболее резкое повышение относительной засухоустойчивости при СВЧ-обработке зарегистрировано для семян ярового ячменя – число проросших семян при 18 атм. увеличилось в 2,3 раза относительно необработанных, но развивающихся при

тех же значениях концентрации осмотика. В связи с этим у семян ячменя сорта Сибиряк поменялась группа засухоустойчивости со второй на четвертую.

Для яровой пшеницы и ярового овса под действием ЭМП СВЧ зафиксирован переход в другую группу – из второй в третью, с повышением устойчивости до уровня «среднеустойчивых». Полученные нами данные подтверждают мнение о том, что засухоустойчивые генотипы проявляют способность к осмотической настройке [16]. Видимо, в нашем опыте мы столкнулись именно с этим процессом, спровоцированным непосредственным действием электромагнитного поля. Механизмы такого явления могут быть объяснены с позиций непосредственного влияния данного физического фактора на целый комплекс жизненно важных веществ зерновки: белковых молекул (в том числе, несомненно, и ферментов), аминокислот, жирных кислот и оксипиринов, многие из которых выступают в качестве сигнальных молекул или играют ключевые роли в реакциях метаболизма растений.

Заключение

Электромагнитное поле оказывает положительное действие на уровень засухоустойчивости озимых и яровых злаков. Стимулирующий эффект ЭМП СВЧ более интенсивно проявляется в отношении яровых культур – мягкой пшеницы, ячменя, овса, однако и на устойчивость к водному дефициту озимых – ржи, пшеницы, тритикале – действует положительно. При этом наиболее существенное повышение относительной засухоустойчивости при СВЧ-обработке зарегистрировано для семян ярового ячменя сорта Сибиряк.

Список литературы

1. Yuan W., Zheng Y., Piao S. [et al.]. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth // *Sci. Adv.* 2019. № 5. doi:10.1126/sciadv.aax1396
2. Zhou S., Zhang Y., Park Williams A., Gentine P. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events // *Sci. Adv.* 2019. № 5. doi:10.1126/sciadv.aau5740
3. FAO. Proactive Approaches to Drought Preparedness – where Are We Now and where Do We Go from Here? Rome, 2019. 51 s.
4. Nxele X., Klein A., Ndimba B. K. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants // *South African Journal of Botany.* 2017. Т. 108. P. 261–266. doi:https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.11.003
5. Ghadyeh-Zarrinabadi I., Razmjoo J., Mashhadi A. A., Boroomand A. Physiological response and productivity of pot marigold (*Calendula officinalis*) genotypes under water deficit // *Ind. Crops Prod.* 2019. № 139.
6. Wang L., Qu J. J. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing // *Geophysical Research Letters.* 2007. Т. 34, № 20.
7. Fouad H. Physiological traits and drought tolerance indices in advanced genotypes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Egyptian Journal of Agronomy.* 2018. Т. 40, № 2. P. 145–154.
8. Rajala A. [et al.]. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity // *Field Crops Research.* 2009. Т. 114, № 2. P. 263–271.
9. Shiri M. [et al.]. The survey of the morphological and physiological basis of maize grain yield under drought stress condition through path analysis // *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2013. Т. 3, № 24. P. 3647–3651.

10. Zhang J. China's success in increasing per capita food production // *Exp. Bot.* 2011. Vol. 62. P. 3707–3711. doi:10.1093/jxb/err132
11. Соболева О. М. Экологическая оценка действия электромагнитного поля на семена озимых злаков // *Достижения науки и техники АПК.* 2017. Т. 31, № 11. С. 47–49.
12. Пушкина Н. В. Особенности накопления жирных кислот и оксипиринов в проростках *Zea mays* L. под влиянием электромагнитного поля сверхвысокочастотного диапазона // *Химия растительного сырья.* 2020. № 2. С. 93–99. doi:https://doi.org/10.14258/jcprm.2020026268
13. Кожушко Н. Н. Оценка засухоустойчивости полевых культур // *Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям : метод. руководство.* Л. : ВИР, 1988. С. 10–24.
14. Парфенова Е. С., Шамова М. Г., Набатова Н. А., Псарева Е. А. Оценка относительной засухоустойчивости сортов озимой ржи способом проращивания на растворе сахарозы // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2018. № 11. С. 347–351.
15. Ионова Е. В., Некрасов Е. И. Физиологические методы оценки засухоустойчивости сортов и линий озимой пшеницы // *Зерновое хозяйство России.* 2013. № 5. С. 12–21.
16. Бычкова О. В., Хлебова Л. П., Совриков А. Б., Титова А. М. Реакция генотипов яровой твердой пшеницы в условиях моделированного осмотического и солевого стресса // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2018. № 2. С. 5–11.

References

1. Yuan W., Zheng Y., Piao S. [et al.]. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Sci. Adv.* 2019;(5). doi:10.1126/sciadv.aax1396
2. Zhou S., Zhang Y., Park Williams A., Gentine P. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events. *Sci. Adv.* 2019;(5). doi:10.1126/sciadv.aau5740
3. *FAO. Proactive Approaches to Drought Preparedness – where Are We Now and where Do We Go from Here?* Rome, 2019:51.
4. Nxele X., Klein A., Ndimba B.K. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany.* 2017;108:261–266. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.11.003>
5. Ghadyeh-Zarrinabadi I., Razmjoo J., Mashhadi A.A., Boroomand A. Physiological response and productivity of pot marigold (*Calendula officinalis*) genotypes under water deficit. *Ind. Crops Prod.* 2019;(139).
6. Wang L., Qu J.J. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters.* 2007;34(20).
7. Fouad H. Physiological traits and drought tolerance indices in advanced genotypes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Egyptian Journal of Agronomy.* 2018;40(2): 145–154.
8. Rajala A. [et al.]. Spring wheat response to timing of water deficit through sink and grain filling capacity. *Field Crops Research.* 2009;114(2):263–271.
9. Shiri M. [et al.]. The survey of the morphological and physiological basis of maize grain yield under drought stress condition through path analysis. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2013;3(24):3647–3651.
10. Zhang J. China's success in increasing per capita food production. *Exp. Bot.* 2011;62: 3707–3711. doi:10.1093/jxb/err132

11. Soboleva O.M. Ecological assessment of the electromagnetic field's effect on the seeds of winter cereals. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2017;31(11):47–49. (In Russ.)
12. Pushkina N.V. Features of the accumulation of fatty acids and oxylipins in seedlings *Zeamaize L.* under the effect of the microwave electromagnetic field. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw materials*. 2020;(2):93–99. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020026268>
13. Kozhushko N.N. Assessment of drought tolerance of field crops. *Diagnostika ustoychivosti rasteniy k stressovym vozdeystviyam: metod. rukovodstvo = Diagnostics of plant resistance to stress: methodological allowance*. Leningrad: VIR, 1988:10–24. (In Russ.)
14. Parfenova E.S., Shamova M.G., Nabatova N.A., Psareva E.A. Evaluation of the relative drought resistance of winter rye varieties by germination on sucrose solution. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International journal of applied and basic research*. 2018;(11):347–351. (In Russ.)
15. Ionova E.V., Nekrasov E.I. Physiological methods for assessing drought resistance of varieties and lines of winter wheat. *Zernovoe khozyaystvo Rossii = Grain farming in Russia*. 2013;(5):12–21. (In Russ.)
16. Bychkova O.V., Khlebova L.P., Sovrikov A.B., Titova A.M. Response of spring durum wheat genotypes under simulated osmotic and salt stress. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altay State Agrarian University*. 2018;(2):5–11. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Михайловна Соболева

кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры микробиологии, иммунологии и вирусологии, Кемеровский государственный медицинский университет Минздрава России (Россия, г. Кемерово, ул. Ворошилова, 22 А)

E-mail: meer@yandex.ru

Olga M. Soboleva

Candidate of biological sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of microbiology, immunology and virology, Kemerovo State Medical University (22 A Voroshilova street, Kemerovo, Russia)

Екатерина Петровна Кондратенко

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры агрономии, селекции и семеноводства, Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия (Россия, г. Кемерово, ул. Марковцева, 5)

E-mail: meer@yandex.ru

Ekaterina P. Kondratenko

Doctor of agricultural sciences, professor, professor of the sub-department of agronomy, breeding and seed production, Kuzbass State Agricultural Academy (5 Markovtseva street, Kemerovo, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.02.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.05.2021

Принята к публикации / Accepted 20.07.2021

УДК 581.1:581.14:581.142
doi:10.21685/2307-9150-2021-3-4

Изучение солеустойчивости районированных в Дагестане сортов озимой пшеницы по морфометрическим показателям

Н. С. Таймазова¹, М. Г. Муслимов²

^{1,2}Дагестанский государственный аграрный университет
имени М. М. Джамбулатова, Махачкала, Россия

¹narisat@bk.ru, ²mizenfer@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из результатов глобального потепления климата является засоление почв. В этой связи проблема изучения устойчивости растений к повышенным концентрациям солей в почве приобретает особую актуальность. На территории равнинной зоны Дагестана наиболее распространены хлоридный и сульфатный виды засоления почв. Цель исследований состояла в изучении лабораторными методами особенностей роста и развития озимой пшеницы в различных условиях засоления. Нами была поставлена задача – выяснить, как влияют различные виды засоления (NaCl и Na₂SO₄) на процессы прорастания семян и роста проростков озимой пшеницы. *Материалы и методы.* Были исследованы семь сортов озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum*), районированных в Республике Дагестан: Гром, Васса, Таня, Сила, Безостая 1, Дон 105, Ростовчанка. Опыты проводили в двух вариантах: I вариант – проращивание семян сортов озимой пшеницы в разных солевых растворах в чашках Петри; II вариант – проращивание в вегетационных сосудах с использованием засоленного субстрата. Контрольные опыты проводили с использованием дистиллированной воды. *Результаты.* В контрольных опытах обоих вариантов эксперимента семена имели хорошую всхожесть. В среде с солями количество проросших семян снизилось, особенно при сульфатном засолении (на 67,2 %). Длина корешков при хлоридном засолении уменьшилась на 78,1 %, при сульфатном – на 91,3 %. Наименьшее отклонение экспериментальных данных от контрольных отмечено у сортов Васса и Ростовчанка. Самое большое отклонение от контроля у сорта Безостая 1 в обоих солевых растворах. В вегетационном варианте при хлоридном засолении длина корешков уменьшилась на 60,2 %, при сульфатном засолении – на 63,1 %. Засоление в чашках Петри привело к уменьшению длины побегов, соответственно на 92,5 и 95,5 %. В вегетационном опыте этот показатель уменьшился при хлоридном засолении на 59,0 %, при сульфатном засолении – на 67,2 %. Провести сравнение морфометрических параметров листа позволяет только вегетационный вариант опыта. В контрольном опыте минимальная площадь листа отмечена у сорта Гром (78,2 мм²). Сорт Сила превосходил другие сорта по длине, ширине и площади листовой пластинки (190,7 мм; 6,2 мм; 334,1 мм² соответственно). В условиях хлоридного засоления наибольшие параметры были у сорта Васса, у которого длина побега составила 133,5 мм, длина листа – 78,4 мм, площадь листовой пластинки – 169,0 мм². Наименьшие показатели были у сорта Дон 105 (34,3 мм; 14,2 мм; 22,9 мм² соответственно). В условиях сульфатного засоления наибольшие параметры были

отмечены у сорта Васса, у которого длина побега составила 104 мм, длина листа – 70,4 мм, а площадь листовой пластинки – 132,5 мм². Наименьшие показатели линейного прироста были у сорта Безостая 1, соответственно 33,8 мм; 14,0 мм; 22,9 мм². Анализ сухой и сырой биомассы показал, что независимо от вида засоления наблюдается снижение сырой и сухой биомассы. *Выводы.* Как сульфатное, так и хлоридное засоление оказывает отрицательное воздействие на проростки озимой пшеницы, проявляющиеся в снижении их морфометрических показателей. На первых этапах онтогенеза сильнее проявляет свое негативное влияние сульфатное засоление по сравнению с хлоридным. Наиболее устойчивым к обоим видам засоления является районированный в Республике Дагестан сорт мягкой пшеницы Васса, у которого угнетение ростовых процессов в условиях солевого стресса проявлялось в меньшей степени. Наиболее низкие показатели солеустойчивости выявлены для пшеницы сортов Дон 105 и Безостая 1 при обоих видах засоления.

Ключевые слова: озимая пшеница, солеустойчивость, хлоридное засоление, сульфатное засоление

Для цитирования: Таймазова Н. С., Муслимов М. Г. Изучение солеустойчивости районированных в Дагестане сортов озимой пшеницы по морфометрическим показателям // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 36–44. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-4

The study of salt resistance of winter wheat varieties zoned in Dagestan according to morphometric indicators

N.S. Taymazova¹, M.G. Muslimov²

^{1,2}Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov,
Makhachkala, Russia

¹narisat@bk.ru, ²mizenfer@mail.ru

Abstract. Background. One of the results of global climate warming is salinization of soils. That is why, the problem of studying the resistance of plants to increased concentrations of salts in the soil becomes especially urgent. On the territory of Dagestan lowland zone, chloride and sulfate types of salinization of soils are most common. The purpose of the research was to study by laboratory methods the features of the growth and development of winter wheat in various salinization conditions. We set the task – to find out how various types of salinization (NaCl and Na₂SO₄) affect the processes of seed germination and the growth of seedlings of winter wheat. *Materials and methods.* 7 varieties of winter soft wheat (*Triticum aestivum*) zoned in the Republic of Dagestan were investigated: Thunder, Vassa, Tanya, Sila, Bezostaya 1, Don 105, Rostovchanka. Experiments were carried out in two versions: version I – germination of seeds of winter wheat varieties in different saline solutions in Petri dishes; II variant – germination in growing vessels using saline substrat. Control tests were performed using distilled water. *Results.* In control experiments of both versions of the experiment, the seeds had good germination. In the medium with salts, the number of germinated seeds decreased, especially with sulfate salinization (by 67.2 %). The length of the roots with chloride salinization decreased by 78.1 %, with sulfate – by 91.3 %. The smallest deviation of experimental data from the controls was noted in the varieties of Vassa and Rostovchanka. The largest deviation from control in Bezostaya 1 class in both saline solutions. In the vegetation version, with chloride salinization, the length of the roots decreased by 60.2 %, with sulfate salinization – by 63.1 %. Salinization in Petri dishes reduced the length of shoots by 92.5 and 95.5 % respectively. In the growing experience, this indicator decreased with chloride salinization by 59.0 %, with sulfate salinization – by 67.2 %. Only the growing version of the experience allows you to compare the

morphometric parameters of the sheet. In the control test, the minimum sheet area was observed in the Thunder variety (78.2 mm²). The Strength variety exceeded other varieties in length, width and area of the leaf plate (190, 7 mm; 6,2 mm; 334,1 mm² respectively). Under conditions of chloride salinization, the largest parameters were in the Vass variety, in which the escape length was 133.5 mm, the leaf length was 78.4 mm, and the leaf blade area was 169.0 mm². The lowest indicators were in the Don 105 class (34.3 mm; 14.2 mm; 22.9 mm² respectively). Under conditions of sulfate salinization, the largest parameters were noted in the Vass variety, in which the escape length was 104 mm, the length of the sheet was 70.4 mm, and the area of the leaf blade was 132.5 mm². The lowest linear growth rates were for the Thunder variety, respectively, 33.8 mm; 14.0 mm; 22.9 mm². Analysis of dry and raw biomass showed that, regardless of the type of salinization, there was a decrease in raw and dry biomass. *Conclusions.* Both sulfate and chloride salinization have a negative effect on seedlings of winter wheat, manifested in a decrease in their morphometric values. At the first stages of ontogenesis, sulfate salinization shows its negative effect more strongly compared to chloride salinization. The most resistant to both types of salinization is the soft wheat variety Vassa, zoned in the Republic of Dagestan, in which the inhibition of growth processes in conditions of salt stress was manifested to a lesser extent. The lowest salt resistance indicators were found for Don 105 and Spotless 1 wheat in both types of salinization.

Keywords: winter wheat, salt resistance, chloride salinization, sulfate salinization

For citation: Taymazova N.S., Muslimov M.G. The study of salt resistance of winter wheat varieties zoned in Dagestan according to morphometric indicators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):36–44. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-4

Введение

Одним из основных абиотических стрессов, ограничивающих производство сельскохозяйственных культур, является засоление. Повышенное содержание в почве ионов неорганических солей оказывает сильное ингибирующее воздействие на рост, развитие и в конечном итоге на урожайность культурных растений [1].

Одним из результатов глобального потепления климата является засоление почв. В этой связи проблема изучения устойчивости растений к повышенным концентрациям солей в почве приобретает особую актуальность. На территории равнинной зоны Дагестана наиболее распространены хлоридный и сульфатный виды засоления почв.

Кроме того, в результате процессов вторичного засоления такие земли постоянно увеличиваются, что ограничивает расширение площадей под сельскохозяйственные культуры в засушливых районах [2].

Устойчивость растений к солям определяется, с одной стороны, уровнем их содержания в почве (осмотический фактор), с другой – химической природой веществ, вызывающих специфичность засоления. При высокой концентрации солей сглаживается химическая специфичность засоления, и решающую роль имеет осмотический фактор [3].

Почвы с карбонатно-натриевым засолением практически непригодны для произрастания большинства растений. Поэтому наиболее подробно изучается влияние на растение хлоридного и сульфатного засоления [4].

Существует большое количество прямых и косвенных физиологических методов оценки солеустойчивости культур, основанных на учете различных показателей [4].

Физиологический и вегетационный метод позволяет определять уровень солеустойчивости данного вида растения или культурного сорта, устанавливать предельные значения засоления, при котором возможно прорастание семян, сравнивать солеустойчивость семян различных видов и сортов [5–6].

Цель исследования – изучение лабораторными методами особенностей роста и развития озимой пшеницы в различных условиях засоления.

Материалы и методы

Были исследованы семь сортов озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum*), районированных в Республике Дагестан: Гром, Васса, Таня, Сила, Безостая 1, Дон 105, Ростовчанка. Выбор этой культуры объясняется ее наибольшей значимостью и распространенностью в сельском хозяйстве Республики Дагестан.

Опыты по определению солеустойчивости проводили в двух вариантах:

I вариант – проращивание семян сортов озимой пшеницы в разных солевых растворах в чашках Петри:

– хлоридное засоление – 1,4 % раствор NaCl (соответствует осмотическому давлению растворов 1 МПа);

– сульфатное засоление – 2,9 % Na_2SO_4 (соответствует осмотическому давлению растворов 1 МПа);

– контроль – дистиллированная вода.

II вариант – проращивание семян сортов озимой пшеницы в вегетационных сосудах с использованием засоленного субстрата:

– вегетационные сосуды с субстратом из песка, который поливали 1,4 % раствором хлорида натрия (NaCl);

– вегетационные сосуды с субстратом из песка, который поливали 2,9 % раствором сульфата натрия (Na_2SO_4);

– контроль – дистиллированная вода.

Использовали 1,4 % раствор хлорида натрия и 2,9 % раствор сульфата натрия, потому что они соответствуют осмотическому давлению растворов 1 МПа.

Опыты проводили в трехкратной повторности.

В варианте эксперимента с проращиванием семян в чашках Петри объем выборки составлял 50 шт. для каждого сорта и контроля. Семена проращивали на фильтровальной бумаге. Чашки помещали в термостат ТС-1/20 СПУ с заданной температурой 25 °С. На 10-й день проводили учеты следующих показателей: лабораторную всхожесть семян, длину проростков и корешков, сырую и сухую массу побегов и корешков. К всхожим относили семена, длина корешков которых составляла половину длины семени [7].

В вегетационном эксперименте объем выборки составлял 100 шт. для каждого сорта и контроля. Вегетационные сосуды помещали в климатическую камеру GC-300 с искусственным освещением при температуре 23/21 °С (день/ночь) и относительной влажности воздуха 70 %. На 10-й день учитывали следующие показатели: лабораторную всхожесть семян, длину побегов и корней, длину и ширину первого листа, площадь первого листа, сырую и сухую массу корней и побегов.

Работа выполнена в лаборатории биотехнологии кафедры ботаники, генетики и селекции Дагестанского государственного аграрного университета имени М. М. Джембулатова.

Результаты и обсуждение

Семенам свойствен физиологический покой разной глубины, вызванный действием физиологического механизма торможения [8].

Важнейшей реакцией на действия различных стресс-факторов, в том числе на засоленность почвы, является снижение всхожести семян (табл. 1).

Таблица 1

Влияние различных видов засоления на всхожесть семян сортов озимой пшеницы

Сорт	Дистиллированная вода (контроль)		Раствор NaCl		Раствор Na ₂ SO ₄	
	I вариант	II вариант	I вариант	II вариант	I вариант	II вариант
Безостая 1	47,9 ± 3,1	44 ± 2,5	22,5 ± 3,4	19,5 ± 1,8	18,6 ± 1,9	15,6 ± 1,5
Васса	92,3 ± 5,1	79,1 ± 4,8	82,1 ± 4,5	69,5 ± 4,2	61,7 ± 5,0	56,9 ± 3,1
Гром	89,3 ± 4,4	55,7 ± 2,9	80,0 ± 4,3	46,4 ± 2,0	59,6 ± 4,1	26,1 ± 3,6
Дон 105	72,6 ± 2,7	49,0 ± 3,9	60,8 ± 4,2	30,2 ± 2,7	31,0 ± 2,7	17,4 ± 1,7
Ростовчанка	90,9 ± 2,1	60,5 ± 4,4	68,7 ± 5,4	35,1 ± 2,9	50,5 ± 3,2	29,9 ± 2,1
Сила	90,5 ± 1,8	69,3 ± 4,6	72,3 ± 4,5	48,0 ± 3,6	58,8 ± 4,0	44,0 ± 2,9
Таня	91,7 ± 3,5	90,1 ± 3,3	81,5 ± 3,9	70,0 ± 2,7	61,0 ± 4,7	50,0 ± 2,7
НСР05	0,79	0,85	0,77	0,64	0,71	0,74

Примечание. I вариант – чашки Петри; II вариант – вегетационный сосуд; *M* – среднее арифметическое значение; ± – стандартная ошибка.

В контроле семена обоих вариантов имели хорошую всхожесть. Высокую лабораторную всхожесть семян в чашках Петри в контрольном варианте показали сорта Васса (92,3 %) и Таня (91,7 %); при NaCl – Васса (82,1 %) и Гром (80,0 %); при Na₂SO₄ – Васса (61,7 %) и Таня (61,0 %). Наименьший процент всхожести семян отмечался у сорта Безостая 1, соответственно по вариантам 47,9–22,5–18,6 %.

Высокие показатели лабораторной всхожести семян в вегетационных сосудах при засолениях показали сорта Таня (NaCl – 70,0 %, Na₂SO₄ – 50,0 %) и Сила (NaCl – 48,0 %, Na₂SO₄ – 44,0 %).

Наибольшую чувствительность к обоим видам засоления показал сорт Дон 105, у которого снижение процента всхожих семян по отношению к контролю составило 72,8–75,1 %. Это говорит о наименьшей устойчивости сорта, выведенного в условиях Ростовской области, к засолению.

Повышенное содержание солей в среде приводило к заметному замедлению ростовых процессов в обоих вариантах эксперимента (табл. 2).

При оценке сортов в чашках Петри получены следующие результаты. Длина корешков варьировала от 87,8 мм у сорта Гром до 149,8 мм у сорта Ростовчанка.

Таблица 2

Влияние различных видов засоления
на прирост линейных размеров проростков озимой пшеницы

Признаки	Дистиллированная вода (контроль)	Раствор NaCl		Раствор Na ₂ SO ₄	
	$X \pm mx$	$X \pm mx$	%	$X \pm mx$	%
Чашки Петри (в среднем по 7 сортам)					
Длина корешков, мм	119,7 ± 3,51	26,3 ± 1,07*	21,9	10,5 ± 0,54**	8,72
Длина ростков, мм	85,9 ± 1,97	6,5 ± 0,66*	7,5	3,9 ± 0,10**	2,9
Вегетационные сосуды (в среднем по 7 сортам)					
Длина корней, мм	117,2 ± 2,42	46,7 ± 0,68*	39,8	43,3 ± 0,63**	36,1
Длина ростков, мм	169,2 ± 2,72	71,0 ± 1,94*	41,9	67,2 ± 1,90**	39,7
Длина листа, мм	135,4 ± 2,54	43,1 ± 1,80*	31,8	39,0 ± 1,73**	28,8
Ширина листа, мм	4,4 ± 0,09	4,0 ± 0,08*	90,0	3,9 ± 0,06**	88,6
Площадь листа, мм ²	236,8 ± 6,81	91,1 ± 3,97*	38,4	82,7 ± 3,61**	34,9

Примечание. Статистически достоверные различия * – с контролем, ** – с NaCl при $P < 0,05$; % – отклонение от контроля.

Длина корешков при хлоридном засолении уменьшилась на 78,1 %, при сульфатном засолении – на 91,3 %. Эти же показатели в солевых растворах уменьшались и составили 26,3 и 10,5 мм соответственно. Самое большое отклонение от контроля по данному признаку отмечено у сорта Безостая 1 при сульфатном засолении и составило 8,72 %.

В вегетационном варианте средняя длина корней в контроле составила 117,2 мм. Длина корней по сортам варьировала от 36,0 мм у сорта Гром до 154,5 мм у сорта Таня. При хлоридном засолении длина корней уменьшилась на 60,2 %, при сульфатном засолении – на 63,1 %.

В экспериментах в чашках Петри длина ростков составила 85,9 мм, в вегетационных сосудах 169,2 мм.

Засоление в чашках Петри привело к уменьшению длины побегов, при этом сульфатное засоление сильнее угнетает ростовые процессы, чем хлоридное. Уменьшение длины ростков составило при разных видах засоления, на 92,5 и 95,5 % соответственно.

В вегетационном опыте этот показатель изменялся при хлоридном засолении до 71,0 мм (на 59,0 %) и сульфатном засолении до 67,2 мм (на 67,2 %).

В контрольном опыте минимальная площадь листа отмечена у сорта Гром (78,2 мм²). Сорт Сила превосходил другие сорта по длине, ширине и площади листовой пластинки (190,7 мм; 6,2 мм; 334,1 мм² соответственно).

В условиях хлоридного засоления наибольшие параметры были у сорта Васса, у которого длина побега составила 133,5 мм, длина листа – 78,4 мм, площадь листовой пластинки – 169,0 мм². Наименьшие показатели были у сорта Дон 105 (34,3 мм; 14,2 мм; 22,9 мм² соответственно).

В условиях сульфатного засоления наибольшие параметры были отмечены у сорта Васса, у которого длина побега составила 104 мм, длина листа – 70,4 мм, а площадь листовой пластинки – 132,5 мм². Наименьшие показатели

линейного прироста были у сорта Безостая 1 соответственно 33,8 мм; 14,0 мм; 22,9 мм².

Анализ сырой и сухой биомассы показал, что в стрессовых условиях происходит снижение сырой массы зародышевых корней, сырой и сухой массы побегов, независимо от вида засоления и использованной методики оценки (табл. 3).

Таблица 3

Влияние различных видов засоления на соотношение корневой системы и побегов в сырой и сухой биомассе проростков (%)

Варианты		Дистиллированная вода (контроль)	Раствор NaCl	Раствор Na ₂ SO ₄
Чашки Петри (в среднем по 7 сортам) <i>M ± m</i>				
сырая биомасса	корешков	62,7 ± 1,45	95,8 ± 1,82	97,4 ± 2,18
	ростков	71,2 ± 1,52	97,6 ± 1,94	98,6 ± 2,42
сухая биомасса	корешков	39,7 ± 1,21	6,6 ± 0,35	6,6 ± 0,35
	ростков	30,1 ± 0,66	5,3 ± 0,29	4,1 ± 0,23
Веgetационный сосуд (в среднем по 7 сортам) <i>M ± m</i>				
сырая биомасса	корней	55 ± 1,98	68,5 ± 1,91	70,9 ± 1,71
	побегов	62 ± 1,34	87,7 ± 1,78	93,7 ± 1,73
сухая биомасса	корней	46 ± 1,40	32,0 ± 0,70	30,6 ± 0,67
	побегов	40 ± 0,54	15,2 ± 0,20	8,8 ± 0,61

Примечание. *M* – среднее арифметическое значение; *m* – стандартная ошибка.

В среднем по сортам в условиях засоления проростки имели более развитые побеги и, соответственно, высокую сырую и сухую массу в вегетационном опыте по сравнению эксперимента в чашках Петри.

Заключение

1. В результате проведения оценки семи сортов озимой пшеницы по комплексу признаков установлено, что все виды засоления вызывают снижение морфометрических параметров проростков.

2. Наиболее устойчивым к обоим видам засоления является районированный в Республике Дагестан сорт озимой мягкой пшеницы Васса, у которого угнетение ростовых процессов в условиях стресса проявлялось в меньшей степени. Наиболее низкими показателями солеустойчивости отличаются сорта Безостая 1 и Дон 105 в обоих вариантах опыта при разных типах засоления.

3. Более ощутимое отрицательное воздействие на растения озимой пшеницы оказывает сульфатное засоление, чем хлоридное. Уменьшение сырой биомассы корней при сульфатном засолении происходит на 2,6 % и сырой биомассы побегов на 1,4 %.

4. Степень влияния засоленности на рост, развитие и урожайность озимой пшеницы зависит от сортовых особенностей и вида засоления.

Список литературы

1. Kordim E. L., Shevchenko G. V. Role of cytoskeleton in gravisensitivity of a plant cell: experimental date and hypotheses // *Tsitol Genet.* 2003. Vol. 37, № 2. P. 56–58.
2. Шахов А. А. Солеустойчивость растений. М. : Изд-во АН СССР, 1956. 552 с.
3. Николаевский В. С. [и др.]. Физиолого-биохимические механизмы повреждения и устойчивости растений. Новосибирск, 1981. 165 с.
4. Удовенко Г. В. Солеустойчивость культурных растений. М. : Колос, 1977. 150 с.
5. Удовенко Г. В., Синельникова В. Н., Давыдова Г. В. Оценка солеустойчивости растений // *Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям : метод. руководство.* Л. : ВИР, 1988. С. 85–87.
6. Удовенко Г. В. Методика диагностики устойчивости растений. Л. : Гидрометеоиздат, 1970. 74 с.
7. Йонева Ж. А., Петров-Спиридонов А. Е. Биометрические показатели и осмотический потенциал органов растений в условиях хлоридного засоления // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 1985. Вып. 3. С. 120–125.
8. Николаева М. Г. Особенности прорастания семян в зависимости от филогенетического положения и эколого-географических условий обитания растений // *Проблемы ботаники на рубеже 20–21 веков : тез. докл. СПб., 1998. С. 183–184.*

References

1. Kordim E.L., Shevchenko G.V. Role of cytoskeleton in gravisensitivity of a plant cell: experimental date and hypotheses. *Tsitol Genet.* 2003;37(2):56–58.
2. Shakhov A.A. *Soleustoychivost' rasteniy = Salt tolerance of plants.* Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1956:552. (In Russ.)
3. Nikolaevskiy V.S. [et al.]. *Fiziologo-biokhimicheskie mekhanizmy povrezhdeniya i ustoychivosti rasteniy = Physiological and biochemical mechanisms of plant damage and resistance.* Novosibirsk, 1981:165. (In Russ.)
4. Udovenko G.V. *Soleustoychivost' kul'turnykh rasteniy = Salt tolerance of cultivated plants.* Moscow: Kolos, 1977:150. (In Russ.)
5. Udovenko G.V., Sinel'nikova V.N., Davydova G.V. Assessment of plant salt tolerance. *Diagnostika ustoychivosti rasteniy k stressovym vozdeystviyam: metod. rukovodstvo = Diagnostics of plant resistance to stress: methodological textbook.* Leningrad: VIR, 1988:85–87. (In Russ.)
6. Udovenko G.V. *Metodika diagnostiki ustoychivosti rasteniy = Methodology for the diagnosis of plant resistance.* Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970:74. (In Russ.)
7. Yoneva Zh.A., Petrov-Spiridonov A.E. Biometric parameters and osmotic potential of plant organs under conditions of chloride salinization. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokozyaystvennoy akademii = Proceedings of Timiryazev Agricultural Academy.* 1985;(3): 120–125. (In Russ.)
8. Nikolaeva M.G. Features of seed germination depending on the phylogenetic position and ecological and geographical conditions of plant habitat. *Problemy botaniki na rubezhe 20–21 vekov: tez. dokl. = Issues of botany at the turn of the 20th–21st centuries.* Saint-Petersburg, 1998:183–184. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Нарисат Салавовна Таймазова

кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент, доцент кафедры ботаники,
генетики и селекции, Дагестанский
государственный аграрный университет
имени М. М. Джамбулатова
(Россия, г. Махачкала,
ул. М. Гаджиева, 180)

E-mail: narisat@bk.ru

Narisat S. Taymazova

Candidate of agricultural sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of botany, genetics and
breeding, Dagestan State Agrarian
University named after M.M. Dzhambulatov
(180 M. Gadzhievya street, Makhachkala,
Russia)

Мизенфер Гаджисеидович Муслимов

доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, заведующий кафедрой
ботаники, генетики и селекции,
Дагестанский государственный аграрный
университет имени М. М. Джамбулатова
(Россия, г. Махачкала,
ул. М. Гаджиева, 180)

E-mail: mizenfer@mail.ru

Mizenfer H. Muslimov

Doctor of agricultural sciences, professor,
head of the sub-department of botany,
genetics and breeding, Dagestan State
Agrarian University named after
M.M. Dzhambulatov (180 M. Gadzhiyeva
street, Makhachkala, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.05.2021

Принята к публикации / Accepted 10.06.2021

УДК 582.998.1:581.3:581.5
doi:10.21685/2307-9150-2021-3-5

Особенности семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) в Предуралье

И. Н. Кузьменко¹, Н. Л. Колясникова²

^{1,2}Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь, Россия

¹inkuzmenko@yandex.ru, ²Kolyasnikova@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Календула лекарственная на территории нашей страны выращивается в качестве лекарственного и декоративного растения, для успешного ее размножения важно изучить вопросы репродуктивной биологии вида. Особенности потенциальной и реальной семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. в Пермском крае исследованы впервые. Цель работы – изучить особенности семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. в условиях Предуралья. *Материалы и методы.* Наблюдения и сбор материала проводили в соответствии с общепринятыми методиками с 2018 по 2020 г. Изучали семенное размножение *Calendula officinalis* L., сорт Оранжевая. *Результаты.* Первые всходы календулы лекарственной наблюдались через неделю после посева, появление всходов было не дружное, затянутое от одной до трех недель в разные годы наблюдений. Начало цветения отмечалось во всех вариантах опыта во второй декаде июля и продолжалось в течение всего вегетационного периода. Начало плодоношения отмечалось во второй декаде августа. Выявлено, что *Calendula officinalis* L., сорта Оранжевая отличалась широкой изменчивостью числа ложноязычковых и трубчатых цветков в соцветии. Доля ложноязычковых цветков по отношению к трубчатым цветкам варьировала от 13 до 62 % и в среднем составила 40 % при коэффициенте вариации, равном 18 %. Образование семязачатка идет в завязи ложноязычковых цветков и краевых трубчатых. В центральных трубчатых обоюполюх цветках редуцировано рыльце и семязачаток, функционируют только тычинки. Фертильность пыльцевых зерен краевых трубчатых цветков варьировала от 77 до 84 %, центральных – от 30 до 50 %. Фертильность семязачатков варьировала от 67 до 91 %. Потенциальная семенная продуктивность составила 1067 семязачатков на растение, а реальная семенная продуктивность – 448 семян. В урожае календулы наблюдается гетерокарпичность семян. В среднем в наших исследованиях когтевидные семена составили – 19 %, ладьевидные – 20 %, кольцевидные – 61 %. *Выводы.* На основе проведенных исследований потенциальной и реальной семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. установлено, что цветение и созревание плодов растянуто во времени. Фертильность пыльцевых зерен и семязачатков оказалась достаточно высокой для успешного завязывания семян. Установлено, что в условиях Предуралья элементы, составляющие семенную продуктивность *Calendula officinalis*, такие, как число соцветий, число цветков в соцветии, число семян очень вариабельны. Лабораторная всхожесть ладьевидных семян оказалась выше, чем всхожесть когтевидных и кольцевидных, она составила 76 %.

Ключевые слова: семенная продуктивность, *Calendula officinalis* L., репродуктивная биология, фертильность пыльцы и семязачатков, Предуралье

Для цитирования: Кузьменко И. Н., Колясникова Н. Л. Особенности семенной продуктивности *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) в Предуралье // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 45–55. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-5

The features of seed productivity of *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) in the Preduralye region

I.N. Kuzmenko¹, N.L. Kolyasnikova²

^{1,2}Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

¹inkuzmenko@yandex.ru, ²Kolyasnikova@list.ru

Abstract. *Background.* *Calendula officinalis* on the territory of our country is grown as a medicinal and ornamental plant, for its successful reproduction it is important to study the issues of the reproductive biology of the species. The features of the potential and actual seed productivity of *Calendula officinalis* L. in Perm have been studied for the first time. The purpose of this work is to study the features of seed productivity of *Calendula officinalis* L. in the conditions of the Preduralye region. *Materials and methods.* Observations and material collection were carried out in accordance with generally accepted methods from 2018 to 2020. Seed propagation of *Calendula officinalis* L., variety Orange, was studied. *Results.* The first shoots of *Calendula officinalis* were observed a week after sowing, the emergence of shoots was not amicable, prolonged from one to three weeks in different years of observation. The beginning of flowering was noted in all variants of the experiment in the second decade of July and continued throughout the entire growing season. The beginning of fruiting was noted in the second decade of August. It was revealed that *Calendula officinalis* L. variety Orange was distinguished by a wide variability in the number of pseudo-ligate and tubular flowers in the inflorescence. The proportion of pseudo-reed flowers in relation to tubular flowers varied from 13 to 62 % and averaged 40 % with a coefficient of variation equal to 18 %. The ovule is formed in the ovary of false-ligular flowers and marginal tubular flowers. In the central tubular bisexual flowers, the stigma and ovule are reduced, only the stamens function. The fertility of pollen grains of marginal tubular flowers varied from 77 to 84 %, and of central ones, from 30 to 50 %. Fertility of ovules varied from 67 to 91 %. The potential seed productivity was 1067 ovules per plant, and the real seed productivity was 448 seeds. In the harvest of calendula, seeds are heterocarpic. On average, in our studies, claw-shaped seeds accounted for 19 %, scaphoid seeds – 20 %, ring-shaped seeds – 61 %. *Conclusions.* Based on the studies carried out on the potential and actual seed productivity of *Calendula officinalis* L., it has been established that flowering and ripening of fruits are extended over time. The fertility of pollen grains and ovules was high enough for successful seed setting. It has been established that, under the conditions of the Preduralye region, the elements that make up the seed productivity of *Calendula officinalis*, such as the number of inflorescences, the number of flowers per inflorescence, and the number of seeds, are very variable. The laboratory germination capacity of scaphoid seeds was higher than the germination capacity of claw-shaped and ring-shaped seeds, it was 76 %.

Keywords: seed productivity, *Calendula officinalis* L., reproductive biology, pollen and ovule fertility, the Preduralye region

For citation: Kuzmenko I.N., Kolyasnikova N.L. The features of seed productivity of *Calendula officinalis* L. (Asteraceae) in the Preduralye region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennyye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):45–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-5

Введение

Календула лекарственная *Calendula officinalis* L. на территории нашей страны выращивается в качестве лекарственного и декоративного растения, для успешного ее размножения важно изучить вопросы репродуктивной биологии вида. Цель работы – изучить особенности семенной продуктивности

Calendula officinalis L. в условиях Предуралья. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- 1) исследовать особенности цветения и опыления календулы лекарственной сорта Оранжевая;
- 2) изучить фертильность пыльцы и семязачатков;
- 3) определить потенциальную и реальную семенную продуктивность календулы;
- 4) оценить энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян календулы.

Материалы и методики

Наблюдения и сбор материала проводили в 2018–2020 гг. на территории учебно-научного поля Пермского государственного аграрно-технологического университета имени академика Д. Н. Прянишникова. Объект исследования – *Calendula officinalis* L. (Asteraceae), сорта Оранжевая. Фенологические наблюдения проводились с учетом работы И. Д. Юркевич, Д. С. Голод, Э. П. Ярошевича [1]. Фиксировались даты наступления пяти фенологических фаз: всходы, вегетация, бутонизация, цветение и плодоношение. Посев проводили в мае, сухими нестратифицированными, несепарированными семенами. Полевые опыты, наблюдения и учеты проводили по стандартным методикам [2]. Площадь делянки составляла 1 м². Повторность в опыте была шестикратная. Для выявления возможности самоопыления целые растения изолировали нетканым синтетическим материалом «геотекстиль». Определяли гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК).

Оценка пыльцевых зерен и семязачатков проводилась на временных микропрепаратах [3]. Препараты изучались с помощью микроскопа «Биомедломо» при увеличении окуляра – 15× и окуляр-микрометра (ОМП) с сеточкой и объектива – 40×. Потенциальную семенную продуктивность (ПСП), реальную семенную продуктивность (РСП) и процент семенификации (ПС) определяли по методикам, предложенным Т. А. Работновым и И. В. Вайнагий [4–6]. Лабораторную всхожесть семян определяли согласно ГОСТ 12038–84¹. Все полученные данные обрабатывали методами вариационной статистики. Для каждого изучаемого признака вычисляли варьирование (min–max), среднее арифметическое (M), его ошибку (m). Сравнение средних арифметических проводили с помощью t -критерия Стьюдента [7].

Результаты и обсуждение

Погодные условия в г. Перми в период проведения исследований были различными. Наблюдались перепады температур и влажности. Средняя температура лета 2018 г. составила +16,7 °С, 2020 г. +16,9 °С, что соответствует климатической норме. В 2019 г. средняя температура лета составила +15,2 °С, что холоднее средней многолетней на 1,7°. Условия увлажнения характеризовались резкими перепадами в годы наблюдений. Избыточно увлажненными были июнь 2018 и 2020 г., июль 2019 г., август 2018 и 2019 г.

¹ ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М. : Изд-во стандартов, 2011. 30 с.

(ГТК – гидротермический коэффициент 2,1–5,6), а недостаточно увлажненными был июль 2018 и 2020 г. (ГТК 0,6–0,7). В целом за вегетационный период больше осадков выпало в 2019 г. – 535 мм, в 2018 г. – всего 303 мм, в 2020 г. – 334 мм. На рис. 1 представлены средние метеорологические показатели по каждому году исследования и в сравнении со средними многолетними данными.

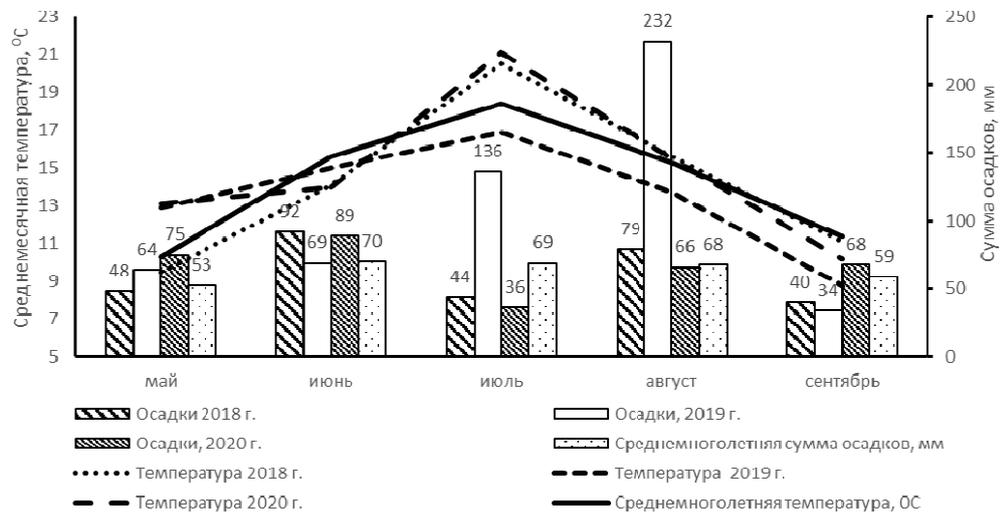


Рис. 1. Метеорологические показатели в период вегетации *Calendula officinalis* (2018–2020)

Посев производили сухими нестратифицированными семенами в разные даты мая – 21 мая в 2018 г., 14 мая в 2019 г. и 8 мая в 2020 г. при наступлении физической спелости почвы. Первые всходы календулы лекарственной наблюдались через неделю после посева, появление всходов было не дружное, затянутое от одной до трех недель в разные годы наблюдений. Начало цветения отмечалось во всех вариантах опыта во второй декаде июля и продолжалось в течение всего вегетационного периода. Так, в 2018 г. фаза цветения фиксировалась 20 июля, в 2019 г. – 18 июля, в 2020 г. – 17 июля. Начало плодоношения отмечалось во второй декаде августа (в 2018 г. – 12 августа, в 2019 г. – 17 августа, в 2020 г. – 14 августа). Продолжительность периода вегетации в 2018 г. – 147 дней, в 2019 г. – 143 дня, в 2020 г. – 140 дней. В Алтайском крае, по данным Е. Ж. Царегородцевой, вегетационный период календулы лекарственной составил 102–114 дней, в условиях лесостепи Среднего Поволжья – 132–160 дней (данные Е. Н. Вельмисевой) [8–9].

Формирование соцветий на растении календулы лекарственной происходит в следующей последовательности. На главном побеге 1-го порядка образуется одно терминальное соцветие, затем в пазухах листьев этого побега закладываются побеги 2-го порядка в количестве от 3 до 5 с одним соцветием на каждом. Далее на побегах 2-го порядка в пазухах листьев закладываются побеги 3-го порядка, а на них 4-го порядка в количестве от 1 до 3. Таким образом, терминальное соцветие на побеге первого порядка всегда одно на растение, соцветий на побегах второго порядка до 5 на растение, на побегах третьего порядка до 10 на растение, четвертого порядка до 11 на растение. Чаще всего на растении формируются побеги 1-го, 2-го, 3-го порядка (рис. 2).

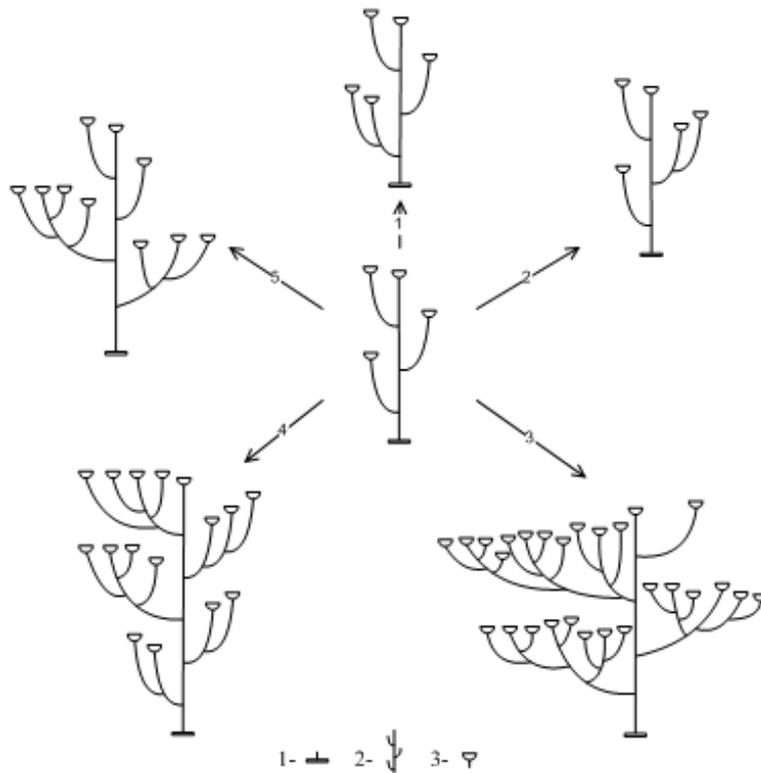


Рис. 2. Возможные пути развития генеративного побега *Calendula officinalis* L., сорт Оранжевая. Условные обозначения: 1 – корневая шейка; 2 – стебель; 3 – соцветие

Если регулярно собирать соцветия на лекарственное сырье, то происходит значительное увеличение числа корзинок на одно растение – до 31.

Выявлено, что *Calendula officinalis* L., сорта Оранжевая отличалась широкой изменчивостью числа ложноязычковых и трубчатых цветков в соцветии. Количество цветков в корзинке составило в среднем 448,5–372,5 шт. в разные годы, оно варьировалось от 140 до 712 для генеративных побегов 1-го, 2-го, 3-го порядков (табл. 1). Доля ложноязычковых цветков по отношению к трубчатым цветкам варьировалась от 13 до 62 % и в среднем составила 40 % при коэффициенте вариации, равном 18 %.

Сорт Оранжевая относится к махровым, декоративным формам календулы. По данным Е. В. Карпинской, махровость соцветий обусловлена формированием преимущественно женских ложноязычковых цветков, у которых полностью подавлено развитие тычинок и сильно разрастается венчик. Махровость в определенной мере зависит от гидротермальных условий в период формирования генеративных побегов, как правило она выше в прохладные и влажные годы [10]. В наших наблюдениях в сравнительно влажном и прохладном июле 2019 г., когда началась фаза цветения корзинок побегов 1-го порядка, махровость возросла в среднем на 18 %.

В корзинке первыми распускаются краевые цветки, затем цветение распространяется от края к центру рядами, последними распускаются самые центральные цветки. Краевые цветки женские, ложноязычковые, зигоморфные из трех сросшихся лепестков, с нижней завязью и двухлопастным рыльцем, срединные цветки обоеполые, трубчатые, актиноморфные из пяти

сросшихся лепестков и пяти тычинок. Пестик ценокарпный из двух плодolistиков с нижней завязью, чашечка редуцирована, вместо нее хохолок из волосков. Пыльцевые зерна трубчатых цветков – 3-, 4-борозднооровые, сфероидальные, слегка сплюснутые с полюсов. Очертания в полярном и экваториальном положении округлые. Скульптура поверхности пыльцы крупношиповатая, экваториальный диаметр – 41,7 (40,2–42,3) мкм. Наши показатели формы и размеров пыльцевых зерен соответствуют литературным данным [11]. Образование семязачатка идет в завязи ложноязычковых цветков и краевых трубчатых. В центральных трубчатых обоеполых цветках рыльце и семязачаток редуцированы, функционируют только тычинки. По-нашему мнению и мнению других авторов [12], редукция семязачатков в центральных трубчатых цветках связана с краевым расположением проводящей системы и нехваткой питания для их развития.

Фертильность пыльцевых зерен краевых трубчатых цветков варьировала от 77 до 84 %, центральных – от 30 до 50 %. Фертильность семязачатков варьировала от 67 до 91 % [13].

Разница между средними показателями числа цветков в корзинках разного порядка достоверна. Критерий Стьюдента (t_{st}) больше, чем табличное значение $P = 0,05$ $t_{st} = 2,01$.

Переход от цветения к плодоношению приходился на середину августа. В это время отцветали первые терминальные корзинки, венчики краевых ложноязычковых цветков подсыхали и появлялись зеленые семянки. Генеративные побеги начинали ветвиться, появлялись побеги следующих порядков.

Продолжительность фазы плодоношения зависела от погодных условий, в прохладную и влажную погоду наблюдалось увеличение срока созревания семянок. Например, в 2019 г. межфазный период от цветения до плодоношения составил 30 дней, а в 2018 г. – 23 дня, в 2020 г. – 28 дней.

Последовательность формирования плодов и семян *Calendula officinalis* соответствует порядку распускания цветков в корзинке и соцветий на побеге. В начале октября с наступлением заморозков цветение прекращалось, наблюдалось побурение и осыпание семянок.

Для выявления возможности самоопыления корзинки с цветками в стадии бутонів изолировали в пакеты из геотекстиля. В результате изоляции семянки не сформировались, что указывает на отсутствие самоопыления. Успешное завязывание и формирование полноценных семянок наблюдалось только при свободном опылении цветков корзинки.

Исследования потенциальной и реальной семенной продуктивности календулы лекарственной, согласно методикам Т. А. Работнова и В. И. Вайнагий, в литературе нам не встретились. Рядом авторов опубликованы лишь данные по урожайности календулы, выраженные в ц/га [8–9]. Особенности завязывания семян и семенной продуктивности не изучены.

Поскольку часть обоеполых трубчатых цветков стерильные (отсутствуют семязачатки), мы провели дифференцированный учет цветков при определении потенциальной семенной продуктивности. Среднее число ложноязычковых и краевых трубчатых цветков в соцветии *Calendula officinalis* L., сорта Оранжевая в 2020 г. составило в среднем 142,3, число корзинок на растение равнялось в среднем 7,5. Таким образом, потенциальная семенная продуктивность составила 1067 семязачатков на растение, а реальная семенная продуктивность – 448 семян (табл. 2).

Таблица 1

Потенциальная и реальная семенная продуктивность *Calendula officinalis* L., сорт Оранжевая

Год	Порядок ветвления	Количество, шт. $M \pm m$					РСП	Процент семенификации, %
		цветков в корзинке		корзинки на одно растение	семянков в корзинке	ПСП		
2018	1	581,2 ± 30,8	448,5 ± 21,9	9,0 ± 2,8	52,1 ± 16,3	4037	12	
	2	423,1 ± 14,1						
	3	219,6 ± 15,1						
2019	1	514,2 ± 17,0	372,5 ± 17,1	8,7 ± 2,7	50,8 ± 23,8	3241	14	
	2	395,0 ± 18,5						
	3	208,2 ± 7,8						
2020	1	508,4 ± 58,4	355,0 ± 37,6	7,5 ± 1,5	59,7 ± 2,5	2668	17	
	2	377,0 ± 56,3						
	3	203,4 ± 23,2						

Таблица 2

Потенциальная и реальная семенная продуктивность
Calendula officinalis L., сорт Оранжевая, 2020 г.

Признак	Min–max	$M \pm m$
Количество соцветий на одно растение, шт.	3–21	$7,5 \pm 1,54$
Количество ложноязычковых и краевых трубчатых цветков в одном соцветии, шт.	56–185	$142,3 \pm 15,0$
ПСП	168–3885	1067
Количество семян в одном соцветии, шт.	30–104	$59,7 \pm 2,5$
РСП	90–2184	448
Процент семенификации, %	21–56	42

В урожае календулы наблюдается гетерокарпичность семян. Нам встречались разные сочетания: корзинки, в которых только кольцевидные семянки; краевые когтевидные, срединные ладьевидные, центральные кольцевидные; краевые когтевидные, срединные кольцевидные; краевые ладьевидные, срединные кольцевидные. В среднем в наших исследованиях когтевидные семена составили – 19 %, ладьевидные – 20 %, кольцевидные – 61 %.

Лабораторная всхожесть семян, сформировавшихся из наружных трубчатых цветков корзинки (срединные ладьевидные), оказалась выше, чем всхожесть семян из краевых ложноязычковых (когтевидные) и внутренних трубчатых (кольцевидные), она составила 76 % (табл. 3).

Таблица 3

Энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян
Calendula officinalis L., сорт Оранжевая, 2020 г.

Типы семян	Энергия прорастания, %	Лабораторная всхожесть, %
	(min–max)	(min–max)
Когтевидные	18(8–40)	41(24–60)
Ладьевидные	63(52–72)	76(64–88)
Кольцевидные	8(0–12)	47(32–72)

После года хранения всхожесть семян снижалась на 50 % во всех фракциях.

Заключение

1. Цветение и созревание плодов растянуто во времени. Период от начала цветения до плодоношения составил 23–30 дней. Образование плодов происходит в последовательности согласно порядку цветения корзинок, в связи с чем цветение и созревание плодов растянуты во времени.

2. Фертильность пыльцевых зерен и семязачатков оказалась достаточно высокой для успешного завязывания семян. Фертильность пыльцевых зерен краевых трубчатых цветков составила 77–84 %, центральных трубчатых цветков – 30–50 %. Фертильность семязачатков – 67–91 %.

3. Установлено, что в условиях Предуралья элементы, составляющие семенную продуктивность *Calendula officinalis* такие, как число соцветий, число цветков в соцветии, число семян очень переменны. При дифференцированном учете женских трубчатых фертильных цветков процент семенности составил 42 %.

4. Лабораторная всхожесть ладьевидных семян оказалась выше, чем всхожесть когтевидных и кольцевидных, она составила 76 %. После года хранения всхожесть семян снижалась на 50 % во всех фракциях.

Список литературы

1. Юркевич И. Д., Голод Д. С., Ярошевич Э. П. Фенологические исследования древесных и травянистых растений. Минск : Наука и техника, 1980. 88 с.
2. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М. : Альянс, 2011. 352 с.
3. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М. : Колос, 1988. 255 с.
4. Работнов Т. А. Итоги изучения семенного размножения растений на лугах СССР // Ботанический журнал. 1969. Т. 54, № 6. С. 817–833.
5. Вайнагий В. И. Методика определения семенной продуктивности представителей семейства лютиковых // Бюллетень Главного ботанического сада. 1990. Вып. 155. С. 86–90.
6. Левина Р. Е. Репродуктивная биология семенных растений. М. : Наука, 1981. 96 с.
7. Зайцев Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М. : Наука, 1984. 424 с.
8. Царегородова Е. Ж. Агротехнические приемы формирования урожая лекарственного сырья календулы в низкогорной зоне Горного Алтая : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Новосибирск, 2018. 19 с.
9. Вельмисева Е. Н. Разработка технологических приемов повышения урожайности календулы (*Calendula officinalis* L.) в условиях лесостепи Среднего Поволжья : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Пенза, 2014. 20 с.
10. Кузьменко И. Н. Влияние нормы высева и ширины междурядий на полевую всхожесть семян календулы лекарственной в условиях среднего Предуралья // Агротехнологии XXI века : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию высшего аграрного образования на Урале. Пермь, 2019. Ч. 1. С. 49–52.
11. Карпинская Е. В. Биологические особенности и элементы технологии выращивания календулы лекарственной и базилика благородного в Белоруссии : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2008. 25 с.
12. Мейер-Меликян Н. Р., Бовина И. Ю., Косенко Я. В. [и др.]. Атлас пыльцевых зерен астровых (Asteraceae) // Палиноморфология и развитие спородермы представителей семейства Asteraceae. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2004. 236 с.
13. Кузьменко И. Н., Колясникова Н. Л. Фертильность и особенности формирования соцветий календулы лекарственной *Calendula officinalis* L. в условиях Предуралья // Пермский аграрный вестник. 2020. № 1. С. 45–51.

References

1. Yurkevich I.D., Golod D.S., Yaroshevich E.P. *Fenologicheskie issledovaniya drevesnykh i travyanistykh rasteniy* = *Phenological studies of woody and herbaceous plants*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1980:88. (In Russ.)
2. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta* = *Field experiment technique*. Moscow: Al'yans, 2011:352. (In Russ.)
3. Pausheva Z.P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* = *Practical work on plant cytology*. Moscow: Kolos, 1988:255. (In Russ.)

4. Rabotnov T.A. Results of the study of seed reproduction of plants in the meadows of the USSR. *Botanicheskiy zhurnal = Botanical journal*. 1969;54(6):817–833. (In Russ.)
5. Vaynagiy V.I. Method for determining seed productivity of representatives of the buttercup family. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada = Bulletin of the Main Botanical Garden*. 1990;(155):86–90. (In Russ.)
6. Levina R.E. *Reproduktivnaya biologiya semennykh rasteniy = Reproductive biology of seed plants*. Moscow: Nauka, 1981:96. (In Russ.)
7. Zaytsev G.N. *Matematicheskaya statistika v eksperimental'noy botanike = Mathematical statistics in experimental botany*. Moscow: Nauka, 1984:424. (In Russ.)
8. Tsaregorodova E.Zh. Agrotechnical methods of forming a crop of medicinal raw materials of calendula in the low-mountain zone of Gorny Altai. PhD abstract. Novosibirsk, 2018:19. (In Russ.)
9. Vel'miseva E.N. Development of technological methods for increasing the yield of calendula (*Calendula officinalis* L.) in the forest-steppe conditions of the Middle Volga region. PhD abstract. Penza, 2014:20.
10. Kuz'menko I.N. Influence of seeding rate and row spacing on the field germination of calendula officinalis seeds in the middle Preduralye. *Agrotekhnologii XXI veka: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 100-letiyu vysshego agrarnogo obrazovaniya na Urale = Agricultural technologies: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the higher agricultural education in the Urals*. Perm, 2019;1:49–52. (In Russ.)
11. Karpinskaya E.V. Biological features and elements of technology for growing calendula officinalis and basil noble in Belarus. PhD abstract. Moscow, 2008:25. (In Russ.)
12. Meyer-Melikiyan N.R., Bovina I.Yu., Kosenko Ya.V. [et al.]. Aster pollen grains atlas (*Asteraceae*). *Palinomorfologiya i razvitie sporodermi predstaviteley semeystva Asteraceae = Palynomorphology and development of the sporoderm of representatives of the Asteraceae*. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2004:236. (In Russ.)
13. Kuz'menko I.N., Kolyasnikova N.L. Fertility and features of the formation of inflorescences of *Calendula officinalis* L. in the Preduralye region. *Permskiy agrarnyy vestnik = Perm Agrarian bulletin*. 2020;(1):45–51. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Николаевна Кузьменко

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова (Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23)

E-mail: inkuzmenko@yandex.ru

Irina N. Kuzmenko

Candidate of biological sciences, associate professor of the sub-department of botany and physiology of plants, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23 Petropavlovskaya street, Perm, Russia)

Надежда Леонидовна Колясникова

доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры ботаники и физиологии растений, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова (Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23)

E-mail: Kolyasnikova@list.ru

Nadezhda L. Koliashnikova

Doctor of biological sciences, professor, professor of the sub-department of botany and physiology of plants, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23 Petropavlovskaya street, Perm, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.02.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 29.06.2021

Принята к публикации / Accepted 15.07.2021

УДК 598.115.33

doi:10.21685/2307-9150-2021-3-6

Описание фолидоза *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva в бассейне Среднего Дона

Е. Н. Фролова¹, С. П. Гапонов²

^{1,2}Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

¹Katerina199128@mail.ru, ²Gaponov2003@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Характер расположения щитков на теле рептилий (фолидоз) используется для изучения влияния факторов окружающей среды на онтогенез и как один из признаков в систематике рептилий. Мы описали особенности фолидоза особей гадюки Никольского в бассейне Среднего Дона, сравнили признаки самцов и самок. *Материалы и методы.* В бассейне Среднего Дона сбор материала проводился на территории Бобровского, Новоусманского, Аннинского и Борисоглебского районов Воронежской области. Определяли средние значения признаков фолидоза для самцов и самок, анализировали эти признаки у самцов и самок на территории Воронежской области, а также сопоставляли их с аналогичными признаками у гадюк из других регионов. Описано щиткование пилеуса рептилий: вариации каждого типа щитков, а также комбинации щитков. *Результаты.* Описаны половые различия для *Vipera berus nikolskii* на территории Воронежской области: у самок большее количество брюшных, нижнегубных и задненосовых щитков, у самцов – пар подхвостовых чешуй. Достоверные межпопуляционные отличия по количеству брюшных щитков выявлены между гадюками из Воронежской области и окрестностей г. Самара, Нижегородской, Волгоградской, Ивановской областей, Республики Марий Эл. Во всех случаях количество брюшных щитков гадюк с территории Воронежской области достоверно больше. Авторами выделено 77 вариаций щиткования пилеуса, эти вариации объединены в пять групп. *Выводы.* Описанный в ходе работы половой диморфизм связан, вероятно, со сходными половыми различиями метрических признаков: самки по сравнению с самцами имеют большую длину туловища и головы, а самцы – большую длину хвоста. Одним из наиболее стабильных признаков фолидоза является количество брюшных щитков, и этот признак удобен для выделения межпопуляционных различий. Щиткование пилеуса характеризуется высокой вариабельностью. Наиболее изменчивым признаком является количество лобных щитков. Среди групп пилеусов наиболее распространенной является группа 1 (типичное расположение щитков).

Ключевые слова: *Vipera berus nikolskii*, гадюка Никольского, щиткование, пилеус, щитки, половой диморфизм

Для цитирования: Фролова Е. Н., Гапонов С. П. Описание фолидоза *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva в бассейне Среднего Дона // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 56–67. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-6

© Фролова Е. Н., Гапонов С. П., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Description of *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva pholidosis in the Middle Don's basin

E.N. Frolova¹, S.P. Gaponov²

^{1,2}Voronezh State University, Voronezh, Russia

¹Katerina199128@mail.ru, ²Gaponov2003@mail.ru

Abstract. *Background.* Pholidosis – the location of the scutes on the body of reptiles – is used for taxonomic, as well as for determination of an influence of environmental factors on ontogenesis. We described the features of pholidosis of Nikolsky's viper in the Middle Don basin and compared the features of males and females. *Materials and methods.* In the Middle Don basin, material was collected in the Bobrovsky, Novousmanskyy, Anninsky, and Borisoglebsky districts of Voronezh Region. The average values of the of pholidosis features for males and females were counted, a comparison of these features between males and females in the Voronezh region, as well as a comparison with vipers from other regions were done. A scalation of the pileus of reptiles, e.g. variations of each type of scutellum, and combination of scutes were described. *Results.* Sex differences were described for *Vipera berus nikolskii* on the territory of Voronezh region: females have a larger number of abdominal, nasolabial and posterior nasal scutes, while males have pairs of sub-caudal scales. Significant interpopulation differences in the number of abdominal scutes were revealed between vipers from Voronezh Region and the environs of Samara, Nizhny Novgorod, Volgograd, Ivanovo Regions, and the Republic of Mari El. In all cases, the number of abdominal plates of vipers from the territory of Voronezh Region is significantly higher. The authors identified 77 variations in the scutellum of the pileus, these variations were combined into five groups. *Conclusions.* A sexual dimorphism found out in the research was probably associated with similar sex differences in the metric characters: females have a longer body and head length compared to males, and males have a longer tail. One of the most stable features of the pholidosis is the number of abdominal scutes, and this trait is convenient for identifying interpopulation differences. The scaling of the pileus is highly variable. The most variable feature is the number of frontal scutes. Among the pileus groups, the most common is the group 1 (typical location of the scutes).

Keywords: *Vipera berus nikolskii*, Nikolski's viper, scalation, pileus, scutellum, sexual dimorphism

For citation: Frolova E.N., Gaponov S.P. Description of *Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva pholidosis in the Middle Don's basin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):56–67. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-6

Введение

Вопросу фolidоза – расположению чешуй и щитков на теле рептилий – посвящено значительное количество публикаций. Форма, количество и расположение роговых образований на коже пресмыкающихся являются признаками, часто используемыми в систематике. У широко распространенных видов эти образования могут демонстрировать клинальную изменчивость, обуславливающую выделение внутривидовых группировок того или иного таксономического ранга [1]. Кроме того, описание и анализ изменчивости элементов фolidоза могут применяться для изучения влияния факторов окружающей среды на онтогенез.

Цель данной работы – описание фolidоза гадюки Никольского (*Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva, 1986) на территории бассейна

Среднего Дона. Таксономический статус гадюки Никольского до сих пор точно не определен и является объектом дискуссий. Авторы статьи придерживаются точки зрения о том, что гадюка Никольского (*V. b. nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva, 1986) является подвидом обыкновенной гадюки (*V. berus* (Linnaeus, 1758)), относится к подроду *Pelias* Merrem, 1820 из рода *Vipera* Laurenti, 1768 подсемейства гадюковых *Viperinae* Laurenti, 1768 семейства гадюковых *Viperidae* Laurenti, 1768 [2–3]. Эту точку зрения подтверждают результаты анализа последовательности цитохрома *b* митохондриального генома, состава яда гадюк, а также наличие обширной зоны интерградации между *berus* и *nikolskii*, занимающей восточную и центральную часть территории Украины [4–5, 3]. Известно, что гаплотипы, специфичные только для *V. b. nikolskii*, найдены в Воронежской области [6]. Описание и анализ морфологических характеристик, сравнение с экстерьером других представителей рода *Vipera* могут помочь в уточнении таксономического статуса гадюк, обитающих на территории бассейна Среднего Дона.

Материалы и методы

Сбор материала проводился в период с 2011–2019 гг. на территории Воронежской области в Новоусманском, Анненском и Бобровском районах. Также в работе использованы материалы, любезно предоставленные сотрудником заповедника «Галичья гора» М. В. Ушаковым, собранные им в 2008–2010 гг. на территории Борисоглебского района Воронежской области. Всего было отловлено 202 особи гадюки Никольского (129 самцов – 63,9 % и 73 самки – 36,1 %). В Борисоглебском районе в окрестностях сел Богана и Мировой Октябрь было отловлено 48 особей (36 самцов – 75,0 % и 12 самок – 25,0 %). В Новоусманском районе, на территории Усманского Бора, в окрестностях БУНЦ «Веневитиново» с 2008 по 2019 г. поймано 44 гадюки (20 самцов – 45,5 % и 24 самки – 54,5 %). В Аннинском районе в окрестностях поселка Первомайское лесничество с 2012 по 2019 г. поймано 69 гадюк (47 самцов – 68,1 % и 22 самки – 31,9 %). В Бобровском районе на территории Хреновского Бора с 2016 по 2017 г. была поймана 41 особь (26 самцов – 63,4 % и 15 самок – 36,6 %).

У отловленных гадюк определяли пол и ряд меристических признаков: количество брюшных щитков (*Ventr.*), количество пар подхвостовых щитков (*S. cd.*), количество рядов чешуй вокруг середины туловища (*Sq.*), количество щитков вокруг глаза, не считая надглазничного (*C. oc.*), количество подглазничных щитков (*S. oc.*), количество задненосовых щитков (*Lor.*), количество верхнегубных щитков (*Lab.*), количество нижнегубных щитков (*Sub. lab.*). Описание пилеуса проводилось по фотографиям М. В. Ушакова, выполненным на фотоаппарате Canon EOS 350D, объектив 50 мм. На основе фотографий авторами были сделаны рисунки отдельных групп щитков.

При описании особенностей фолидоза пилеуса гадюк рассматривались следующие щитки: предлобные (*Praefrontalia*), кантальные (*Canthalia*), апикальные (*Apicalia*), лобные (*Frontalia*), надглазничные (*Supraocularia*), лобно-надглазничные (*Parafrontalia*), теменные (*Parietalia*). Отдельно рассматривались комбинации каждого типа щитков, определялась встречаемость этих комбинаций. Основываясь на сочетаниях щитков пилеуса, были выделены несколько групп гадюк.

Для всех признаков фолидоза определялось их среднее значение. Все симметричные показатели (количество щитков вокруг глаза, задненосовых, верхнегубных, нижнегубных, краевых, надглазничных) подсчитывались для левой и правой сторон отдельно, объем выборки в таком случае составлял $2n$. Полученные данные проверялись на нормальность распределения. В результате для ряда признаков: количество подглазничных, задненосовых щитков и щитков вокруг глаза, не считая надглазничного, распределение отличается от нормального. Для сравнения средних значений данных признаков у самцов и самок был применен непараметрический критерий Манна – Уитни (U). На основе полученной величины U рассчитывалось значение критерия T . Так как выборка достаточно велика, то значение T сравнивалось с табличным значением критерия Стьюдента для $df = \infty$ и $\alpha = 0,1$ [7]. Все остальные описываемые признаки характеризуются нормальным распределением. Сравнение этих признаков у самцов и самок проводилось с помощью критерия Стьюдента (T) и критерия Фишера (F).

Сравнение фолидоза гадюк, отловленных на территории Воронежской области, с гадюками из других регионов проводилось на основе литературных данных [3, 8]. Для сравнения использовались два признака: количество брюшных щитков (*Ventr.*) и количество пар подхвостовых чешуй (*S. cd.*), как наиболее широко используемые, применяемые всеми авторами. Сравнение проводилось с помощью критерия Стьюдента (T).

Результаты и обсуждение

Всего за период проводимых работ было отловлено 202 особи гадюки Никольского. Получены объединенные данные по изменчивости щиткования особей *V. b. nikolskii* на территории Воронежской области (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения признаков фолидоза гадюки Никольского в Воронежской области

Признак	Пол	n	$M \pm m$	Lim	CV	T
<i>Ventr.</i>	♂	129	$150,60 \pm 0,32$	143–159	2,05	3,06
	♀	73	$153,18 \pm 0,74$	143–163	2,77	
<i>S. cd.</i>	♂	129	$39,55 \pm 0,30$	31–47	7,56	7,22
	♀	73	$33,39 \pm 0,65$	24–41	11,35	
<i>Lab.</i>	♂	258	$8,85 \pm 0,04$	8–11	6,84	0,39
	♀	146	$8,98 \pm 0,08$	7–11	7,17	
<i>Sub. lab.</i>	♂	258	$9,42 \pm 0,07$	8–13	9,67	3,82
	♀	146	$9,95 \pm 0,12$	8–12	9,88	
<i>C. oc.</i>	♂	258	$9,41 \pm 0,09$	8–12	11,94	1,53
	♀	146	$9,23 \pm 0,09$	8–11	8,57	
<i>S. oc.</i>	♂	258	$2,23 \pm 0,08$	1–5	48,56	4,78
	♀	146	$3,06 \pm 0,14$	1–6	39,73	
<i>Lor.</i>	♂	258	$2,49 \pm 0,05$	1–4	23,79	2,55
	♀	146	$2,75 \pm 0,06$	1–3	18,33	

По ряду признаков фоллидоза наблюдаются достоверные отличия: у самок по сравнению с самцами большее количество брюшных ($T = 3,06$, $F = 1,82$, $\alpha = 0,01$, $df = 200$), нижнегубных ($T = 3,82$, $F = 1,09$, $\alpha = 0,01$, $p = 0,099$, $df = 402$) и подглазничных щитков ($U = 8102$, $T = 4,78$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$, $df = 402$); у самцов – больше пар подхвостовых чешуй ($T = 7,22$, $F = 1,57$, $\alpha = 0,01$, $p = 0,099$, $df = 200$). Половой диморфизм по количеству брюшных щитков и подхвостовых чешуй упоминается в литературе [3].

В табл. 2 представлены обобщенные литературные данные, с которыми проводилось сравнение особей *V. b. nikolskii*, отловленных на территории Воронежской области [3, 8].

Сравнение среднего значения количества брюшных щитков у гадюк из разных регионов выявило ряд достоверных различий: особи *V. b. nikolskii*, отловленные на территории Воронежской области, имеют большее количество брюшных щитков, чем гадюки из Ивановской (самцы: $T = 5,61$, $df = 142$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: $T = 2,88$, $df = 90$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$) и Нижегородской (самцы: $T = 3,61$, $df = 155$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: $T = 3,67$, $df = 105$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$) областей, Республики Марий Эл (самцы: $T = 8,48$, $df = 147$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: $T = 5,59$, $df = 89$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$), окрестностей г. Самары (самцы: $T = 9,6$, $df = 186$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: $T = 4,18$, $df = 90$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$), Волгоградской области (самцы: $T = 4,9$, $df = 157$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: достоверных отличий не выявлено) [3, 8].

По количеству пар подхвостовых чешуй также обнаружены достоверные отличия: особи *V. b. nikolskii*, отловленные на территории Воронежской области, имеют большее количество пар подхвостовых чешуй по сравнению с гадюками из Нижегородской области (самки: $T = 2,94$, $df = 161$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самцы: достоверных отличий не выявлено) и Республики Марий Эл (самцы: $T = 3,6$, $df = 146$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$; самки: $T = 3,11$, $df = 89$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$); меньшее количество для самцов – по сравнению с особями из Пензенской области ($T = 2,77$, $df = 134$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,01$) и окрестностей г. Казани (самцы: $T = 6,51$, $df = 186$, $p = 0,099$, $\alpha = 0,0$) [3].

У самцов и самок наиболее часто отмечается 21 ряд чешуй вокруг середины туловища (самцы: 83,16 %, самки: 63,64 %). Среди *V. b. berus* и *V. b. nikolskii* из других регионов также преобладают особи с 21 рядом чешуй.

Описание и анализ особенностей фоллидоза пилеуса *V. b. nikolskii* выявило наличие различных вариаций в щитковании гадюк. Всего для самцов и самок было выделено 77 комбинаций щитков. Комбинация 9 встретилась у 5,15 % особей, комбинации 13, 14 и 25 – у 4,12 % особей, комбинация 24 – у 3,09 % особей, комбинации 3, 6, 15, 27 и 49 – у 2,06 % особей. Остальные 68 комбинаций составили по 1,03 % от объема выборки. Все комбинации щиткования пилеуса были разделены на пять групп. На рис. 1 представлены типичные пилеусы, характерные для каждой из групп.

К группе 1 отнесены особи с типичным расположением щитков на пилеусе [2], общая доля таких гадюк составила 54,08 %. Среди самцов гадюки с типичным расположением щитков на пилеусе составили 62,16 %, среди самок – 29,17 %. К группе 2 принадлежат гадюки с дополнительным рядом предлобных щитков; их доля составила 24,49 % от общего объема выборки. Среди самцов щиткование такого типа наблюдается у 25,68 % особей, среди самок – у 20,83 % особей.

Таблица 2

Признаки шиткования гадюк *V. betula* из ряда регионов РФ (Гордеев, 2013; Бакиев и др., 2015)

Признак	Территория*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Ventr</i> , ♂	145,3 ± 0,4	149,5 ± 1,2	147,5 ± 0,7	146,0 ± 0,7	152,0 ± 3,5	149,1 ± 0,8	143,9 ± 0,7	148,1 ± 0,4
<i>Ventr</i> , ♀	149,0 ± 0,6	153,0 ± 1,3	149,8 ± 0,5	150,4 ± 0,6	149,4 ± 1,3	154,4 ± 0,5	147,7 ± 0,6	151,9 ± 0,6
<i>S. cd.</i> , ♂	–	42,8 ± 0,4	39,3 ± 0,3	39,6 ± 0,4	40,7 ± 0,9	41,1 ± 0,5	36,7 ± 0,7	37,5 ± 0,4
<i>S. cd.</i> , ♀	–	34,9 ± 0,7	31,3 ± 0,2	32,1 ± 0,5	32,5 ± 0,5	32,9 ± 0,4	30,9 ± 0,5	30,9 ± 0,95

Примечания. * 1 – г. Самара; 2 – Приказанье; 3 – Нижегородская область; 4 – Ивановская область; 5 – Республика Мордовия; 6 – Пензенская область; 7 – Заповедник «Большая Кокшага» Республика Марий Эл; 8 – Волгоградская область.

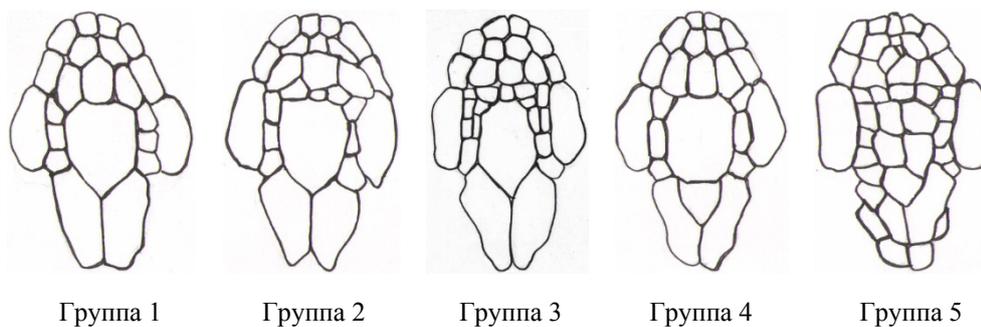


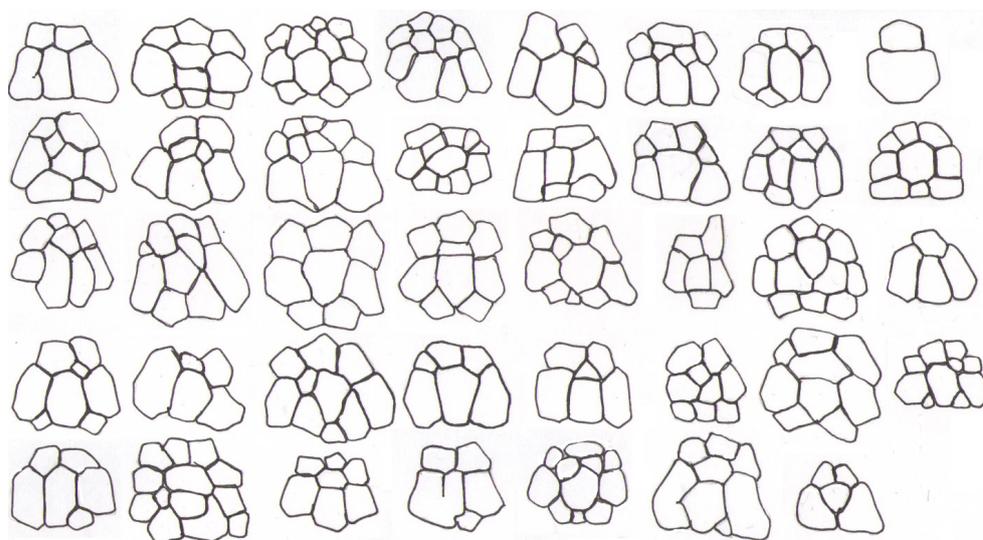
Рис. 1. Типы щиткования пилеуса *V. b. nikolskii* в бассейне Среднего Дона

К группе 3 отнесены гадюки с дополнительным рядом лобнадглазничных щитков. Их доля составила 7,15 % от общего объема выборки, доля среди самцов – 6,76 %, среди самок – 8,33 %. В группу 4 включены гадюки с дополнительным щитком, расположенным между лобным и теменными щитками. Доля таких гадюк составила 1,02 % от общего объема, доля среди самцов – 1,35 %. Самки с таким типом пилеуса обнаружены не были. К группе 5 отнесены гадюки с высоко полимиризированным типом щиткования пилеуса. Доля таких особей составила 4,05 % от общего объема выборки, доля среди самцов – 4,05 %, среди самок – 41,67 %.

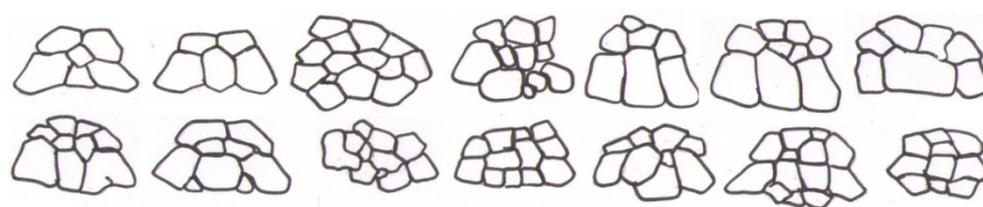
Значительная изменчивость характерна для предлобных щитков. У самцов их количество варьирует от 2 до 13 (2 щитка – у 2,0 % особей, 4 щитка – у 4,0 % особей, 5 щитков – 28,0 %, 6 щитков – 22,0 %, 7 щитков – 18,0 %, 8 щитков – 12,0 %, 9 щитков – 6,0 %, 10 щитков – 2,0 %, 11 щитков – 4,0 %, 12 щитков – 1,0 %, 13 щитков – 1,0 %). У самок наблюдаются от 5 до 14 предлобных щитков (5 щитков – 4,0 %, 6 щитков – 20,0 %, 7 щитков – 4,0 %, 9 щитков – 28,0 %, 10 щитков – 12,0 %, 11 щитков – 12,0 %, 12 щитков – 4,0 %, 13 щитков – 12,0 %, 14 щитков – 4,0 % (рис. 2).

Количество лобных щитков и у самцов, и у самок варьирует от 1 до 6 (самцы: 1 щиток – 82,0 %, 2 щитка – 2,0 %, 3 щитка – 8,0 %, 4 щитка – 6,0 %, 6 щитков – 2,0 %; самки: 1 щиток – 40,0 %, 2 щитка – 10,0 %, 3 щитка – 10,0 %, 4 щитка – 25,0 %, 5 щитков – 10,0 %, 6 щитков – 5,0 %). У самцов число лобнадглазничных щитков варьирует в пределах от 1 до 5, у самок – от 2 до 5 (самцы: 1 щиток – 7,0 %, 2 щитка – 35,0 %, 3 щитка – 50,0 %, 4 щитка – 6,0 %, 5 щитков – 2,0 %; самки: 2 щитка – 20,0 %, 3 щитка – 47,5 %, 4 щитка – 25,0 %, 5 щитков – 7,5 %). И у самцов, и у самок *V. b. nikolskii* количество надглазничных щитков изменяется в пределах от 1 до 2 (самцы: 1 щиток – 98,0 %, 2 щитка – 2,0 %; самки: 1 щиток – 97,5 %, 2 щитка – 2,5 %) (рис. 3).

У самцов общее количество теменных щитков изменяется в пределах от 1 до 4, у самок – от 1 до 5 (самцы: 1 щиток – 2,82 %, 2 щитка – 80,28 %, 3 щитка – 12,68 %, 4 щитка – 4,22 %; самки: 1 щиток – 4,0 %, 2 щитка – 64,0 %, 3 щитка – 16,0 %, 4 щитка – 12,0 %, 5 щитков – 4,0 %) (рис. 4).

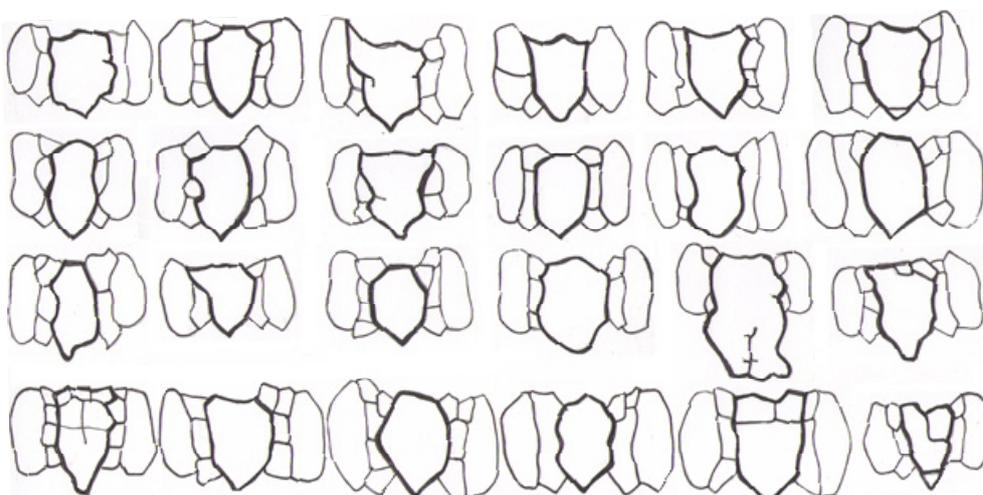


Самцы



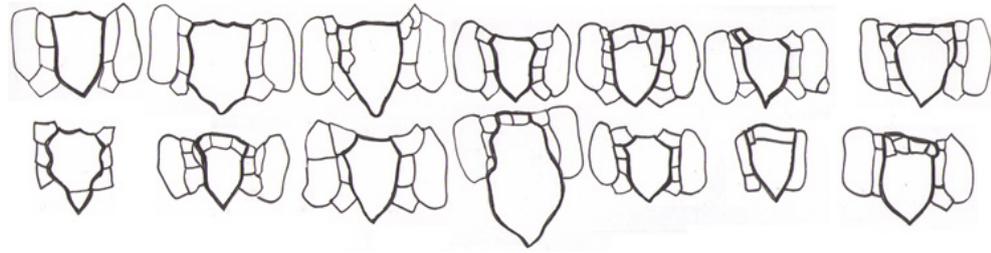
Самки

Рис. 2. Вариации расположения предлобных щитков *V. b. nikolskii*



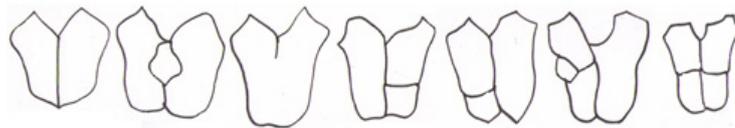
Самцы

Рис. 3. Вариации расположения лобных, лобнадглазничных и надглазничных щитков *V. b. nikolskii* (лобные щитки выделены жирным контуром) (начало)



Самки

Рис. 3. Вариации расположения лобных, лобонадглазничных и надглазничных щитков *V. b. nikolskii* (лобные щитки выделены жирным контуром) (окончание)



Самцы



Самки

Рис. 4. Вариации расположения теменных щитков *V. b. nikolskii*

У самцов количество краевых щитков варьирует от 1 до 2, у самок – от 1 до 3 (самцы: 1 щиток – 2,0 %, 2 щитка – 98,0 %; самки: 1 щиток – 7,5 %, 2 щитка – 92,5 %, 3 щитка – 2,5 %). Количество апикальных щитков у самцов и самок изменяется в пределах от 1 до 3 (самцы: 1 щиток – 8,0 %, 2 щитка – 86,0 %, 3 щитка – 6,0 %; самки: 1 щиток – 8,0 %, 2 щитка – 80,0 %, 3 щитка – 12,0 %) (рис. 5).



Самцы



Самки

Рис. 5. Вариации расположения краевых и апикальных щитков *V. b. nikolskii* (апикальные щитки выделены жирным контуром)

У самцов наибольшей изменчивостью характеризуются лобные щитки (коэффициент вариации (CV) равен 77,8 %), а наименьшей изменчивостью –

краевые ($CV = 7,1 \%$). У самок также наиболее вариабельным признаком является количество лобных щитков ($CV = 62,6 \%$), наименее вариабельным – количество апикальных щитков ($CV = 10,9 \%$) (рис. 6).

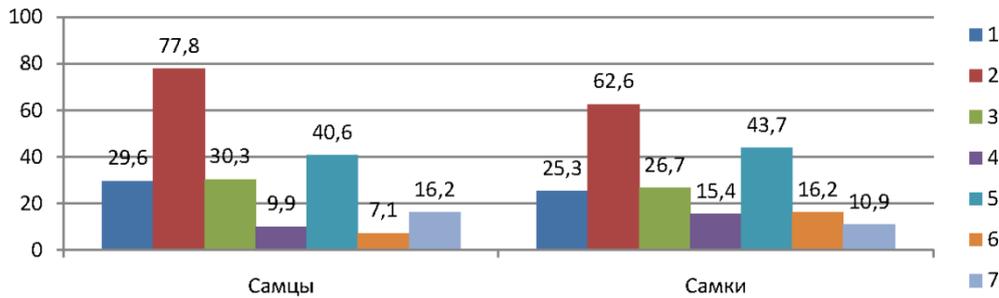


Рис. 6. Коэффициенты вариации (CV), % щитков пилеуса самцов и самок гадюки Никольского в бассейне Среднего Дона:

- 1 – предлобные щитки; 2 – лобные щитки; 3 – лобонадглазничные щитки;
4 – надглазничные щитки; 5 – теменные щитки; 6 – краевые щитки;
7 – апикальные щитки

У гадюки Никольского отмечается полимеризованный тип щиткования, который встречается и у обыкновенной гадюки, но гораздо реже. Полимеризация заключается в повышенном по сравнению с обыкновенной гадюкой количестве щитков вокруг глаз и горловых щитков [5, 9].

При анализе щиткования пилеуса *Vipera berus* (Linnaeus, 1758), обитающих на Окско-Донской равнине, А. С. Соколовым было выделено четыре группы особей, которые, в свою очередь, подразделялись на несколько подгрупп; были определены особи, имеющие пилеус типичной формы, и те, фоллидоз пилеуса которых в разной степени отличался от типичной формы [1]. В Волжско-Камском природном биосферном заповеднике у обыкновенной гадюки отмечено четырнадцать видов девиаций фоллидоза [10].

Заключение

В ходе работы описано щиткование *V. b. nikolskii*. По ряду признаков выявлен половой диморфизм: самки имеют большее количество брюшных, нижнегубных и задненосовых щитков, а самцы – большее количество подхвостовых чешуй. Вероятно, такие различия связаны с наличием полового диморфизма по размерам тела: длина туловища и длина головы у самок больше, чем у самцов, а длина хвоста меньше. Между размерами тела и количеством чешуй выявлена корреляция [2–5].

Сравнение количества брюшных щитков и пар подхвостовых чешуй самцов и самок гадюк из Воронежской области с данными из других регионов позволило обнаружить статистически достоверные отличия: *V. b. nikolskii* из Воронежской области имеют большее количество брюшных щитков по сравнению с гадюками из Ивановской, Нижегородской областей, Республики Марий Эл, г. Самара и Волгоградской области [3, 8]; большее количество пар подхвостовых чешуй по сравнению с гадюками из Нижегородской области, Республики Марий Эл; меньшее количество пар подхвостовых чешуй по сравнению с гадюками из Пензенской области и из окрестностей г. Казани.

Для пилеуса *V. b. nikolskii* характерна высокая степень изменчивости. Всего было выделено 77 комбинаций щиткования пилеуса, чаще других встречены следующие: комбинация 9 (5,15 % особей), комбинации 13, 14 и 25 (по 4,12 % особей каждая), комбинация 24 (3,09 % особей), комбинации 3, 6, 15, 27 и 49 (по 2,06 % особей каждая). Наибольшей изменчивостью у самцов и самок характеризуются лобные щитки.

При описании пилеуса выделено пять групп гадюк. Наиболее распространенной является группа 1 – особи с типичным расположением щитков, их доля составила 54,08 % от общего объема выборки.

Список литературы

1. Соколов А. С. Об изменчивости пилеуса обыкновенной гадюки (*Vipera berus*) Окско-Донской равнины // Вопросы герпетологии. Материалы Первого съезда Герпетологического общества имени А. М. Никольского. М. : МГУ, 2001. С. 270–272.
2. Milto K. D., Znenko O. I. Distribution and morphological variability of *Vipera berus* in Eastern Europe // *Herpetologia Petropolitana: Proceedings of the Societas Europaea Herpetologica*. St. Petersburg, 2005. P. 64–73.
3. Бакиев А. Г. [и др.]. Гадюки (Reptilia: Serpentes: Viperidae: *Vipera*) Волжского бассейна. Тольятти : Кассандра, 2015. Ч. 1. 234 с.
4. Зиненко А. И. Гибриды первого поколения между гадюкой Никольского *Vipera nikolskii* и обыкновенной гадюкой *Vipera berus* (Reptilia, Serpentes, Viperidae) // Вестник зоологии. 2003а. № 37. С. 101–104.
5. Sokolov A. S. On the taxonomic status of the Common Adder of the partially wooded steppe of the Oka-Don plain // *Herpetologia Petropolitana: Proceedings of the Societas Europaea Herpetologica*. St. Petersburg, 2005. Vol. 12. P. 96–99.
6. Бакиев А. Г., Ратников В. Ю., Зиненко А. И. О формировании фауны гадюк Волжского бассейна // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2007. Т. 9, № 1. С. 163–170.
7. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию : учеб. пособие. 2-е изд. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2011. 302 с.
8. Гордеев Д. А. Эколого-морфологическая характеристика гадюки Никольского (*Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva, 1986) на юге ареала (Волгоградская область) // Современная герпетология: проблемы и пути их решения : сб. ст. по материалам докл. Первой Междунар. молодеж. конф. герпетологов России и сопредельных стран. СПб., 2013. С. 72–77.
9. Ананьева Н. Б. [и др.]. Земноводные и пресмыкающиеся (Энциклопедия природы России). М. : АБФ, 1998. 576 с.
10. Ирдисова Л. А., Фурман А. А. Девиации в фолидозе змей на территории Волжско-Камского заповедника // Труды Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Вып. 7. Казань, 2016. С. 250–255.

References

1. Sokolov A.S. On the variability of the dust content of the common viper (*Vipera berus*) of the Oka-Don Plain. *Voprosy gerpetologii. Materialy Pervogo s"ezda Gerpetologicheskogo obshchestva imeni A.M. Nikol'skogo = Herpetology issues. Proceedings of the 1st Congress of Herpetology Society named after A.M. Nikolsky*. Moscow: MGU, 2001: 270–272. (In Russ.)
2. Milto K.D., Znenko O.I. Distribution and morphological variability of *Vipera berus* in Eastern Europe. *Herpetologia Petropolitana: Proceedings of the Societas Europaea Herpetologica*. St. Petersburg, 2005:64–73.

3. Bakiev A.G. [et al.]. *Gadyuki (Reptilia: Serpentes: Viperidae: Vipera) Volzhskogo basseyna = Vipers (Reptilia: Serpentes: Viperidae: Vipera) of the Volga basin*. Tolyatti: Kassandra, 2015;1:234. (In Russ.)
4. Zinenko A.I. First generation hybrids between Nikolsky Vipera nikolskii and common viper Vipera berus (Reptilia, Serpentes, Viperidae). *Vestnik zoologii = Bulletin of zoology*. 2003a;(37):101–104. (In Russ.)
5. Sokolov A.S. On the taxonomic status of the Common Adder of the partially wooded steppe of the Oka-Don plain. *Herpetologia Petropolitana: Proceedings of the Societas Europaea Herpetologica*. St. Petersburg, 2005;12:96–99.
6. Bakiev A.G., Ratnikov V.Yu., Zinenko A.I. On the formation of the viper fauna of the Volga basin. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2007;9(1): 163–170. (In Russ.)
7. Ivanter E.V., Korosov A.V. *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu: ucheb. posobie = Introduction to Quantitative Biology: teaching aid*. 2nd ed. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2011:302. (In Russ.)
8. Gordeev D.A. Ecological and morphological characteristics of Nikolsky viper (*Vipera berus nikolskii* Vedmederja, Grubant et Rudaeva, 1986) on the South (Volgograd region). *Sovremennaya gerpetologiya: problemy i puti ikh resheniya: sb. st. po materialam dokl. Pervoy Mezhdunar. molodezh. konf. gerpetologov Rossii i sopredel'nykh stran = Modern herpetology: problems and solutions: proceedings of the 1st International Youth Conference of herpetologists from Russia and neighboring countries*. Saint-Petersburg, 2013:72–77. (In Russ.)
9. Anan'eva N. B. [et al.]. *Zemnovodnye i presmykayushchiesya (Entsiklopediya prirody Rossii) = Amphibians and reptiles (Russian Nature Encyclopedia)*. Moscow: ABF, 1998:576. (In Russ.)
10. Irdisova L.A., Furman A.A. Deviation in pholidosis of snakes on the territory of the Volzhsko-Kamsky nature reserve. *Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnoy biosfernogo zapovednika. Vyp. 7 = Proceedings of the Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve. Edition 7*. Kazan, 2016:250–255. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Николаевна Фролова

лаборант, кафедра зоологии
и паразитологии, Воронежский
государственный университет (Россия,
г. Воронеж, Университетская площадь, 1)

E-mail: Katerina199128@mail.ru

Ekaterina N. Frolova

Laboratory assistant, sub-department
of zoology and parasitology, Voronezh
State University (1 Universitetskaya square,
Voronezh, Russia)

Сергей Петрович Гапонов

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры зоологии
и паразитологии, Воронежский
государственный университет (Россия,
г. Воронеж, Университетская площадь, 1)

E-mail: Gaponov2003@mail.ru

Sergey P. Gaponov

Doctor of biological sciences, professor,
professor of the sub-department of zoology
and parasitology, Voronezh State University
(1 Universitetskaya square, Voronezh,
Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.03.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 01.06.2021

Принята к публикации / Accepted 24.06.2021

УДК 575.174.015.3

doi:10.21685/2307-9150-2021-3-7

Фенотипическая структура популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности

А. С. Бархатов¹, Э. А. Снегин²

^{1,2}Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

¹barkhatov@bsu.edu.ru, ²snegin@bsu.edu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Морфологические признаки являются одними из важнейших маркеров для биоиндикации. Среди них особое место занимает полиморфизм фенотипических признаков. У бесхвостых земноводных широко распространена изменчивость окраски спины: наличие или отсутствие светлой дорсомедиальной полосы или темных пятен. При этом известно, что на импактных территориях происходит изменение фенотипического состава. Цель нашего исследования заключалась в анализе фенотипической структуры популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности. *Материалы и методы.* Изучено 748 особей из 35 пунктов на территории юга Среднерусской возвышенности, точки сбора отличались степенью антропогенной нагрузки. Вариации окраски спины анализировали по общепринятой градации. Анализ разнообразия морф проводили по показателям, предложенным Л. А. Животовским. *Результаты.* Зарегистрированы четыре основные морфы Maculata (M), Striata (S), Punctata (P), Burnsii (B), а также их сочетания SM, SP и SMP. Наибольшее фенотипическое разнообразие было отмечено в естественных или мало нарушенных биотопах «Сазон» ($6,815 \pm 0,251$), «Айдар» ($6,527 \pm 0,306$), «Голубой Дунай» ($6,43 \pm 0,418$), а в условиях антропогенного прессинга наблюдается увеличение доли редких морф. Анализ главных компонент продемонстрировал фенотипическую схожесть большинства популяций, при этом были выявлены уникальные группы, которые обитают как на импактных территориях, так и в естественных биотопах. Данный факт может свидетельствовать об эффективных компенсаторных реакциях популяций зеленых лягушек на территории исследования в ответ на антропогенный прессинг. *Выводы.* Полученные результаты подтверждают данные предыдущих исследований фенотипического полиморфизма зеленых лягушек, согласно которым в условиях антропогенной нагрузки наблюдается снижение фенотипического разнообразия и возрастание доли редких морф. Кроме того, в ряде популяций, как на урбанизированных, так и в относительно чистых биотопах отмечаются уникальные сочетания частот фенотипов, что свидетельствует об активной адаптации лягушек к меняющимся условиям среды.

Ключевые слова: юг Среднерусской возвышенности, *Pelophylax esculentus* complex, популяционная структура

© Бархатов А. С., Снегин Э. А., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Бархатов А. С., Снегин Э. А. Фенотипическая структура популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 68–84. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-7

Phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex population in urbanized landscapes in the South Central Russian Upland

A.S. Barkhatov¹, E.A. Snegin²

^{1,2}Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

¹barkhatov@bsu.edu.ru, ²snegin@bsu.edu.ru

Abstract. *Background.* Morphological features are one of the most important markers for bioindication. Among them, the polymorphism of phenotypic traits occupies a special place. In tailless amphibians, dorsal colouration variability is widespread: the presence or absence of a light dorsomedial stripe or dark spots. The phenotypic composition is known to change in the impacted areas. The purpose of the study was to analyze the phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex populations in the urbanized landscapes in the South Central Russian Upland. This study is a part of the comprehensive analysis of the population structure of green frogs in the South Central Russian Upland. *Materials and methods.* A total of 748 individuals were sampled from 35 localities in the South Central Russian Upland. Collection points differed in the degree of anthropogenic pressure. Dorsal coloration variations were analyzed according to the generally accepted grading. Analysis of phenotypes diversity was performed according to the indicators proposed by L.A. Zhivotovsky. *Results.* Four main phenotypes “Maculata” (M), “Striata” (S), “Punctata” (P), “Burnsi” (B), and their combinations SM, SP and SMP were registered in the study area. The highest phenotypic diversity was observed in natural or sparsely disturbed biotopes “Sazon” (6.815 ± 0.251), “Aidar” (6.527 ± 0.306), “Goluboi Dunai” (6.43 ± 0.418), while under anthropogenic pressure an increase in the proportion of rare phenotypes was observed. The principal component analysis has demonstrated the phenotypic similarity of most of the populations. At the same time, unique groups were found in both impact and natural habitats, which may indicate an effective compensatory response of the green frog populations in the study area to anthropogenic pressures. *Conclusions.* The results obtained confirm the data of the previous studies on the phenotypic polymorphism of green frogs, according to which the phenotypic diversity declines and the proportion of rare phenotypes increases under conditions of anthropogenic pressure. In addition, in a number of populations, both in urbanized and relatively clean biotopes, unique combinations of phenotypic frequencies are observed, indicating active adaptation of green frogs to changing environmental conditions.

Keywords: the South Central Russian Upland, *Pelophylax esculentus* complex, population structure

For citation: Barkhatov A.S., Snegin E.A. Phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex population in urbanized landscapes in the South Central Russian Upland. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennyye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):68–84. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-7

Введение

Бесхвостые земноводные (Anura) – являются самыми многочисленными и разнообразными представителями современных амфибий. Являясь консументами второго и последующих порядков, они представляют собой

связующее звено в пищевых цепях, которые охватывают водные и наземные сообщества, и таким образом выступают в качестве важного компонента биоты водно-болотных угодий [1–2]. Благодаря этому амфибий часто используют в качестве биоиндикаторов состояния экосистем [3–5]. Использование биоиндикации дает возможность выявить степень и интенсивность воздействия неблагоприятных факторов и проследить временную и пространственную динамику деградации естественных сообществ [4, 6].

Известно, что при антропогенной нагрузке происходят изменения в структуре популяций, при этом наблюдается изменение ее генетического и фенотипического состава, а также морфофизиологических показателей составляющих ее особей [7–8]. В связи с этим изучение полиморфизма фенотипических признаков представляет собой один из методов контроля над динамикой популяционной структуры микрогрупп, обитающих на урбанизированной территории. Например, в условиях антропопрессии наблюдается изменение фенотипического состава [6, 8–11].

Целью нашей работы является анализ фенотипической структуры популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях различных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности.

Комплекс средневропейских зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) включает в себя три вида: озерную лягушку (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771), прудовую лягушку (*P. lessonae* Camesano, 1882) и съедобную лягушку (*P. esculentus* Linnaeus, 1758). Причем первые два вида (родительские) представляют собой «менделевские» виды, а съедобная лягушка *P. esculentus* представляет собой гибридную форму, которая образуется при скрещивании родительских особей и имеет уникальный полуклональный тип размножения [12–13].

Вместе с тем известно, что озерная лягушка по современным представлениям рассматривается как комплекс криптических видов, при этом на востоке ареала выделяют две формы, «западная», она же центрально-европейская *P. ridibundus* и «восточная» *P. cf. bedriagae* (анатолийская лягушка) [14]. Несмотря на то, что родительские и гибридные особи занимают различные биотопы, они часто обитают вместе и образуют общие группы размножения, при которых нередко наблюдается интрогрессия [15–18]. Данный факт позволяет нам анализировать фенотипическую структуру всего комплекса.

Материалы и методы

Сбор материала был проведен в летний полевой сезон 2018–2020 гг. Всего было проанализировано 748 особей из 35 пунктов (табл. 1, рис. 1). Пункты сбора отличались степенью антропогенной нагрузки по классификации, предложенной Р. И. Замалетдиновым [19]. Всего в ходе исследования было проанализировано: 3 локалитета с промышленной застройкой (94 особи); 1 локалитет многоэтажной застройки (20 особей); 20 – малоэтажной застройки (435 особей); 11 пунктов зеленой зоны (199 особей).

Вариации окраски спины анализировали по общепринятой градации [20–21]: 1) *Striata* (S), «полосатость» – наличие светлой дорсомедиальной полосы; 2) *Maculata* (M), «пятнистость» – наличие крупных (от 2–3 мм диаметром) пятен (рис. 2); 3) *Punctata* (P), «крапчатость» – на верхней части туловища

присутствуют мелкие точки; 4) Burnsī (B), «чистая» – полное отсутствие пятнистости и крапчатости на верхней части туловища. В популяциях также были выявлены особи, имеющие сочетания указанных признаков (морфы SM, SP, SMP).

Таблица 1

Пункты сбора

Локалитеты	Описание	Координаты	Количество особей
1	2	3	4
1. Северский Донец	р. Северский Донец, г. Белгород. Промышленная застройка	50°35'28.6"N 36°34'59.2"E	19
2. Везёлка	р. Везёлка, г. Белгород. Многоэтажная застройка	50°35'28.6"N 36°34'59.2"E	20
3. Оскочное	Пруд, г. Белгород. Малоэтажная застройка	50°38'53.8"N 36°33'25.5"E	20
4. Ячевский	Пруд, г. Белгород. Малоэтажная застройка	50°38'23.1"N 36°34'44.8"E	16
5. Дубовое	Белгородский район. Зеленая зона	50°31'56.5"N 36°34'59.8"E	18
6. Устье	Устье р. Разумная, г. Белгород. Малоэтажная застройка	50°31'49.1"N 36°38'57.2"E	26
7. Майский	Озеро, пос. Майский. Малоэтажная застройка	50°30'54.0"N 36°27'43.2"E	16
8. Северный	Озеро, близ пос. Северный. Зеленая зона	50°43'58.8"N 36°29'13.2"E	22
9. Шопино	р. Липовый Донец. Малоэтажная застройка	50°42'19.7"N 36°36'40.0"E	23
10. Нежеголь	р. Нежеголь, окраина г. Шебекино. Малоэтажная застройка	50°23'24.8"N 36°50'23.6"E	22
11. Графовка	Водно-болотный комплекс близ Белгородского водохранилища. Зеленая зона	50°25'07.4"N 36°46'24.8"E	17
12. Глотова	Озеро, близ с. Глотова. Малоэтажная застройка	50°27'52.9"N 35°37'51.9"E	25
13. Плотва	р. Плотва близ с. Борисовка. Зеленая зона	50°21'23.2"N 37°36'44.6"E	13
14. Сазон	Озеро. «Сазон», пгт. Волоконовка. Малоэтажная застройка	50°29'38.4"N 37°52'33.6"E	20
15. Оскол 1	р. Оскол, Волоконовский район. Зеленая зона	50°24'26.6"N 37°49'03.9"E	22
16. Волчья	р. Волчья, близ с. Волчья Александровка. Зеленая зона	50°26'54.4"N 37°34'15.4"E	18
17. Губкин	р. Осколец, г. Губкин. Промышленная застройка	51°16'15.6"N 37°32'56.4"E	60

Окончание табл. 1

1	2	3	4
18. Орлик	р. Орлик, близ с. Орлик. Зеленая зона	51°04'04.8"N 37°41'06.0"E	25
19. Ольшанка	р. Ольшанка, близ с. Ольшанка. Зеленая зона	51°00'14.4"N 37°39'50.4"E	14
20. Халань	р. Халань близ с. Русская Халань. Малозэтажная застройка	50°56'49.2"N 37°43'33.6"E	34
21. Беленькая	р. Беленькая, близ рыбразводческий пруд. Зеленая зона	50°44'53.2"N 37°57'43.4"E	24
22. Оскол	р. Оскол, г. Новый Оскол. Малозэтажная застройка	50°44'05.4"N 37°50'21.0"E	18
23. Чуфичка	Исток р. Чуфичка, близ хвостохранилища Стойленского горно- обогатительного комбината. Промышленная застройка	51°11'59.5"N 37°50'04.9"E	15
24. Корень	р. Корень близ с. Коломыцево. Зеленая зона	50°50'52.8"N 37°03'00.0"E	19
25. Короча	Корочанское водохранилище, р. Короча. Малозэтажная застройка	50°50'35.5"N 37°13'00.7"E	14
26. Сейм	р. Сейм близ с. Солнцево. Зеленая зона	51°11'16.8"N 37°17'34.8"E	17
27. Т. Сосна	р. Тихая Сосна, пгт. Бирюч. Малозэтажная застройка	50°38'24.1"N 38°24'04.1"E	22
28. Валуй	р. Валуй, г. Валуйки. Малозэтажная застройка	50°12'17.2"N 38°06'03.9"E	24
29. Голубой Дунай	р. Голубой Дунай, с. Свистовка. Малозэтажная застройка	50°04'58.3"N 38°56'34.1"E	21
30. Айдар	р. Айдар, пгт. Ровеньки. Малозэтажная застройка	49°54'12.2"N 38°55'23.4"E	33
31. Ворскла	р. Ворскла, пгт. Борисовка. Малозэтажная застройка	50°36'15.6"N 36°01'36.2"E	19
32. Ракита	р. Ракита, пгт. Ракитное. Малозэтажная застройка	50°49'47.7"N 35°49'56.3"E	21
33. Пена	р. Пена, близ с. Венгеровка. Малозэтажная застройка	50°56'11.9"N 36°02'01.8"E	27
34. Белая	р. Белая. Воронежская область. Зеленая зона	49°50'01.7"N 39°20'03.6"E	12
35. Дон	р. Дон, ст. Казанская, Ростовская область. Малозэтажная застройка	49°47'23.0"N 41°08'11.9"E	12

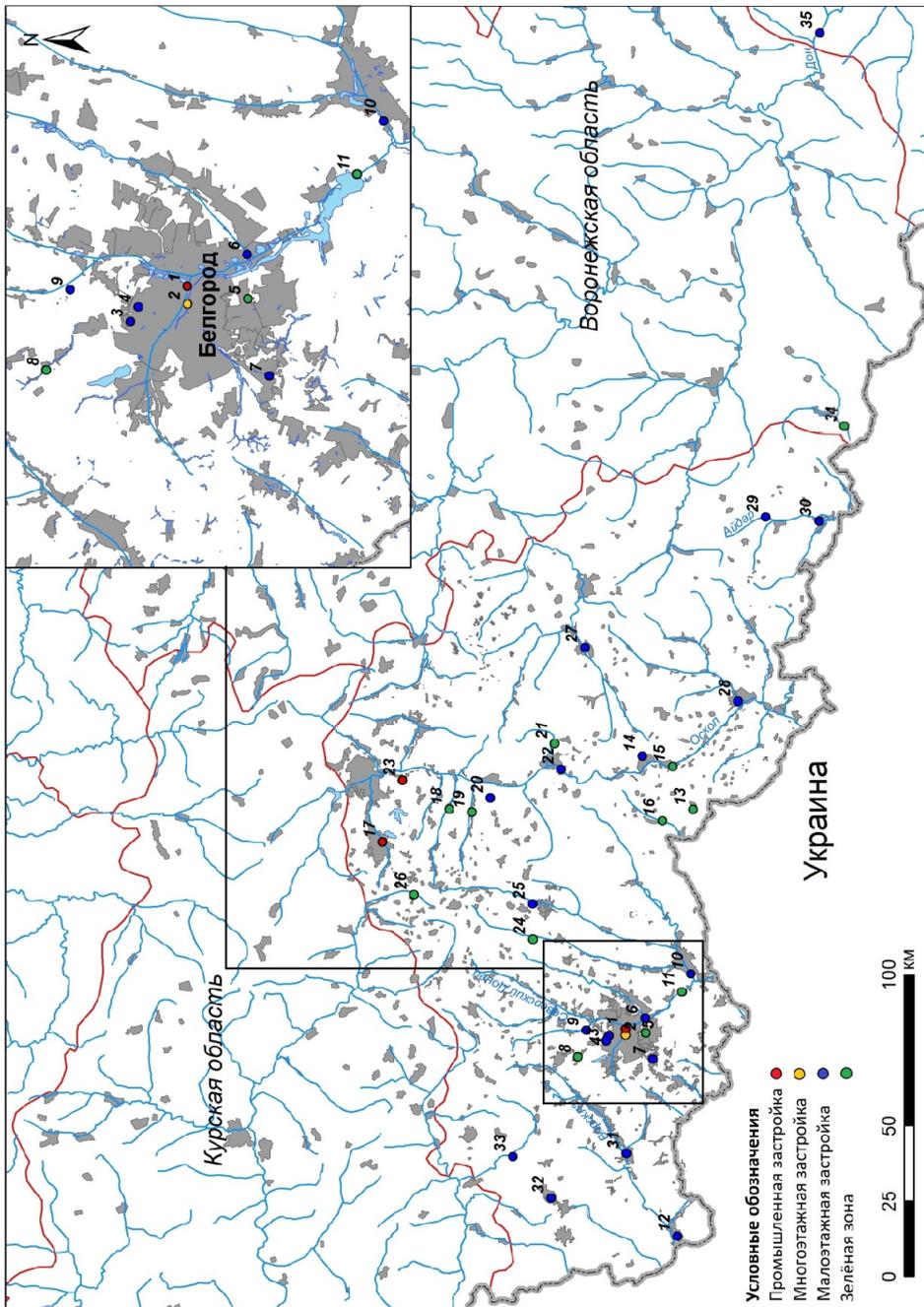


Рис. 1. Пункты сбора

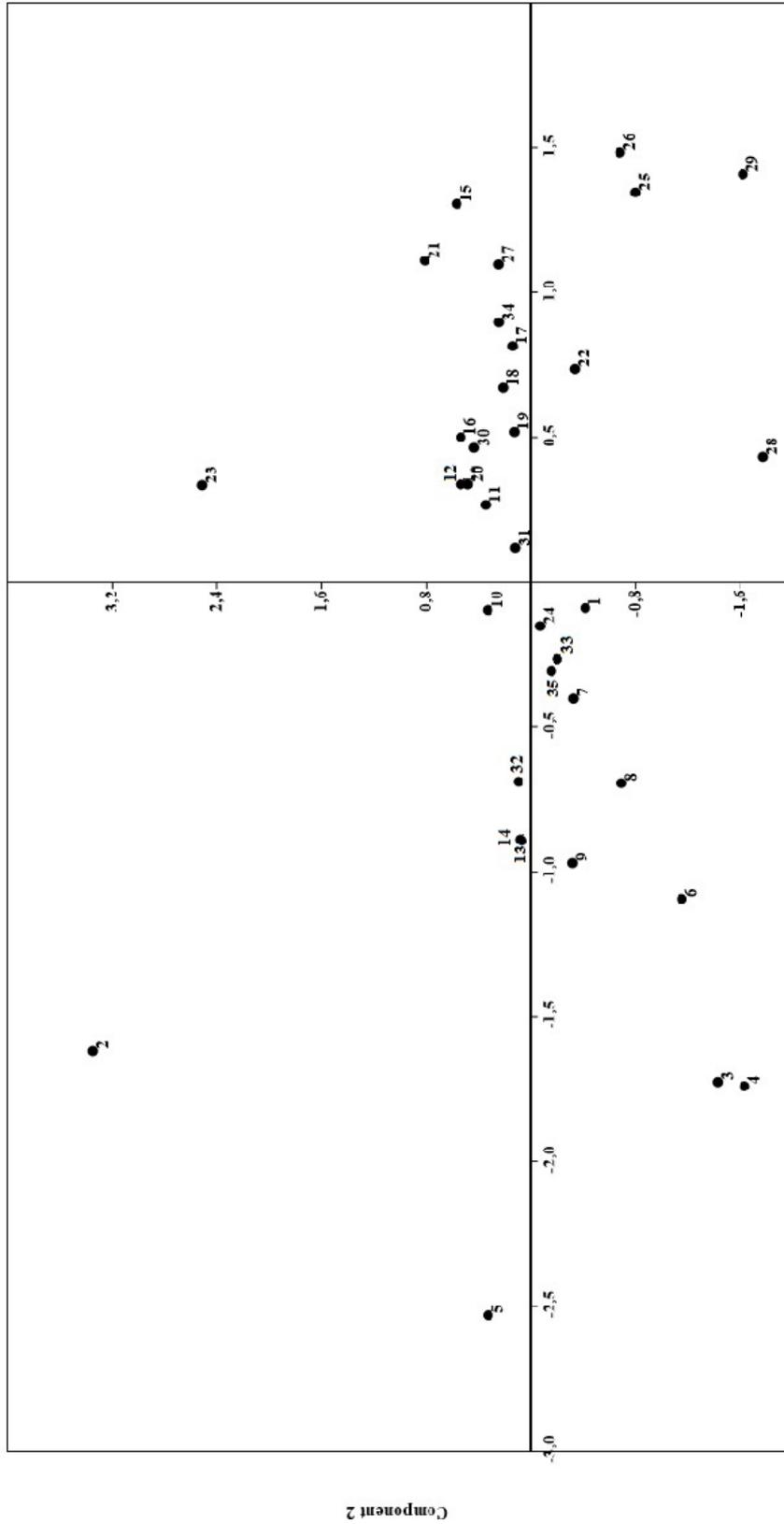


Рис. 2. Анализ главных компонент фенотипического сходства (r) популяций *Retorfulax esculentus* complex

Анализ популяционного разнообразия по фенотипическим признакам оценивали по формулам, предложенным Л. А. Животовским [22–23]:

$$r = \sum_{i=1}^m \sqrt{p_i q_i}, \quad \mu = (\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2} + \dots + \sqrt{q_m})^2, \quad S_m = \sqrt{\mu(m-\mu) / N},$$

$$h = 1 - (\mu / m), \quad S_h = \sqrt{h_\mu(1-h_\mu) / N},$$

где r – сходство популяций по фенотипическим признакам; p и q – частота i -морфы в сравниваемых популяциях; μ – среднее число морф; h – частота редких морф; S_m S_h – ошибки соответствующих показателей μ и h ; q_1, q_2, q_m – частоты соответствующих морф (m); N – объем выборки.

Статистический анализ проведен с помощью пакета программ Microsoft Excel 2010, анализ главных компонент проведен в программе PAST V. 2.17с.

Результаты и обсуждение

Результаты фенотипического анализа популяций *Pelophylax esculentus* complex представлены в табл. 2–3 и на рис. 2.

Известно, что распределение частот морф имеет важное значение при анализе фенотипического разнообразия популяций. В условиях антропогенной нагрузки отмечается значительное изменение фенотипического состава в популяциях бесхвостых земноводных, в частности зеленых лягушек [4–5, 8–9]. Наше исследование подтверждает этот факт. Так, более высокий уровень изменчивости отмечен нами в естественных или мало нарушенных биотопах. Для обитающих здесь популяций характерны наибольшие значения показателя внутривидового разнообразия (μ): № 14 «Сазон», № 30 «Айдар», № 29 «Голубой Дунай», № 20 «Халань», № 28 «Валуй», № 10 «Нежеголь».

С увеличением антропогенной нагрузки наблюдается снижение фенотипического разнообразия. Самыми мономорфными оказались группы, обитающие в урбанизированных ландшафтах г. Белгорода, а именно пункты: № 4 «Ячевский», № 3 «Оскочное», № 6 «Устье», № 2 «Везёлка», № 1 «Северский Донец». Примечательно, что в данных популяциях присутствуют только особи со светлой дорсомедиальной полосой.

Другим важным показателем фенотипического состояния популяции является доля редких морф (h). Согласно литературным данным известно, что при увеличении антропогенной нагрузки и снижении фенотипического разнообразия наблюдается пропорциональное увеличение доли редких морф [5, 8].

По представленным данным в табл. 2 наибольшее значение долей редких морф зафиксировано в популяциях № 4 «Ячевский», № 3 «Оскочное» и № 6 «Устье», обитающих на урбанизированных ландшафтах г. Белгорода (табл. 2, рис. 1).

Интересен тот факт, что, по данным нашего предыдущего исследования генетической структуры популяций *Pelophylax esculentus* complex [24], наибольшее генетическое разнообразие зафиксировано в условиях городской среды. При этом более мономорфными оказались группы, обитающие в мало нарушенных или естественных биотопах, что свидетельствует об активной адаптации популяций к меняющимся условиям антропогенной среды [25].

Таблица 2

Частоты фенотипов и показатели фенотипического разнообразия
в популяциях *Pelophylax esculentus* complex

Фенотипы	1. Северский Донец	2. Везёлка	3. Оскольное	4. Ячневский	5. Дубовое	6. Устье	7. Майский	8. Северный	9. Шопино
S	0,368	0,25	0,5	0,25	0,222	0,346	0,312	0,091	0,087
M	0,11	0	0	0	0,111	0	0,25	0,227	0,217
P	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0,087
B	0	0	0	0	0,167	0	0	0	0,043
SM	0,474	0,5	0,4	0,687	0,389	0,5	0,312	0,55	0,217
SP	0,053	0,25	0,1	0,063	0	0,154	0,125	0,136	0,347
SMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu \pm S\mu$	$3,419 \pm 0,803$	$2,914 \pm 0,077$	$2,742 \pm 0,764$	$2,494 \pm 0,838$	$4,708 \pm 0,774$	$2,848 \pm 0,674$	$3,887 \pm 0,869$	$3,557 \pm 0,746$	$5,385 \pm 0,615$
$h \pm Sh$	$0,511 \pm 0,115$	$0,584 \pm 0,110$	$0,608 \pm 0,109$	$0,644 \pm 0,119$	$0,327 \pm 0,111$	$0,593 \pm 0,096$	$0,444 \pm 0,124$	$0,492 \pm 0,106$	$0,231 \pm 0,088$
<i>n</i>	19	20	20	16	18	26	16	22	23
Фенотипы	10. Нежеголь	11. Графовка	12. Глогово	13. Плотва	14. Сазон	15. Оскол I	16. Волчья	17. Губкин	18. Орлик
S	0,182	0,176	0,2	0,077	0,1	0,182	0,278	0,3	0,08
M	0,182	0,176	0,16	0,231	0,15	0,091	0,111	0,117	0,12
P	0,136	0,117	0	0,077	0,15	0,045	0	0,033	0,04
B	0,091	0,117	0,08	0,077	0,1	0,091	0,111	0	0,04
SM	0,318	0,294	0,32	0,231	0,25	0,5	0,333	0,4	0,44
SP	0,045	0,12	0,16	0,23	0,15	0,091	0,111	0,13	0,28
SMP	0,045	0,00	0,08	0,077	0,1	0	0,055	0	0
$\mu \pm S\mu$	$6,321 \pm 0,442$	$5,815 \pm 0,637$	$5,658 \pm 0,551$	$6,505 \pm 0,497$	$6,815 \pm 0,251$	$5,068 \pm 0,667$	$5,476 \pm 0,681$	$4,283 \pm 0,441$	$4,936 \pm 0,638$
$h \pm Sh$	$0,097 \pm 0,063$	$0,169 \pm 0,091$	$0,192 \pm 0,079$	$0,071 \pm 0,071$	$0,026 \pm 0,036$	$0,276 \pm 0,095$	$0,218 \pm 0,097$	$0,388 \pm 0,063$	$0,295 \pm 0,091$
<i>n</i>	22	17	25	13	20	22	18	60	25

Окончание табл. 2

Фенотипы	19. Ольшанка	20. Халань	21. Беленькая	22. Оскол	23. Чуфичка	24. Корень	25. Короча	26. Сейм	27. Т. Сосна
S	0,357	0,176	0,125	0,222	0,267	0,211	0,214	0,235	0,227
M	0,143	0,147	0,125	0,055	0,067	0,105	0,214	0,059	0,091
P	0,071	0,176	0,042	0,111	0,067	0	0,071	0,059	0,045
B	0	0,059	0,042	0	0	0,105	0	0,117	0
SM	0,286	0,265	0,375	0,389	0,4	0,263	0,286	0,412	0,409
SP	0,143	0,147	0,25	0,222	0,2	0,211	0,214	0,118	0,227
SMP	0	0,029	0,042	0	0	0,105	0	0	0
$\mu \pm S\mu$	4,645 \pm 0,884	6,429 \pm 0,328	5,914 \pm 0,517	4,560 \pm 0,786	4,462 \pm 0,869	5,779 \pm 0,609	4,798 \pm 0,868	5,280 \pm 0,731	4,443 \pm 0,719
$h \pm Sh$	0,336 \pm 0,126	0,081 \pm 0,047	0,155 \pm 0,074	0,348 \pm 0,112	0,362 \pm 0,124	0,174 \pm 0,087	0,314 \pm 0,124	0,246 \pm 0,104	0,365 \pm 0,103
<i>n</i>	14	34	24	18	15	19	14	17	22
Фенотипы	28. Валуй	29. Г. Дунай	30. Айдар	31. Ворскла	32. Ракига	33. Пена	34. Белая	35. Дон	
S	0,167	0,143	0,128	0,105	0,238	0,148	0,333	0,167	
M	0,042	0,095	0,121	0,105	0,048	0,074	0,083	0,167	
P	0,083	0,095	0,151	0,158	0,095	0,037	0,083	0,083	
B	0,083	0,095	0,061	0,105	0	0,074	0	0	
SM	0,25	0,333	0,303	0,368	0,238	0,333	0,333	0,25	
SP	0,292	0,19	0,121	0,158	0,238	0,333	0,167	0,333	
SMP	0,083	0,047	0,061	0	0,143	0	0	0	
$\mu \pm S\mu$	6,342 \pm 0,417	6,430 \pm 0,418	6,527 \pm 0,306	5,641 \pm 0,635	5,610 \pm 0,609	5,182 \pm 0,591	4,581 \pm 0,961	4,763 \pm 0,942	
$h \pm Sh$	0,094 \pm 0,059	0,081 \pm 0,059	0,067 \pm 0,044	0,194 \pm 0,091	0,198 \pm 0,087	0,259 \pm 0,084	0,345 \pm 0,137	0,319 \pm 0,135	
<i>n</i>	24	21	33	19	21	27	12	12	

Примечание. μ – показатель внутрипопуляционного разнообразия; $S\mu$ – ошибка показателя внутрипопуляционного разнообразия; h – показатель доли редких морф; Sh – ошибка показателя доли редких морф; n – число особей в выборке.

Таблица 3

Показатели фенотипического сходства (*r*) популяций *Pelorophylax esculentus* complex

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35				
1.	0,000																																						
2.	0,905	0,000																																					
3.	0,937	0,959	0,000																																				
4.	0,932	0,961	0,957	0,000																																			
5.	0,823	0,677	0,728	0,753	0,000																																		
6.	0,934	0,990	0,987	0,979	0,718	0,000																																	
7.	0,967	0,852	0,861	0,831	0,779	0,863	0,000																																
8.	0,931	0,858	0,797	0,855	0,762	0,844	0,950	0,000																															
9.	0,786	0,772	0,690	0,681	0,769	0,735	0,867	0,873	0,000																														
10.	0,834	0,719	0,726	0,734	0,941	0,733	0,842	0,827	0,885	0,000																													
11.	0,843	0,765	0,749	0,745	0,931	0,765	0,869	0,854	0,948	0,967	0,000																												
12.	0,882	0,824	0,800	0,793	0,812	0,820	0,908	0,891	0,877	0,911	0,897	0,000																											
13.	0,765	0,719	0,652	0,657	0,796	0,691	0,834	0,845	0,953	0,942	0,934	0,937	0,000																										
14.	0,731	0,705	0,662	0,670	0,848	0,692	0,787	0,792	0,916	0,970	0,941	0,913	0,963	0,000																									
15.	0,912	0,864	0,844	0,875	0,937	0,869	0,891	0,906	0,900	0,943	0,969	0,917	0,890	0,900	0,000																								
16.	0,902	0,838	0,843	0,826	0,856	0,843	0,902	0,867	0,846	0,914	0,903	0,990	0,902	0,893	0,934	0,000																							
17.	0,962	0,904	0,903	0,880	0,827	0,913	0,960	0,900	0,885	0,881	0,904	0,885	0,846	0,834	0,933	0,889	0,000																						
18.	0,862	0,875	0,787	0,824	0,811	0,843	0,889	0,936	0,967	0,889	0,943	0,909	0,929	0,901	0,957	0,891	0,922	0,000																					
19.	0,940	0,866	0,880	0,837	0,830	0,878	0,955	0,895	0,903	0,897	0,921	0,872	0,860	0,853	0,918	0,876	0,981	0,908	0,000																				
20.	0,821	0,766	0,744	0,733	0,886	0,761	0,850	0,831	0,943	0,979	0,975	0,903	0,963	0,981	0,937	0,895	0,903	0,928	0,928	0,000																			
21.	0,865	0,860	0,795	0,810	0,801	0,837	0,894	0,912	0,952	0,954	0,941	0,961	0,972	0,957	0,946	0,941	0,922	0,975	0,916	0,961	0,000																		
22.	0,900	0,929	0,877	0,871	0,801	0,903	0,897	0,889	0,916	0,877	0,911	0,846	0,862	0,864	0,926	0,844	0,966	0,945	0,971	0,930	0,936	0,000																	
23.	0,935	0,822	0,907	0,894	0,777	0,926	0,929	0,911	0,907	0,878	0,910	0,871	0,858	0,853	0,935	0,872	0,981	0,943	0,962	0,921	0,937	0,996	0,000																
24.	0,842	0,841	0,794	0,769	0,777	0,813	0,868	0,841	0,864	0,888	0,876	0,892	0,930	0,910	0,892	0,984	0,954	0,890	0,844	0,891	0,953	0,829	0,850	0,000															
25.	0,905	0,868	0,812	0,790	0,931	0,832	0,953	0,926	0,953	0,894	0,929	0,880	0,904	0,876	0,911	0,861	0,968	0,944	0,964	0,937	0,941	0,968	0,973	0,849	0,000														
26.	0,893	0,929	0,857	0,860	0,931	0,874	0,872	0,862	0,901	0,938	0,972	0,911	0,886	0,903	0,992	0,936	0,924	0,945	0,919	0,944	0,941	0,929	0,935	0,899	0,903	0,000													
27.	0,937	0,929	0,892	0,888	0,795	0,920	0,943	0,936	0,923	0,873	0,910	0,886	0,872	0,855	0,936	0,880	0,982	0,988	0,978	0,917	0,949	0,990	0,997	0,863	0,980	0,930	0,000												
28.	0,782	0,929	0,776	0,754	0,786	0,806	0,801	0,789	0,913	0,913	0,913	0,926	0,951	0,962	0,901	0,916	0,959	0,919	0,870	0,955	0,970	0,903	0,896	0,945	0,878	0,923	0,895	0,000											
29.	0,827	0,929	0,770	0,777	0,870	0,802	0,843	0,849	0,937	0,965	0,963	0,943	0,972	0,983	0,953	0,935	0,893	0,951	0,899	0,983	0,985	0,920	0,915	0,941	0,911	0,959	0,916	0,863	0,000										
30.	0,831	0,777	0,739	0,757	0,891	0,777	0,843	0,830	0,916	0,965	0,961	0,920	0,962	0,966	0,938	0,915	0,899	0,918	0,916	0,995	0,965	0,920	0,914	0,910	0,918	0,943	0,909	0,963	0,988	0,000									
31.	0,811	0,790	0,739	0,765	0,965	0,776	0,823	0,848	0,949	0,948	0,986	0,869	0,929	0,942	0,968	0,870	0,890	0,961	0,897	0,971	0,947	0,928	0,916	0,853	0,915	0,970	0,915	0,925	0,969	0,958	0,000								
32.	0,815	0,833	0,849	0,771	0,710	0,824	0,827	0,792	0,832	0,875	0,834	0,884	0,899	0,911	0,832	0,863	0,885	0,837	0,902	0,921	0,933	0,919	0,915	0,892	0,895	0,845	0,909	0,949	0,924	0,936	0,842	0,000							
33.	0,832	0,889	0,820	0,816	0,747	0,861	0,878	0,885	0,910	0,816	0,885	0,916	0,871	0,831	0,912	0,910	0,881	0,948	0,862	0,857	0,933	0,882	0,895	0,914	0,883	0,917	0,912	0,895	0,902	0,887	0,908	0,887	0,919	0,908	0,915	0,925	0,000		
34.	0,935	0,901	0,902	0,869	0,825	0,908	0,934	0,889	0,900	0,889	0,916	0,864	0,852	0,853	0,926	0,870	0,982	0,920	0,994	0,928	0,923	0,989	0,995	0,842	0,976	0,931	0,968	0,887	0,908	0,887	0,919	0,908	0,915	0,925	0,000				
35.	0,857	0,846	0,787	0,763	0,737	0,820	0,916	0,900	0,969	0,860	0,911	0,860	0,907	0,873	0,886	0,832	0,943	0,952	0,961	0,928	0,942	0,969	0,965	0,841	0,990	0,886	0,974	0,895	0,910	0,905	0,913	0,903	0,946	0,961	0,000				

Примечание. Жирным шрифтом выделены фенотипически наиболее близкие популяции.

Анализ главных компонент (РСА), попарного сравнения на основе фенотипического сходства (r) (см. рис. 2), показал значительную схожесть большинства популяций, что может служить дополнительным доказательством единой панмиктической популяции в районе исследования [24]. При этом на первую и вторую компоненту приходится 5,88 и 4,35 % соответственно. Равномерное распределение дисперсии, представленное на рис. 3, вероятно, можно объяснить фенотипической близостью изучаемых популяций.

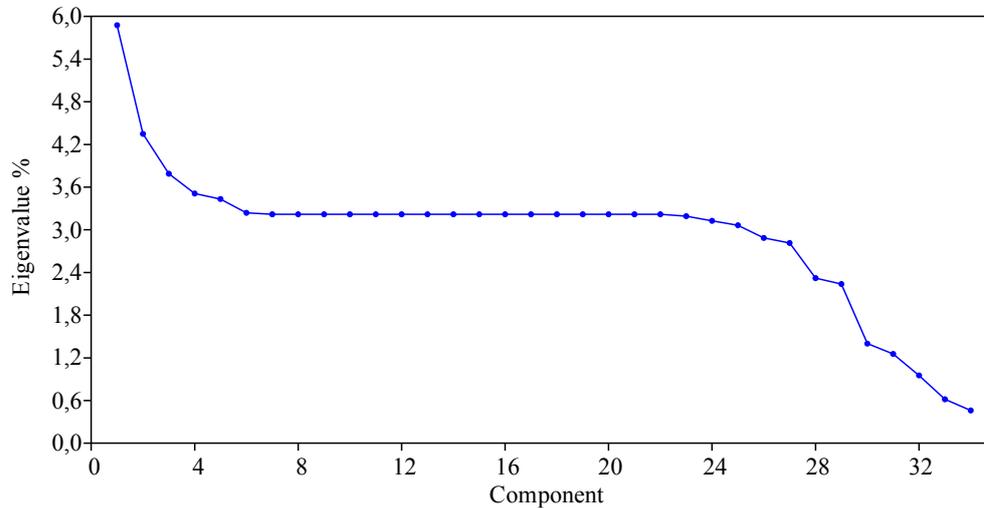


Рис. 3. Линейный график значений главных компонент

Тем не менее анализ РСА позволил выявить и уникальные группы, а именно: № 2 «Везёлка», № 5 «Ячневский», № 23 «Чуфичка», № 28 «Валуи», № 29 «Голубой Дунай», которые по соотношению частот фенотипических признаков дистанцировались от остальных групп региона. Примечательно, что среди них есть группы, обитающие как на импактных территориях, так и в относительно чистых биотопах. Данный факт свидетельствует о неоднородности условий среды обитания зеленых лягушек в районе исследования и об эффективных компенсаторных реакциях популяций в ответ на антропогенный прессинг.

Данные, полученные в ходе исследования, согласуются с результатами предыдущих исследований, в частности, наблюдается изменение фенотипического состава популяций комплекса зеленых лягушек на импактных территориях Казани, Липецка, Самарской области, Республики Башкортостан [10, 26–27]. Особый интерес вызывает фенотипический состав популяций Тольятти [28]. Так, у озерной лягушки в урбанизированных ландшафтах наблюдается снижение фенотипического состава, в то время как у прудовой, наоборот, происходит его возрастание, подобная реакция популяций отмечена и у травяных лягушек Нижнего Новгорода (*Rana temporaria* Linnaeus, 1758) [29–30]. Данное обстоятельство свидетельствует о неоднородности городских ландшафтов и активной адаптации популяций бесхвостых земноводных.

Изменение фенотипической структуры популяций земноводных, в частности зеленых лягушек, в условиях антропогенного пресса может быть обусловлено рядом факторов. К ним можно отнести селективное преимущество физиологических отличий между полосатыми или бесполосыми особями.

Однако окраска спины также может проявлять криптическое значение, как для полосатых [31], так и для бесполосых [10]. Кроме того, на фенотипическую структуру может оказывать и географическая изменчивость, как отмечает ряд авторов на востоке ареала у озерной лягушки частота морфы “*striata*” может сильно варьировать [26]. При этом на территории исследования, по ранее опубликованным данным Г. А. Лады [31], доля полосатых особей в р. Северский Донец достигает 98 %, что может свидетельствовать о высоком генетическом полиморфизме.

Полученные результаты в дальнейшем помогут оценить уровень фенотипического разнообразия криптических и полиплоидных видов комплекса зеленых лягушек в условиях «Северско-Донецкого центра разнообразия *Pelophylax esculentus* complex» [32].

Заключение

Таким образом, в популяциях *Pelophylax esculentus* complex в условиях антропогенной нагрузки наблюдается снижение фенотипического разнообразия и возрастание доли редких морф.

Анализ главных компонент продемонстрировал фенотипическую схожесть большинства популяций, при этом были выявлены уникальные группы, которые обитают как на импактных территориях, так и в естественных биотопах, что может свидетельствовать об активной адаптации лягушек к меняющимся условиям среды.

Список литературы

1. Лада Г. А. Бесхвостые земноводные (Anura) Русской равнины: изменчивость, видообразование, ареалы, проблемы охраны : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Казань, 2012. 48 с.
2. Zhelev Z. M., Arnaudova D. N., Popgeorgiev G. S., Tsonev S. V. In situ assessment of health status and heavy metal bioaccumulation of adult *Pelophylax ridibundus* (Anura: Ranidae) individuals inhabiting polluted area in southern Bulgaria // Ecological Indicators. 2020. Vol. 115. P. 1–15. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106413
3. Рыжов М. К. Земноводные и пресмыкающиеся Республики Мордовия: распространение, распределение, трофические связи и состояние охраны : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2007. 19 с.
4. Спирина Е. В. Амфибии как биоиндикационная тест-система для экологической оценки водной среды обитания : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ульяновск, 2007. 22 с.
5. Кузовенко А. Е. Эколого-фаунистическая характеристика амфибий урбанизированных территорий Самарской области : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018. 19 с.
6. Пескова Т. Ю. Структура популяций земноводных как биоиндикатор антропогенного загрязнения среды. М. : Наука, 2002. 132 с.
7. Вершинин В. Л. Экологические особенности популяций амфибий урбанизированных территорий : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 1997. 47 с.
8. Зарипова Ф. Ф., Юмагулова Г. Р., Файзулин А. И. Характеристика состояния популяции озерной лягушки *Rana ridibunda* Pallas, 1771 (Anura, Amphibia) в Республике Башкортостан по полиморфизму рисунка окраски спины // Известия научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 1. С. 78–82.
9. Вершинин В. Л. Морфа *Striata* и ее роль в путях адаптационного генеза рода *Rana* в современной биосфере // Доклады академии наук. 2004. Т. 396, № 2. С. 280–282.

10. Замалетдинов Р. И. Фенотипическая структура популяций зеленых лягушек на урбанизированных территориях // Поволжский экологический журнал. 2002. № 2. С. 163–165.
11. Никашин И. А. Эколого-морфологические признаки популяций озерной лягушки (*Rana ridibunda* Pall.) как средство оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы (на примере Липецкой области) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Липецк, 2007. 17 с.
12. Berger L. Morphology of the F1 generation of various crosses within *Rana esculenta* – complex // Acta Zoologica Cracoviensia. 1968. Vol. 13. P. 301–324.
13. Tunner H. G. Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation // Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung. 1974. № 12. P. 309–314. doi:10.1111/j.1439-0469.1974.tb00173.x
14. Akin C., Bilgin C. C., Beerli P. [et al.]. Phylogeographic patterns of genetic diversity in eastern Mediterranean water frogs were determined by geological processes and climate change in the Late Cenozoic // Journal of Biogeography. 2010. Vol. 37, № 11. P. 2111–2124. doi:10.1111/j.1365-2699.2010.02368.x
15. Plötner J. Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyrern der Wissenschaft zur biologischen Sensation. Bielefeld : Laurenti, 2005. 160 p.
16. Лада Г. А. Среднеевропейские зеленые лягушки (гибридогенный комплекс *Rana esculenta*): введение в проблему // Флора и фауна Черноземья. Тамбов, 1995. С. 88–109.
17. Иванов А. Ю. Молекулярно-генетические и экологические особенности распространения криптических форм озерной лягушки в восточной части ареала : дис. ... канд. биол. наук. Пенза, 2019. 137 с.
18. Ivanov A. Yu., Ruchin A. B., Fayzulin A. I. [et al.]. The first record of natural transfer of mitochondrial DNA from *Pelophylax* cf. *bedriagae* into *P. lessonae* (Amphibia, Anura) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Т. 4, № 2. P. 125–128. doi:10.24189/nrc.2019.020
19. Замалетдинов Р. И. Экология земноводных в условиях большого города (на примере г. Казани) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2003. 24 с.
20. Боркин Л. Я., Тихенко Н. Д. Некоторые аспекты морфологической изменчивости, полиморфизма окраски, роста, структуры популяции и суточной активности *Rana esculenta* на северной границе ареала // Экология и систематика амфибий и рептилий. 1979. Т. 89. С. 18–54.
21. Лада Г. А., Соколов А. С. Методы исследования земноводных : метод. пособие. Тамбов, 1999. 75 с.
22. Животовский Л. А. Показатель сходства популяций по полиморфным признакам // Журнал общей биологии. 1979. Т. 40, № 4. С. 587–602.
23. Животовский Л. А. Популяционная биометрия. М. : Наука, 1991. 276 с.
24. Бархатов А. С., Снегин Э. А., Юсупов С. Р. Генетическая структура популяций комплекса зеленые лягушки (*Pelophylax esculentus* complex) на территории юга Среднерусской возвышенности // Экологическая генетика. 2021. Т. 19, № 2. doi:10.17816/ecogen48555
25. Вершинин В. Л. Биота урбанизированных территорий. Екатеринбург, 2007. 73 с.
26. Файзулин А. И., Кузовенко А. Е. Использование амфибий в мониторинге состояния окружающей среды в условиях Самарской области: фенетическая структура популяций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1. С. 829–833.
27. Файзулин А. И., Зарипова Ф. Ф., Хусаинова И. М. Особенности полиморфизма по признаку *striata* в популяциях озерной лягушки *Rana ridibunda* Pallas, 1771 (Anura, Amphibia) Республики Башкортостан // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 3. С. 452–458.

28. Кузовенко А. Е. Эколого-фаунистическая характеристика амфибий урбанизированных территорий Самарской области : дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018. 211 с.
29. Лебединский А. А. Об адаптациях амфибий к условиям урбанизированной территории // Проблемы региональной экологии животных : тез. докл. Всерос. конф. зоологов пединститутов. Витебск, 1984. С. 106.
30. Лебединский А. А., Поморина Е. Н. Некоторые особенности популяции травяной лягушки в связи с ее обитанием на урбанизированной территории // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. 2008. № 2. С. 91–95.
31. Лада Г. А. О генетическом полиморфизме озерной лягушки (*Rana ridibunda*) в Центральном Черноземье // Фенетика природных популяций : материалы IV Всерос. совещ. М., 1990. С. 151–152.
32. Шабанов Д. А., Литвинчук С. Н. Зеленые лягушки: жизнь без правил или особый способ эволюции? // Природа. 2010. № 3. С. 29–36.

References

1. Lada G.A. Tailless amphibians (Anura) of the Russian Plain: variability, speciation, habitats, problems of protection. DSc abstract. Kazan, 2012:48. (In Russ.)
2. Zhelev Z.M., Arnaudova D.N., Popgeorgiev G.S., Tsonev S.V. In situ assessment of health status and heavy metal bioaccumulation of adult *Pelophylax ridibundus* (Anura: Ranidae) individuals inhabiting polluted area in southern Bulgaria. *Ecological Indicators*. 2020;115:1–15. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106413
3. Ryzhov M.K. Amphibians and reptiles of the Republic of Mordovia: spreading, allocation, trophic relations and the state of protection. PhD abstract. Tolyatti, 2007:19. (In Russ.)
4. Spirina E.V. Amphibians as a bioindication test system for ecological assessment of aquatic habitats. PhD abstract. Ulyanovsk, 2007:22. (In Russ.)
5. Kuzovenko A.E. Ecological and faunistic characteristics of amphibians in urbanized territories of Samara region. PhD abstract. Tolyatti, 2018:19. (In Russ.)
6. Peskova T.Yu. *Struktura populyatsiy zemnovodnykh kak bioindikator antropogennogo zagryazneniya sredy = The structure of amphibian populations as a bioindicator of anthropogenic pollution of the environment*. Moscow: Nauka, 2002:132. (In Russ.)
7. Vershinin V.L. Ecological features of amphibian populations in urbanized areas. DSc abstract. Ekaterinburg, 1997:47. (In Russ.)
8. Zariptova F.F., Yumagulova G.R., Fayzulin A.I. Characteristics of the state of *Rana ridibunda* Pallas, 1771 (Anura, Amphibia) population in the Republic of Bashkortostan on the polymorphism of the back color pattern. *Izvestiya nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;11(1):78–82. (In Russ.)
9. Vershinin V.L. Morfa *Striata* and its role in the pathways of adaptationogenesis of the genus *Rana* in the modern biosphere. *Doklady akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2004;396(2):280–282. (In Russ.)
10. Zamaletdinov R.I. Phenotypic structure of populations of green frogs in urbanized areas. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal = Volga ecological journal*. 2002;(2):163–165. (In Russ.)
11. Nikashin I.A. Ecological and morphological characteristics of *Rana ridibunda* Pall. population as a means of assessing anthropogenic impact on aquatic ecosystems (by the example of Lipetsk region). PhD abstract. Lipetsk, 2007:17. (In Russ.)
12. Berger L. Morphology of the F1 generation of various crosses within *Rana esculenta* – complex. *Acta Zoologica Cracoviensia*. 1968;13:301–324.
13. Tunner H.G. Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation. *Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung*. 1974;(12):309–314. doi:10.1111/j.1439-0469.1974.tb00173.x

14. Akin C., Bilgin C.C., Beerli P. [et al.]. Phylogeographic patterns of genetic diversity in eastern Mediterranean water frogs were determined by geological processes and climate change in the Late Cenozoic. *Journal of Biogeography*. 2010;37(11):2111–2124. doi:10.1111/j.1365-2699.2010.02368.x
15. Plötner J. *Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyrern der Wissenschaft zur biologischen Sensation*. Bielefeld: Laurenti, 2005:160.
16. Lada G.A. Central European green frogs (hybridogenic complex *Rana esculenta*): introduction to issues. *Flora i fauna Chernozem'ya = Flora and fauna of the Chernozem region*. Tambov, 1995:88–109. (In Russ.)
17. Ivanov A.Yu. Molecular genetic and ecological features of the distribution of cryptic forms of the marsh frog in the eastern part of the range. PhD dissertation. Penza, 2019: 137. (In Russ.)
18. Ivanov A.Yu., Ruchin A.B., Fayzulin A.I. [et al.]. The first record of natural transfer of mitochondrial DNA from *Pelophylax cf. bedriagae* into *P. lessonae* (Amphibia, Anura). *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka = Nature Conservation Research. Conservation science*. 2019;4(2):125–128. doi:10.24189/ncr.2019.020
19. Zamaletdinov R.I. Ecology of amphibians in a big city (by the example of Kazan). PhD abstract. Kazan, 2003:24. (In Russ.)
20. Borkin L.Ya., Tikhenko N.D. Some aspects of morphological variability, color polymorphism, growth, population structure and daily activity of *Rana esculenta* at the northern border of the range. *Ekologiya i sistematika amfibiyy i reptilyy = Ecology and taxonomy of amphibians and reptiles*. 1979;89:18–54. (In Russ.)
21. Lada G.A., Sokolov A.S. *Metody issledovaniya zemnovodnykh: metod. posobie = Research methods of amphibians: methodological allowance*. Tambov, 1999:75. (In Russ.)
22. Zhivotovskiy L.A. Indicator of similarity of populations by polymorphic traits. *Zhurnal obshchey biologii = Journal of General Biology*. 1979;40(4):587–602. (In Russ.)
23. Zhivotovskiy L.A. *Populyatsionnaya biometriya = Population biometrics*. Moscow: Nauka, 1991:276. (In Russ.)
24. Barkhatov A.S., Snegin E.A., Yusupov S.R. Genetic structure of populations of the green frog complex (*Pelophylax esculentus* complex) in the South Central Russian Upland. *Ekologicheskaya genetika = Ecological genetics*. 2021;19(2). (In Russ.). doi:10.17816/ecogen48555
25. Vershinin V.L. *Biota urbanizirovannykh territoriy = Urban biota*. Ekaterinburg, 2007:73. (In Russ.)
26. Fayzulin A.I., Kuzovenko A.E. The use of amphibians in monitoring the state of the environment in the Samara region: phenetic structure of populations. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(1):829–833. (In Russ.)
27. Fayzulin A.I., Zaripova F.F., Khusainova I.M. Peculiarities of striatal polymorphism in marsh frog populations of *Rana ridibunda* Pallas, 1771 (Anura, Amphibia) in the Republic of Bashkortostan. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(3):452–458. (In Russ.)
28. Kuzovenko A.E. Ecological and faunistic characteristics of amphibians in urbanized territories of the Samara region. PhD dissertation. Tolyatti, 2018:211. (In Russ.)
29. Lebedinskiy A.A. Adaptation of amphibians to the conditions of an urbanized territory. *Problemy regional'noy ekologiy zhivotnykh: tez. dokl. Vseros. konf. zoologov pedinstitutov = Issues of regional animal ecology: proceedings of the All-Russian conference of zoologists of pedagogical institutes*. Vitebsk, 1984:106. (In Russ.)
30. Lebedinskiy A.A., Pomorina E.N. Some features of the grass frog population in connection with its habitat in an urbanized area. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo = Bulletin of Lobachevsky University*. 2008;(2):91–95. (In Russ.)

31. Lada G.A. On the genetic polymorphism of the marsh frog (*Rana ridibunda*) in the Central Black Earth Region. *Fenetika prirodnykh populyatsiy: materialy IV Vseros. Soveshch.* = *The phenetics of natural populations: proceedings of the 4th All-Russian conf.* Moscow, 1990:151–152. (In Russ.)
32. Shabanov D.A., Litvinchuk S.N. Green frogs: life without rules or a special way of evolution? *Priroda = Nature*. 2010;(3):29–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Сергеевич Бархатов

аспирант, младший научный сотрудник,
Научно-исследовательский центр
геномной селекции, Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет
(Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85)

E-mail: barkhatov@bsu.edu.ru

Anatoliy S. Barkhatov

Postgraduate student, junior researcher,
Research Center of Genomic Selection,
Belgorod State National Research
University (85 Pobeda street, Belgorod,
Russia)

Эдуард Анатольевич Снегин

доктор биологических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского
центра геномной селекции, Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет
(Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85)

E-mail: snegin@bsu.edu.ru

Eduard A. Snegin

Doctor of biological science, professor,
the director of the Research Center
of Genomic Selection, Belgorod State
National Research University
(85 Pobeda street, Belgorod, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.06.2021

Принята к публикации / Accepted 28.06.2021

УДК 639.21.597.55.592
doi:10.21685/2307-9150-2021-3-8

Некоторые особенности способа оценки численности рыб в малых водных объектах с помощью подводной видеокамеры

А. Ю. Асанов

Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия

kfvniro-as@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Традиционно рыбохозяйственные исследования проводились на водных объектах с развитым рыбным промыслом с использованием постоянно совершенствующихся методик оценки численности рыб. В XXI в. появился практический интерес и к малым водным объектам. Это связано с массовой передачей водоемов и их гидротехнических сооружений в пользование и необходимостью оценки нанесенного вреда водным биоресурсам водотоков и водоемов при любом негативном воздействии с разработкой компенсационных мероприятий. Однако набор существующих методик для изучения в них численности ихтиофауны достаточно ограничен, применим на небольших участках акваторий и требует сложного оформления специального разрешения на вылов водных биоресурсов. Предложенный нами современный способ оценки численности и видового разнообразия рыб с помощью подводной видеокамеры в малых водных объектах позволяет значительно упростить и повысить качество исследований и является доступным для любого исследователя ихтиофауны. При этом вполне закономерно у исследователей возникает ряд вопросов по его практическому применению. Цель публикации – освещение некоторых особенностей использования данной методики с учетом накопленного материала и опыта апробирования. *Материалы и методы.* Исследования проводились системой подводного видеонаблюдения Calypso FDV-1111 по разработанной методике. Съемка осуществлялась на контрольных участках исследуемого водного объекта. Количество экспозиций и их длительность зависели от встречаемости представителей ихтиофауны. На однообразных и малонаселенных биотопах съемка велась в стандартном режиме, на участках с перепадами глубин, наличием зарослей, коряг, камней, многочисленной или разнообразной ихтиофауны количество экспозиций и их длительность возрастали, учитывались рыбы, одиножды отмеченные камерой. Приводятся результаты апробации способа в Пензенской области на озере Сандерка, пруду Лесной, торфяном карьере, участке рек Старая Сура и Сура. *Результаты.* Исследования подводной видеокамерой с целью определения численности рыб эффективны на малых водных объектах средней полосы России, характеризующихся невысокой прозрачностью и небольшими концентрациями рыб. Целесообразно использовать прямой учет одиножды встречаемых рыб с переводом на единицу площади – экз./м² и далее – на г/м². Наибольшие показатели встречаемости рыб отмечены в достаточно эвтрофированном оз. Сандерка с широким видовым составом ихтиофауны и большим количеством рыб младших возрастов. Значительная численность рыб в торфяном карьере отмечается за счет большого процента молоди. По главному востребованному показателю – ихтиомассе водного объекта за счет крупных рыб – преобладает участок р. Сура. В сравнении с результатами, полученными другими методами учета в малых водных объектах, данные по биомассе являются высокими особенно в реках. В отличие от неводных обловов с преобладанием молоди и мелких рыб, при работе с камерой фиксируется больше крупных особей, находящихся в недоступных для облова местах и избегающих его. Результаты, полученные данным

способом, вполне адекватны существующим запросам по рыбопродуктивности, предъявляемым к малым водоемам с их мизерным запасом рыб. Данный способ учета является как альтернативой, так и хорошим дополнением при комплексном использовании традиционных методов учета численности рыб в малых водных объектах средней полосы России. *Выводы.* Наряду с активно практикуемыми методами видеонаблюдения учета наземных животных, очевидно, и в области оценки численности рыб пришло время использования подводных видеокамер. С учетом доступности способа, рентабельности, эффективности, без гибели исследуемых объектов при изучении водных биоресурсов активизируются исследования малых водных объектов и их рыбного населения. А комплексные исследования в сочетании с другими методами дадут исчерпывающие сведения по состоянию водных биоресурсов малых водоемов и водотоков.

Ключевые слова: способ оценки, подводная видеокамера, ихтиофауна, численность, ихтиомасса, водные объекты, Пензенская область

Для цитирования: Асанов А. Ю. Некоторые особенности способа оценки численности рыб в малых водных объектах с помощью подводной видеокамеры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 85–98. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-8

The method' features for assessing the number of fish in small reservoirs and watercourses using an underwater video camera

A.Yu. Asanov

Penza State Agricultural University, Penza, Russia

kfvniro-as@list.ru

Abstract. *Background.* Traditionally, ichthyological studies were carried out on large reservoirs and rivers with developed fishing, using the constantly improving methodology for assessing the fish number. In the 21st century, there has been a practical interest in small reservoirs and watercourses. This is due to the massive transfer of water bodies and their hydraulic structures for use and the need to assess the damage caused to aquatic biological resources of watercourses and water bodies under any negative impact with the development of compensatory measures. However, the set of existing methods for studying the abundance of ichthyofauna in them is quite limited, applicable in small areas of water areas, and requires a complex registration of a special permit for catching aquatic biological resources. Our proposed modern method for assessing the abundance and species diversity of fish using an underwater video camera in small water bodies makes it possible to significantly simplify and improve the quality of research and is accessible to any researcher of ichthyofauna. At the same time, quite naturally, researchers have a number of questions about its practical application. The purpose of the publication is to highlight some of the features of using this technique, taking into account the accumulated material and testing experience. *Materials and methods.* The research was carried out by a system of underwater video surveillance Calypso FDV-1111 according to the developed method. The survey was carried out on the control areas of the investigated water body, fish were taken into account, once marked by the camera. The results of approbation of the method in the Penza region on the Sanderka lake, the Lesnoy pond, the peat quarry, the section of the Staraya Sura and Sura rivers are presented. *Results.* Research with an underwater video camera to determine The number of fish is effective in small water bodies of central Russia, characterized by low transparency and low concentrations of fish. It is advisable to use direct counting of once encountered fish with conversion per unit area – ind./m² and then – per g/m².

The highest occurrence of fish was noted in a fairly productive lake Sanderka with a wide species composition of ichthyofauna and a large number of juveniles. A significant amount of fish was recorded in the peat quarry due to the large percentage of juveniles. According to the main demanded indicator – the ichthyomass of the reservoir due to large fish in the section of the river Surah. Compared to the results obtained by other accounting methods in small water bodies, biomass data are high, especially in rivers. In contrast to non-aquatic catches with a predominance of juveniles and small fish, when working with the camera, more large individuals are recorded that are in places inaccessible for fishing and avoid it. The results obtained by this method are quite adequate to the existing requests for fish productivity presented to small water bodies with their scanty fish stock. This method of accounting is both an alternative and a good addition to the complex use of traditional methods of accounting for the number of fish in small water bodies of central Russia. *Conclusions.* Along with actively practiced video surveillance methods registration of terrestrial animals, obviously, and in the field of assessing the number of fish, the time has come to use underwater video cameras. Taking into account the availability of the method, cost-effectiveness, without the death of the studied objects in the study of aquatic biological resources, the study of small reservoirs and rivers of their fish population is intensified. And comprehensive research in combination with other methods will provide comprehensive information on the state of aquatic biological resources of small reservoirs and rivers.

Keywords: assessment technique, underwater video camera, fish fauna, quantity, ichthyomass, reservoirs, watercourses, Penza region

For citation: Asanov A.Yu. The method' features for assessing the number of fish in small reservoirs and watercourses using an underwater video camera. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):85–98. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-8

Введение

Оценка численности рыб в России всегда практиковалась в тех водных объектах, где запасы водных биоресурсов позволяли вести их промышленный отлов. Подобные расчеты производятся с целью постоянного использования рыбных запасов путем разработки оптимальных допустимых (ОДУ) и возможных (ВВ) квот вылова. Соответственно, методики постоянно разрабатывались и усовершенствовались для оценки численности рыб в океанах, морях, крупных водохранилищах, озерах и реках [1–5]. Из многочисленных водных объектов Пензенской области и Республики Мордовия лишь в Сурском (Пензенском) водохранилище в настоящее время выделено четыре рыбопромысловых участка для промышленного лова рыбы, т.е. все остальные с точки зрения рыбного промысла являются малыми. Несмотря на невысокий рыбохозяйственный статус малых водоемов и водотоков, использование их водных биоресурсов регулируется Росрыболовством и любое негативное воздействие, ухудшающее их состояние, подлежит оценке нанесенного им вреда и его компенсации. Учитывая, что в приведенных субъектах проживает два миллиона человек, насчитывается огромное количество рыболовов-любителей, пользователей водоемов, которым гораздо интереснее рыба в расположенных рядом малых водоемах и реках. Поэтому следует учитывать интересы такого количества людей и уделять внимание ихтиофауне малых водных объектов.

Из применяемых методов исследования ихтиофауны водных объектов региона ихтиологами не одно столетие традиционно использовались ставные

сети, мелкаячейные невода, подъемники («пауки»), верши, сачки, крючковые снасти. Причем существующие методики позволяют выйти на экспертную численность рыб только при использовании сетей и неводов, применение которых в свою очередь ограничено скоростями течения для сетей и площадями чистых мелководий [6–9]. Также труднопреодолимой проблемой для возможности ведения лова сетями и неводами является необходимость оформления разрешения на их применение для исследователей, не входящих в научные организации Росрыболовства, без которого данный лов считается браконьерским. Предложенный нами современный способ оценки численности и видового разнообразия рыб с помощью подводной видеокамеры в малых водных объектах позволяет значительно упростить и повысить качество исследований без необходимости оформления специальных разрешений, т.е. является доступным для любого исследователя ихтиофауны [10]. По предлагаемой новой методике вполне закономерно у исследователей возникает ряд вопросов по ее практическому применению. Поэтому целью публикации является освещение некоторых особенностей использования данной методики с учетом накопленного опыта апробирования и материала.

Материалы и методы

Исследования проводились любительской системой подводного видеонаблюдения Calypso FDV-1111 по разработанной методике [10]. Видеокамера за ее видеокабель крепится к раздвижному удилищу, что позволяет оперативно, как удочкой при ловле рыбы, обследовать любые участки водного объекта. Съемка осуществлялась на контрольных участках (характерных биотопах) исследуемого водного объекта. Количество экспозиций и их длительность зависела от встречаемости представителей ихтиофауны. На однообразных и малонаселенных биотопах съемка велась в стандартном режиме, на участках с перепадами глубин, наличием зарослей, коряг, камней, многочисленной или разнообразной ихтиофауной количество экспозиций и их длительность возрастали, учитывались рыбы, единожды отмеченные камерой.

С учетом угла обзора камеры и прозрачности воды рассчитывалась площадь контрольного участка. Используемые для расчетов показатели биомассы отдельных рыб принимались из материалов, собранных на данных водоемах, из архивных материалов и литературных источников [11–13]. Исследования подводной видеокамерой производились при выполнении научно-исследовательских работ на различных водных объектах Пензенской области: на озере Сандерка (2018), пруду Лесной (2018), торфяном карьере (2020), участке рек Старая Сура и Сура (2018).

Методические особенности

Исследования видеокамерой с целью определения численности рыб эффективны на малых водных объектах, так как обзор, как правило, ограничивается невысокой прозрачностью воды в средней полосе России. На подобных водотоках и водоемах либо вообще не целесообразно использование плавсредств, либо используются резиновые весельные лодки. В случаях применения моторной лодки, движение которой отпугивает рыбу, необходимо делать стационарные экспозиции, отплыв от места выключения мотора.

Работа телекамерой производится с помощью удилыща и не отличается от ловли рыбы удочкой. Размер самой камеры составляет 2,5 см в диаметре и 3,0 см в длину. Для горизонтальной съемки она крепится в подвес в виде плавника рыбы высотой 7 см, т.е. общий размер камеры не превышает небольшой блесны, но камуфляжного цвета. Длина видеокабеля составляет 20 м, поэтому камера, как и при ловле удочкой, не распугивает рыбу, а скорее привлекает ее, особый интерес может проявлять окунь *Perca fluviatilis*. Наблюдения за поведением рыб в водных объектах Пензенской области показали, что ихтиофауна обычно придерживается небольших по размерам биотопов, особенно в реках (водотоках). Часть рыб постоянно курсирует вдоль берега из одной стороны в другую (плотва *Rutilus rutilus*, окунь, уклейка *Alburnus alburnus*, верховка *Leucaspis delineatus*), некоторые в местах перепада глубин на течении двигаются по кругу или спирали (сазан *Cyprinus carpio*, голавль *Leuciscus cephalus*, язь *Leuciscus idus*, жерех *Aspius aspius*). Некоторые стоят на месте – в зарослях у поверхности щука *Esox Lucius*, у дна за укрытиями ротан *Percottus glehni*, на течении у дна судак *Stizostedion lucioperca*. При этом и в реке, и в непроточном водоеме рыба не совершает постоянных миграций от одного берега к другому. Поэтому отсутствие прозрачности в водотоке от берега до берега не влияет на качество исследований. Для репрезентативной оценки численности водного объекта следует отработать основные характерные биотопы с разных берегов.

Работа с видеокамерой в солнечный или пасмурный день для оценки численности рыб значения не имеет. Определяющим фактором является прозрачность воды. При солнечном свете может получиться более четкое изображение рыб, если целью является получение фотографии, однако и рыба в свою очередь может легче обнаруживать присутствие оператора. Также при ярком свете неудобно работать с экраном монитора. Лучшие результаты по учету получаются при отсутствии солнца, в пасмурный день и в воде с невысокой прозрачностью. Средние глубины малых водных объектов региона не превышают двух метров и соответственно хорошо доступны для учета камерой. При необходимости работы на большой глубине, в ночное время, при массовом «цветении» водорослей в камере предусмотрена функция инфракрасной светодиодной подсветки.

Все наблюдения при использовании видеокамеры записываются на карту памяти, поэтому, работая в стационарных условиях, можно многократно с различными скоростями и прочими возможностями современных компьютеров просматривать и изучать отснятый материал, просчитывая и идентифицируя рыб по видовой принадлежности. Используемая нами техника позволяет достаточно достоверно работать с обитателями водоемов старше одного года, реальные трудности возникают в определении видового состава мальков карповых рыб, что обычно не принципиально в решении поставленных задач. Более совершенная техника с большим разрешением фотографии позволяет более точно идентифицировать молодь карповых рыб по строению тела, плавников и их окраске.

Численность рыб в малых водных объектах Сурского края и средней полосы России невелика: в реках – 1–4 экз./м² и 6–10 г/м², в водоемах около 1 экз./м² и 11–16 г/м² [8–9, 14–15]. Поэтому полученные нами результаты, как правило с небольшой концентрацией рыб, при тщательной работе с отснятым

материалом практически исключают возможность повторного счета рыб. Отсюда наряду с измерением численности рыб в экз./мин возможно сразу переходить к востребованным показателям – экз./м² или г/м² [15–16].

Практические результаты

Озеро Сандерка. Пойменное озеро-старица реки Сура площадью 14 га, длиной 3 км, средней шириной 25 м, с глубинами до 4 м, прозрачностью воды 1,4 м. Густо заросшее прибрежной водной растительностью, не позволяющей проведения неводного лова.

Ставными сетями за сутки было отловлено 5 экземпляров рыб (3 вида) – лещ *Abramis brama*, плотва, линь *Tinca tinca*. Съёмки камерой производились с двух мостков и резиновой лодки на трех участках озера в течение двух часов. Всего отмечено 248 экземпляров рыб (7 видов). Однако для привлечения рыб на участке № 3 была использована подкормка, поэтому для сравнительной характеристики с другими участками и водными объектами результаты участка не использовались. Всего на двух других участках камерой зафиксировано 102 экземпляра рыб (табл. 1). Предполагаемый возраст: окунь – 1+–2+, плотва – 1+–3+, красноперка *Scardinius erythrophthalmus* – 1+–3+, белоглазка *Ballerus sapa* – 2+, щука – 1+–2+, верховка – 0+–1+. Экспертная оценка численности и биомассы: участок № 1 (площадь 7 м²) – 9,6 экз./м² и 169 г/м²; участок № 2 (23 м²) – 1,5 экз./м² и 43 г/м². Средние показатели по водным объектам приведены в табл. 1, они получены путем деления учтенной общей численности рыб и их биомассы, на общую площадь учета камерой.

Пруд Лесной. Треугольной формы, площадью 4 га, со средними глубинами 2,2 м, прозрачностью воды 1,2 м. Часть пруда находится непосредственно в лесной зоне с высокими берегами, с резким свалом глубин и наличием коряг, недоступная для неводного облова. Противоположная сторона с наличием песчаных мелководий.

В результате съёмки подводной камерой на пяти участках пруда в течение двух часов зафиксировано 74 экземпляра рыб, принадлежащих 4 видам рыб и половозрелый рак (см. табл. 1). Предполагаемый возраст: окунь 1+–3+, щука – 0+, карп *Cyprinus carpio* – 1+, верховка – 0+–1+. Экспертная оценка численности и биомассы: участок № 1 (10 м²) – 2,2 экз./м² и 55 г/м²; участок № 2 (10 м²) – 0,6 экз./м² и 28 г/м²; участок № 3 (10 м²) – 0 экз./м²; участок № 4 (10 м²) – 0,6 экз./м² и 50 г/м²; участок № 5 (20 м²) – 2,0 экз./м² и 0,9 г/м²; средние показатели по водоему в табл. 1.

Торфяной карьер. Расположен в лесной зоне, имеет форму эллипса, с высоким островком в средней части, площадь около 3 га. Мелководный водоем, с водой желтоватого оттенка, прозрачностью 0,7 м; с заболоченным, закоряженным прибрежьем и упавшими в воду деревьями на островке. Недоступный для неводного облова.

Сачком выловлено 5 экземпляров ротана в возрасте 0+, 2+, 3+, длиной 2,2–12,5 см. Работа камерой осуществлялась на участках противоположных берегов и с островка. Зафиксирован 71 экземпляр молоди ротана, два экземпляра в возрасте 2+–3+ и на мелководье в самом прибрежье за кочкой один огромный представитель данного вида. Голова ротана составляла около 40 % от туловища, приблизительная длина – до 30 см. Ранее мы имели только устную информацию о случаях поимки рыб такого размера в водоемах региона.

Молодь ротана «висит» неподвижно в толще воды и хорошо идентифицируется по плавникам. Экспертная оценка численности и биомассы: участок № 1 (6 м²) – 2,2 экз./м² и 50 г/м²; участок № 2 (5 м²) – 6,0 экз./м² и 11 г/м²; участок № 3 (15 м²) – 2,1 экз./м² и 4 г/м²; средние показатели по водоему в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспозиции подводной видеокамерой на различных водных объектах Пензенской области

Виды рыб	Встречаемость, экз.				
	Озеро Сандерка	Пруд Лесной	Торфяной карьер	Река Старая Сура	Река Сура
Лещ	–	–	–	3	–
Белоглазка	1	–	–	–	–
Щука	1	1	–	–	–
Плотва	72	–	–	115	52
Красноперка	3	–	–	–	–
Окунь	7	31	–	32	–
Верховка	18	40	–	–	–
Ротан	–	–	74	–	–
Карп, сазан	–	2	–	–	3
Судак	–	–	–	–	4
Жерех	–	–	–	–	4
Язь	–	–	–	–	2
Подуст	–	–	–	–	3
Елец	–	–	–	–	13
Уклейка	–	–	–	–	5
Голавль	–	–	–	1	–
Всего, экз.	102	74	74	151	86
Площадь, м ²	30	60	26	55	50
Численность, экз./м ²	3,4	1,2	2,9	2,7	1,7
Биомасса, г/м ²	72	22	16	44	119

Река Старая Сура (участок в г. Пенза). Ширина на участках № 1 и 2 (район пешеходного мостика) – 10 м с широкой полосой прибрежной водной растительности. Глубины 1–2 м, прозрачность – 1,2 м, течение – 0,2 м/с. На участке № 3, напоминающим залив, ширина до 20 м, прозрачность – 1,2 м, течение – 0,1 м/с. Проведение неводного лова на первых двух участках невозможно.

Подводной камерой зафиксирован 151 экземпляр рыб. Предполагаемый возраст: окунь 1+–3+, плотва – 1+–3+, лещ – 4+–5+, голавль – 3+. Экспертная оценка численности и биомассы: участок № 1 (35 м²) – 2,1 экз./м² и 43 г/м²; участок № 2 (10 м²) – 6,0 экз./м² и 77 г/м²; участок № 3 (10 м²) – 1,5 экз./м² и 12 г/м²; средние показатели по участку реки в табл. 1.

Река Сура (район оз. Сандерка). Ширина – 75 м, на участках № 1 и 2 левый высокий обрывистый берег и свал глубин более 1 м. Течение из-за поворота реки и перепада глубин сильное, образующее завихрения, прозрачность – 1,1 м, неводной лов невозможен. На участке № 3 левый берег реки низкий песчаный, река мелководна с небольшими корягами в русле, течение – 0,7–0,8 м/с, прозрачность более 1 м.

Ставными сетями за сутки выловлено 4 экземпляра рыб – сазан, карась серебряный *Carassius auratus gibelio*. При работе камерой зафиксировано 86 экземпляров рыб (см. табл. 1). Предполагаемый возраст: плотва – 2+–3+, сазан – 4+–5+, судак – 2+–3+, жерех 2+–3+, язь – 3+–4+, подуст *Chondrostoma variable* – 2+–3+, елец *Leuciscus leuciscus* – 3+–4+, уклейка – 2+–3+. Экспертная оценка численности и биомассы: участок № 1 (10 м²) – 6,2 экз./м² и 369 г/м²; участок № 2 (10 м²) – 2,1 экз./м² и 222 г/м²; участок № 3 (30 м²) – 0,1 экз./м² и 2 г/м²; средние показатели по участку реки в табл. 1.

Достаточно равномерное распределение молоди (ротана) по акватории наблюдалось лишь в торфяном карьере, распределение рыб в других водных объектах, особенно в реках, носило мозаичный характер. Наибольшие показатели встречаемости рыб отмечены в достаточно эвтрофированном оз. Сандерка с широким видовым составом ихтиофауны и большим количеством рыб младших возрастов (рис. 1). Значительная численность рыб в торфяном карьере обусловлена большим процентом молоди. По главному показателю – ихтиомассе водного объекта благодаря наличию крупных рыб – преобладает участок р. Сура (рис. 2). Выше отмечалась сложность идентификации сеголеток карповых рыб, однако, учитывая их мизерный вклад в общую биомассу рыб по водным объектам, можно данный недостаток отнести к незначительным погрешностям использования метода.

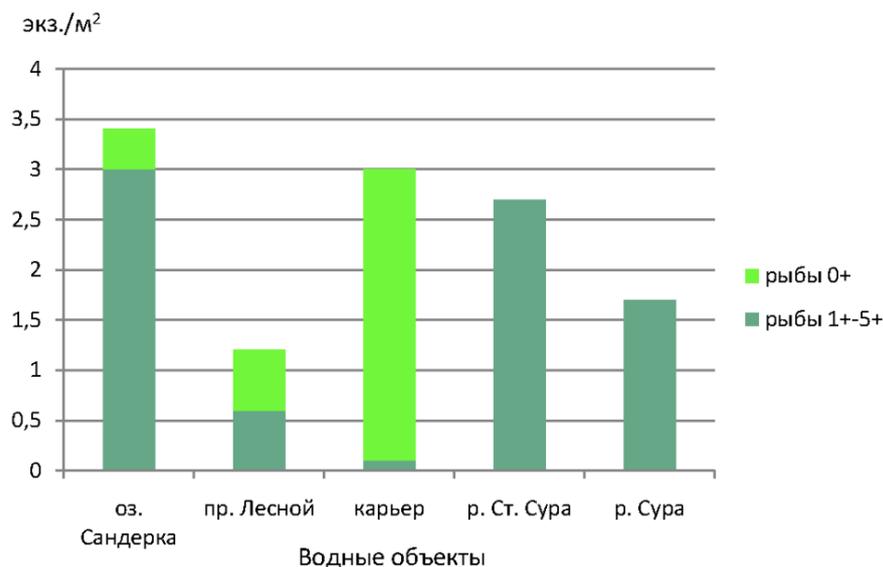


Рис. 1. Концентрация молоди (0+) и рыб старших возрастов по результатам съемки подводной видеокамерой

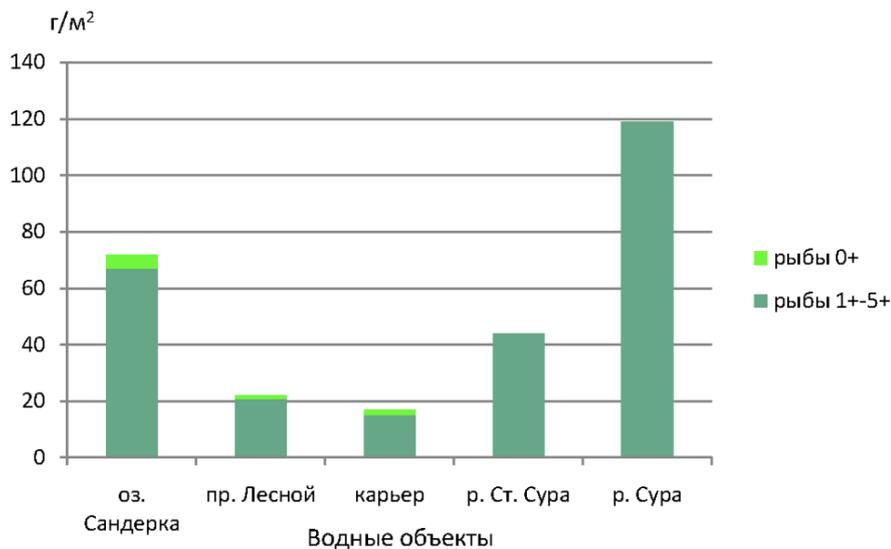


Рис. 2. Ихтиомасса молоди рыб (0+) и рыб старших возрастов по результатам съемки подводной видеокамерой

Сравнивая приведенные результаты с данными, полученными другими методами учета в малых водных объектах, можно отметить, что данные по пруду Лесной соответствуют ихтиомассе небольших водоемов комплексного назначения в Пензенской области и, например, водоемов Верхней Оки [14, 17]. Биомасса рыб торфяного карьера соответствует таковым из литературных источников [18–19]. Ихтиомасса рассмотренных участков рек является очень высокой для водотоков региона [8–9]. Это обусловлено как выбором участка, благоприятного для локации рыб в русле реки, в том числе крупных особей, так и большей достоверностью метода. Отмечено, что в отличие от лова с берега, стационарных объектов, плавсредств, при заходе оператора с камерой в воду рыба уходит на безопасное, недостижимое для камеры расстояние, т.е. при использовании неводов с заходом в воду, особенно на участках рек, рыба также выходит из зоны облова, и применяемые коэффициенты уловистости для особей старше одного года занижены. Поэтому при использовании подводной видеокамеры, очевидно, показатели ихтиомассы водотоков и водоемов возрастут за счет лучшего учета крупных рыб.

При постоянной работе с подводной видеокамерой возникает «побочный» эффект. Работая с отснятым материалом, отмечаешь высокий статус социального поведения рыб [20] и, учитывая низкую численность рыб в малых водных объектах средней полосы России, в максимальной степени минимизируешь практический отлов рыб на биоанализ (рис. 3, 4). Подобное характерно и для рыболовов-любителей, часто использующих подводную видеокамеру, которые в итоге становятся приверженцами «трофейной» рыбалки с принципом «поймал-отпусти».

Востребованность в данных по численности рыб в малых водных объектах находится на уровне экспертной оценки, что соответствует их низкой рыбопродуктивности и общим крайне ограниченными запасами биоресурсов. Поэтому проведение в каждом из них масштабных исследований с выявлением круглогодичной динамики воздействия внешних условий, миграционных

процессов гидробионтов нерационально, нерентабельно и в связи с этим никогда не практиковалось. Основные хозяйственные работы проводятся в межень после двухмесячного запретного нерестового периода, также и исследования на малых водных объектах проводились в данный период, когда рыба распределялась по присущим ей биотопам. Данные камеры изначально предназначались для зимней рыбалки на крупных водных объектах, и способ оценки численности применим в зимний период в случае специальной программы исследований. Однако на практике его использование, как и остальных методов, рационально в меженный период. Таким образом, данный способ учета является как альтернативой, так и дополнением практикуемых традиционных методов экспертного учета численности рыб в малых водных объектах средней полосы России.

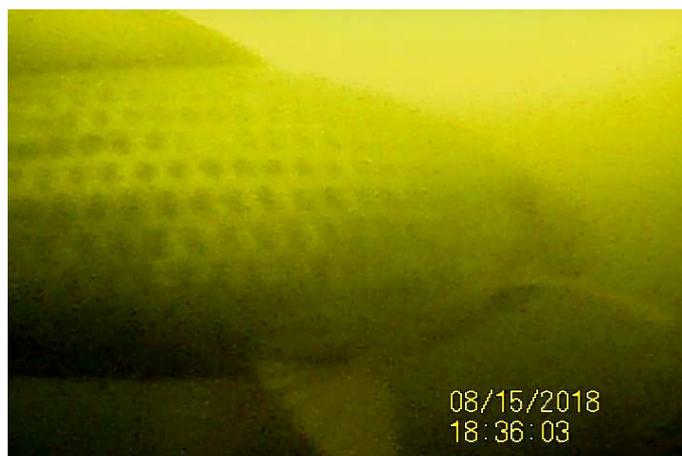


Рис. 3. Сазан, р. Сура



Рис. 4. Окунь, пруд Лесной

Заключение

Исследователи наземных животных активно практикуют методы видеонаблюдения и получают сенсационные результаты. Очевидно, и в области учета численности рыб в малых водных объектах средней полосы России

пришло время использования подводных видеокамер. С учетом доступности способа, рентабельности и эффективности при изучении водных биоресурсов активизируются исследования малых водных объектов и их рыбного населения. Соответственно, значительно расширится количество обследованных объектов с уточнением видового состава ихтиофауны, ее численности и ихтиомассы, с интересными находками и открытиями, что позволит эффективнее работать по сохранению и восстановлению видового разнообразия, недопущению подрыва запасов водных обитателей в результате любительского рыболовства и негативного воздействия, формированию бережного отношения к экосистеме малых водных объектов. А комплексные исследования в сочетании с другими методами помогут получить исчерпывающие сведения по состоянию водных биоресурсов малых водоемов и водотоков.

Список литературы

1. Журавлев В. Б. Методы ихтиологических исследований на малых водоемах. Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2014. 184 с.
2. Руденко Г. П. Методика определения численности рыб, ихтиомассы и рыбопродукции в малых озерах, обработанных ихтиоцидом // Типовые методики исследования продуктивности видов рыб в пределах их ареалов. Вильнюс, 1976. Ч. 2. С. 15–24.
3. Павлов Д. С., Нездолий В. К., Ходоревская Р. П. [и др.]. Покатная миграция молоди рыб в реках Волга и Или. М. : Наука, 1981. 320 с.
4. Павлов Д. С., Мочек А. Д., Борисенко Э. С. [и др.]. Гидроакустические исследования рыбного населения пойменных водоемов (в бассейне нижнего Иртыша) // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера : материалы XXVIII Междунар. конф. (г. Петрозаводск, 5–8 октября 2009 г.). Петрозаводск, 2009. С. 399–404.
5. Сечин Ю. Т. Биоресурсные исследования на внутренних водоемах. Калуга : Эйдос, 2010. 204 с.
6. Ильин В. Ю., Левин Б. А., Янкин А. В. Предварительные данные по ихтиофауне Пензенской области // Охрана биологического разнообразия и развитие охотничьего хозяйства России : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Пенза : РИО ПГСХА, 2005. С. 42–44.
7. Асанов А. Ю. Особенности воспроизводства молоди промысловых рыб малых рек регионов Приволжья // Вопросы рыболовства. 2016. Т. 17, № 2. С. 223–233.
8. Асанов А. Ю. Рыбохозяйственное значение малой реки Труев Приволжья после расчистки русла // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21, № 1. С. 20–30.
9. Асанов А. Ю., Носов В. А. Водные биологические ресурсы Республики Мордовия: Река Сура // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство. 2020. № 4. С. 68–78.
10. Патент 2734263 Российская Федерация, МПК А-01К. Способ оценки численности рыб в малых водных объектах средней полосы России с использованием подводной видеокамеры / Асанов А. Ю. ; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный аграрный университет. № 2019117137 ; заявл. 03.06.2019 ; опубл. 14.10.2020, Бюл. № 29. 8 с.
11. Лысенков Е. В., Гришаков В. В., Пьянов М. В. [и др.]. Рыболовство в Республике Мордовия с древнейших времен и до наших дней / под ред. Е. В. Лысенкова. 2-е изд. Саранск : ЭМ-ПРИНТ, 2020. 144 с.
12. Ручин А. Б., Артаев О. Н., Клевакин А. А. [и др.]. Рыбное население бассейна реки Суры: видовое разнообразие, популяции, распределение, охрана : монография. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2016. 272 с.

13. Асанов А. Ю., Осипов В. В. Размерный состав молоди рыб в рыбохозяйственных водоемах Республики Мордовия // Сурский вестник. 2020. № 2. С. 10–15.
14. Быков А. Д. К вопросу использования водоемов комплексного назначения в бассейне Верхней Оки для целей аквакультуры // Вопросы рыболовства. 2019. Т. 20, № 1. С. 83–92.
15. Асанов А. Ю., Иванов А. И. Ихтиофауна пойменных озер долины реки Суры в пределах Пензенской области на примере озера Печарка // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2020. № 3. С. 68–78.
16. Мальцев В. И., Алексеев А. Н. Оценка состояния прибрежного ихтиокомплекса заповедной акватории при помощи подводного автономного видеорегистрирующего устройства // Труды Карадагской научной станции имени Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2016. Вып. 2. С. 44–51.
17. Богданов Н. И., Асанов А. Ю. Прудовое рыбоводство. 4-е изд. М. : Перо, 2019. 89 с.
18. Власов А. В., Мустаев С. Б. Разведение пресноводных рыб и раков. М. : АСТ : Астрель : Транзиткнига, 2004. 256 с.
19. Козлов А. В. Экологическая оценка биопродуктивности малых водоемов для создания фермерских хозяйств. Калуга : Эйдос, 2010. 148 с.
20. Михеев В. Н., Афонина М. О., Павлов Д. С. Неоднородность среды и поведение рыб: элементы неоднородности как ресурс и как источник информации // Вопросы ихтиологии. 2010. Т. 50, № 3. С. 378–387.

References

1. Zhuravlev V.B. *Metody ikhtiologicheskikh issledovaniy na malykh vodoemakh = Methods of ichthyological research in small water bodies*. Barnaul: Izd-vo AltGU, 2014:184. (In Russ.)
2. Rudenko G.P. Method for determining the number of fish, ichthyomass and fish products in small lakes treated with ichthyocide. *Tipovye metodiki issledovaniya produktivnosti vidov ryb v predelakh ikh arealov = Typical methods for studying the productivity of fish species within their ranges*. Vilnyus, 1976;2:15–24. (In Russ.)
3. Pavlov D.S., Nezdoliy V.K., Khodorevskaya R.P. [et al.]. *Pokatnaya migratsiya molodi ryb v rekakh Volga i Ili = Downstream migration of juvenile fish in the Volga and Ili rivers*. Moscow: Nauka, 1981:320. (In Russ.)
4. Pavlov D.S., Mochev A.D., Borisenko E.S. [et al.]. Hydroacoustic studies of the fish population of floodplain water bodies (in lower Irtysh). *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Evropeyskogo Severa: materialy XXVIII Mezhdunar. konf. (g. Petrozavodsk, 5–8 oktyabrya 2009 g.) = Biological resources of the White Sea and inland water bodies of the European North: proceedings of the 28th International conference (Petrozavodsk, October 5–8, 2009)*. Petrozavodsk, 2009:399–404. (In Russ.)
5. Sechin Yu.T. *Bioresursnye issledovaniya na vnutrennikh vodoemakh = Bioresource research in inland waters*. Kaluga: Eydos, 2010:204. (In Russ.)
6. Il'in V.Yu., Levin B.A., Yankin A.V. Preliminary data on the fish fauna of the Penza region. *Okhrana biologicheskogo raznoobraziya i razvitie okhotnich'ego khozyaystva Rossii: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. = Protection of biological diversity and development of the hunting economy in Russia: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. Penza: RIO PGSKhA, 2005:42–44. (In Russ.)
7. Asanov A.Yu. Features of the reproduction of young commercial fish in small rivers in the Volga region. *Voprosy rybolovstva = Fishing issues*. 2016;17(2):223–233. (In Russ.)
8. Asanov A.Yu. Fishery significance of the small river Truev of the Volga region after clearing the channel. *Voprosy rybolovstva = Fishing issues*. 2020;21(1):20–30. (In Russ.)
9. Asanov A.Yu., Nosov V.A. Aquatic biological resources of the Republic of Mordovia: Sura River. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*.

- Ser.: Rybnoe khozyaystvo = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fishery.* 2020;(4):68–78. (In Russ.)
10. Patent 2734263 Russian Federation, MPK A-01K. *Sposob otsenki chislennosti ryb v malykh vodnykh ob'ektakh sredney polosy Rossii s ispol'zovaniem podvodnoy videokamery = A method for assessing the number of fish in small water bodies of central Russia using an underwater video camera.* Asanov A.Yu.; applicant and patentee Penza State Agrarian University. № 2019117137; appl. 03.06.2019; publ. 14.10.2020, bull. № 29:8. (In Russ.)
 11. Lysenkov E.V., Grishakov V.V., P'yanov M.V. [et al.]. *Rybolovstvo v Respublike Mordoviya s drevneyshikh vremen i do nashikh dney = Fishing in the Republic of Mordovia from ancient times to the present day.* 2nd ed. Saransk: EM-PRINT, 2020:144. (In Russ.)
 12. Ruchin A.B., Artaev O.N., Klevakin A.A. [et al.]. *Rybnoe naselenie basseyna reki Sura: vidovoe raznoobrazie, populyatsii, raspredelenie, okhrana: monografiya = Fish population of the Sura river basin: species diversity, populations, distribution, protection: monograph.* Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2016:272. (In Russ.)
 13. Asanov A.Yu., Osipov V.V. Size composition of juvenile fish in fishery reservoirs of the Republic of Mordovia. *Surskiy vestnik = Sursky bulletin.* 2020;(2):10–15. (In Russ.)
 14. Bykov A.D. On the issue of using water bodies of complex purpose in the Upper Oka basin for aquaculture purposes. *Voprosy rybolovstva = Fishing issues.* 2019;20(1): 83–92. (In Russ.)
 15. Asanov A.Yu., Ivanov A.I. Ichthyofauna of floodplain lakes in the Sura river valley within the Penza region on the example of Lake Pechaka. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2020;(3):68–78. (In Russ.)
 16. Mal'tsev V.I., Alekseev A.N. Assessment of the state of the coastal ichthyological complex of the reserved water area using an underwater autonomous video recording device. *Trudy Karadagskoy nauchnoy stantsii imeni T.I. Vyazemskogo – prirodnogo zapovednika RAN = Proceedings of the T.I. Vyazemsky – Natural Reserve of the Russian Academy of Sciences.* 2016;(2):44–51. (In Russ.)
 17. Bogdanov N.I., Asanov A.Yu. *Prudovoe rybovodstvo = Pond fish farming.* 4th ed. Moscow: Pero, 2019:89. (In Russ.)
 18. Vlasov A.V., Mustaev S.B. *Razvedenie presnovodnykh ryb i rakov = Breeding freshwater fish and crayfish.* Moscow: AST: Astrel': Tranzitkniga, 2004:256. (In Russ.)
 19. Kozlov A.V. *Ekologicheskaya otsenka bioproduktivnosti malykh vodoemov dlya sozdaniya fermerskikh khozyaystv = Ecological assessment of the bioproductivity of small water bodies for the creation of farms.* Kaluga: Eydos, 2010:148. (In Russ.)
 20. Mikhhev V.N., Afonina M.O., Pavlov D.S. Environmental heterogeneity and fish behavior: elements of heterogeneity as a resource and as a source of information. *Voprosy ikhtologii = Ichthyology issues.* 2010;50(3):378–387. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алик Юсупович Асанов

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Приволжский научный центр аквакультуры и водных биоресурсов, Пензенский государственный аграрный университет (Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30)

Alik Yu. Asanov

Candidate of biological sciences, senior researcher, Volga Research Center of Aquaculture and Aquatic Bioresources, Penza State Agricultural University (30 Botanicheskaya street, Penza, Russia)

E-mail: kfvniro-as@list.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.06.2021

Принята к публикации / Accepted 05.07.2021

УДК 581.1

doi:10.21685/2307-9150-2021-3-9

Оценка фиторемедиационного потенциала сельскохозяйственных растений при нефтяном загрязнении почвы

Ю. М. Сотникова¹, В. В. Федяев², А. С. Григориади³, М. И. Гарипова⁴,
А. Р. Махмутов⁵, И. Р. Галин⁶, Е. И. Новоселова⁷, А. А. Ямалеева⁸,
Р. Г. Фархутдинов⁹

^{1,2,3,4,7,8,9}Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

⁵Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск, Россия

^{6,2}Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского
центра Российской академии наук, Уфа, Россия

¹sotnikova-bashedu@mail.ru, ²vadim.fedyayev@gmail.com, ³nyshal11@yandex.ru,

⁴margaritag@list.ru, ⁵ainurmax@mail.ru, ⁶ilshat.rafkatovitch@gmail.com,

⁷novoselova58@mail.ru, ^{8,9}frg2@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На сегодняшний день одним из актуальных и перспективных методов очистки и восстановления нефтезагрязненных земель является фиторемедиация. Преимущество данного метода заключается в экологической безопасности и минимизации финансовых затрат на проведение экологических мероприятий. Растения обладают способностью аккумулировать органические загрязнители и увеличивать биологическую активность почвы. Имеется множество исследований, посвященных оценке ремедиационных свойств растений, способных произрастать при разном уровне нефтяного загрязнения почв. Однако не существует единого мнения о выборе растительных объектов для очистки определенных типов земель от поллютантов сопутствующим нефтяному загрязнению (углеводороды, тяжелые металлы и др.). Целью данной работы явилась оценка фиторемедиационного потенциала некоторых сельскохозяйственных растений при нефтяном загрязнении серой лесной почвы. *Материалы и методы.* Растения семейства Злаковые (*Poaceae*) и семейства Бобовые (*Fabaceae*) высаживали в почву, загрязненную нефтью в концентрациях 1, 3, 4, 6 и 8 %. Определяли фитотоксичность загрязненной почвы, валовое содержание тяжелых металлов, проводили оценку устойчивости растений к условиям длительного нефтяного загрязнения, рассчитывали коэффициент аккумуляции тяжелых металлов. *Результаты.* Наиболее высокая всхожесть семян растений и рост проростков были установлены у люцерны посевной и ржи посевной при загрязнении почвы нефтью в концентрации 4 %. Люцерна посевная обладает меньшей по сравнению с рожью посевной способностью к фитоэкстракции тяжелых металлов, однако лучше поглощает мышьяк. *Выводы.* Люцерна посевная и рожь посевная могут быть рекомендованы к возделыванию поочередно или в травосмеси для фитоэкстракции земель, подвергнутых нефтяному загрязнению.

Ключевые слова: рожь посевная, люцерна посевная, фиторемедиация, фитотоксичность, нефтяное загрязнение, тяжелые металлы

Для цитирования: Сотникова Ю. М., Федяев В. В., Григориади А. С., Гарипова М. И., Махмутов А. Р., Галин И. Р., Новоселова Е. И., Ямалеева А. А., Фархутдинов Р. Г. Оценка фиторемедиационного потенциала сельскохозяйственных растений при нефтяном загрязнении почвы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 3. С. 99–109. doi:10.21685/2307-9150-2021-3-9

© Сотникова Ю. М., Федяев В. В., Григориади А. С., Гарипова М. И., Махмутов А. Р., Галин И. Р., Новоселова Е. И., Ямалеева А. А., Фархутдинов Р. Г., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Assessment of the agricultural plants' phytoremediation potential under oil pollution of the soil

Yu.M. Sotnikova¹, V.V. Fedyaev², A.S. Grigoriadi³, M.I. Garipova⁴,
A.R. Makhmutov⁵, I.R. Galin⁶, E.I. Novoselova⁷, A.A. Yamaleeva⁸,
R.G. Farkhutdinov⁹

^{1,2,3,4,7,8,9}Bashkir State University, Ufa, Russia

⁵Birsk branch of Bashkir State University, Birsk, Russia

^{6,2}Ufa Biological Institute, Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

¹sotnikova-bashedu@mail.ru, ²vadim.fedyaev@gmail.com, ³nysshal11@yandex.ru,

⁴margaritag@list.ru, ⁵ainurmax@mail.ru, ⁶ilshat.rafkatovitch@gmail.com,

⁷novoselova58@mail.ru, ^{8,9}frg2@mail.ru

Abstract. *Background.* Nowadays phytoremediation is one of the most relevant and promising methods of cleaning and restoring oil-contaminated lands. The advantage of this method is environmental safety and minimization of financial costs. Plants have the ability to accumulate and metabolize organic pollutants and increase the biological activity of the soil. There are many studies devoted to assessing the remediation properties of plants growing on various types of oil-contaminated soils. However, there is no consensus on the choice of plant objects for cleaning land from organic pollutants. In this regard, the purpose of this work was to assess the phytoremediation potential of agricultural plants with oil pollution of the soil. *Materials and methods.* Plants of the Poaceae family and the Legume family (Fabaceae) were planted in soil contaminated with oil at concentrations of 1, 3, 4, 6, and 8 %. The phytotoxicity of the contaminated soil, the total content of heavy metals were determined, the resistance of plants to the conditions of long-term oil pollution was assessed, and the accumulation coefficient of heavy metals was calculated. *Results.* Relatively stable germination of plant seeds and growth of seedlings were established in alfalfa and rye when the soil was contaminated with oil at a concentration of 4 %. Alfalfa sowing has a lower capacity for phytoextraction of heavy metals in comparison with sowing rye, but it absorbs arsenic better. *Conclusions.* Sowing alfalfa and sowing rye can be recommended for cultivation alternately or in a grass mixture for phytoextraction of lands exposed to oil pollution.

Keywords: sowing rye, sowing alfalfa, phytoremediation, phytotoxicity, oil pollution, heavy metals

For citation: Sotnikova Yu.M., Fedyaev V.V., Grigoriadi A.S., Garipova M.I., Makhmutov A.R., Galin I.R., Novoselova E.I., Yamaleeva A.A., Farkhutdinov R.G. Assessment of the agricultural plants' phytoremediation potential under oil pollution of the soil. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennyye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2021;(3):99–109. (In Russ.). doi:10.21685/2307-9150-2021-3-9

Введение

Для эффективной фиторемедиации почв, загрязненных нефтепродуктами, необходимо использовать растения, районированные на данной территории и обладающие высокой адаптивной устойчивостью [1]. Растения-фиторемедианты должны проявлять высокую скорость накопления биомассы, быть способными поглощать и накапливать тяжелые металлы и другие ксенобиотики, а также активизировать деятельность почвенных микроорганизмов [2–4]. В настоящее время установлено несколько сотен видов-гипераккумуляторов различных загрязнителей, показана эффективность их использования

для восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) [5]. Продолжаются поиски видов растений, пригодных для целей фиторемедиации, предполагающей извлечение тяжелых металлов из загрязненных почв корневой системой растений с последующим их переносом и аккумуляцией в наземной части растений [6, 7]. Достижение высокой эффективности фиторемедиации возможно при высеве районированных сельскохозяйственных растений и изучении металл-аккумулирующей способности этих растений путем определения коэффициента переноса металлов в системе «почва-корни-надземная часть растений» [7–9]. Целью данной работы было сравнение растений, способных произрастать на почвах, подвергнутых нефтяному загрязнению и эффективно экстрагировать тяжелые металлы, поступающие в почву из нефти.

Материалы и методы

Объектами исследования были растения семейства Злаковые (*Poaceae*) (рожь посевная (*Secale cereale* L.) сорт «Татьяна», ячмень яровой (*Hordeum distichum* L.) сорт «Новичок», сорго суданское (*Sorghum drummondii*) сорт «Чишминская ранняя») и семейства Бобовые (*Fabaceae*) (люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) сорт «Надежда», клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) сорт «Трио», донник желтый (*Melilotus officinalis* L.) сорт «Альшеевский», вика посевная (*Vicia sativa* L.) сорт «Валентина»).

Лабораторные модельные опыты проводили на серых лесных почвах, которые были отобраны для исследований в северо-восточной части Уфимского района Республики Башкортостан. Пробы почв отбирали согласно требованиям, описанным в ГОСТ 17.4.4.02–2017¹. Почву измельчали, просеивали через сито 3 мм, после чего в ней определяли агрохимические и агроэкологические показатели: рН солевой вытяжки – потенциометрическим методом – ГОСТ 26483–85²; гумус по методу Тюрина – ГОСТ 26213–91³. В месте отбора проб почвы гумусовый горизонт серого цвета, мощностью 25–30 см, содержание гумуса 4–5 %, реакция слабо-кислая (рН 5,0–6,0).

Для определения показателя «фитотоксичность» в чашки Петри насыпали по 100 г почвы, затем вносили нефть в концентрациях 1, 3, 4, 6 и 8 % от сухой массы почвы и тщательно перемешивали. В качестве контроля использовали незагрязненную почву. Через 3 сут в почву вносили семена исследуемых растений в соответствии с нормами высева для каждой культуры [10]. Оценку результатов проводили через 7 сут. Отмечали количество проросших семян в опытном и контрольном варианте. Измеряли длину и массу корней и наземной части растений, вычисляли процент всхожести семян.

Оценку устойчивости растений к условиям длительного нефтяного загрязнения (через 30 сут) проводили, выращивая растения в сосудах объемом 0,5 л при 12-часовом светом периоде, интенсивности освещения 30 клк и

¹ ГОСТ 17.4.4.02–2017. ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М. : Стандартинформ, 2018. 12 с.

² ГОСТ 26483–85. Почвы определение рН солевой вытяжки, обменной кислотности, обменных катионов, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. М. : Изд-во стандартов, 1985. 6 с.

³ ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. М. : Изд-во стандартов, 1992. 8 с.

температуре воздуха 22–25 °С. В сосуды с почвой вносили товарную нефть в концентрациях 1, 3, 4, 6 и 8 % от сухой массы почвы. Почву увлажняли до 60 % влагоемкости и поддерживали ее на протяжении всего периода выращивания. Через 3 сут в почву вносили семена исследуемых растений в соответствии с рекомендациями для каждой культуры [10], а также с учетом требований ГОСТ Р ИСО 18769–2019¹ и ГОСТ Р ИСО 22030–2009². В контрольном варианте эксперимента растения выращивали без внесения нефти.

Для определения валового содержания тяжелых металлов в почве до и после внесения нефти использовали атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией КВАНТ-З.ЭТА по методике Хавезова и Цалева (1983) [11]. Валовое содержание мышьяка в образцах определяли по ГОСТ Р 51766–2001³. В высушенных и размолотых растительных образцах определяли содержание ТМ атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30178–96⁴.

Рассчитывали коэффициент накопления (КН) ТМ как отношение их содержания в воздушно-сухой массе растения и почве [8].

Все эксперименты проводили в 4-кратной биологической, а измерения в 3–6-кратной аналитической повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0, рассчитывали средние значения, стандартные отклонения и доверительный интервал при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Одним из определяющих параметров при выборе растений-фиторемедиантов является их устойчивость к действию поллютантов. Нами была проведена оценка способности семян к всхожести в условиях нефтяного загрязнения (табл. 1).

Таблица 1
Влияние уровня нефтяного загрязнения почвы на всхожесть (%) семян растений разных видов

Показатели	Рожь	Ячмень	Сорго	Люцерна	Клевер	Донник	Вика
Контроль	97 ± 1	90 ± 1	90 ± 1	96 ± 2	93 ± 1	93 ± 1	86 ± 7
Нефть 1 %	95 ± 1*	84 ± 2*	81 ± 2*	88 ± 1*	84 ± 3*	82 ± 1*	82 ± 8*
Нефть 3 %	84 ± 3*	61 ± 2	57 ± 5	82 ± 1*	74 ± 3	71 ± 4	68 ± 8
Нефть 4 %	73 ± 3*	39 ± 4	29 ± 7	78 ± 4*	67 ± 3	57 ± 6	29 ± 8
Нефть 6 %	33 ± 4	19 ± 1	20 ± 1	62 ± 3	60 ± 6	34 ± 4	16 ± 1
Нефть 8 %	31 ± 4	14 ± 5	17 ± 4	53 ± 4	51 ± 4	14 ± 1	11 ± 1

Примечание. Представлены средние значения и их стандартные ошибки; * – значения достоверны при $p \leq 0,05$.

¹ ГОСТ Р ИСО 18763–2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. М. : Стандартинформ, 2019. 23 с.

² ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. М. : Стандартинформ, 2010. 20 с.

³ ГОСТ Р 51766–2001. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения мышьяка. М. : Стандартинформ, 2011. 12 с.

⁴ ГОСТ 30178–96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М. : Стандартинформ, 2010. 10 с.

Всхожесть семян на незагрязненной почве у люцерны, клевера, донника превышала 90 %, а у вики была ниже 90 %. У вики также наблюдалась большая вариативность значений показателя всхожести между повторностями (табл. 1).

При концентрации нефти в почве 1 % не наблюдалось значительного снижения всхожести семян у всех растений, по сравнению с контрольным вариантом. При повышении концентрации нефти в почве до 3 и 4 % было установлено токсическое ее действие на появление проростков – ячменя, сорго, клевера, донника. Данные концентрации нефти не оказывали значительного фитотоксического эффекта на всхожесть семян ржи и люцерны. Повышение концентрации нефти в почве 6 и 8 % привело к резкому снижению всхожести семян у всех исследуемых видов растений. Таким образом, при содержании нефти в почве в концентрации до 4 % для проведения фиторемедиационных работ наиболее подходящими для проращивания оказались семена люцерны и ржи.

Оценка устойчивости растений к условиям длительного нефтяного загрязнения на растения семейства Бобовые показала, что при содержании в почве 1 % нефти ростовые показатели практически не отличались от контрольных значений, но при повышении концентрации нефти в почве средняя длина проростков уменьшалась (табл. 2). Так, при концентрации нефти 8 % средняя длина побегов люцерны была меньше контрольного варианта почти в 2,0 раза, у клевера в 2,9 раза, у донника – в 4,5 раза, у вики – в 6,6 раза. Растения люцерны при росте на почве, содержащей 4 % нефти, уменьшили скорость ростовых процессов в меньшей степени по сравнению с другими растениями. Так, длина побега люцерны была меньше на 16 % по сравнению со значением контроля, тогда как у других растений на 23–61 %. Рост корней также снижался: в наименьшей степени у люцерны (на 28 %) и более значительно у остальных культур (клевер, донник, вика) соответственно на 40, 30 и 60 % (табл. 2).

При анализе данных ростовых показателей у растений семейства Злаковые было выявлено, что, начиная с концентрации 1 % нефти в почве, наблюдалось значительное снижение длины побегов в сравнении с контролем. Длина побега ржи была меньше по сравнению с контрольным образцом на 25 %, ячменя – на 8 %, сорго – на 31 %. При увеличении концентрации нефти в почве до 4 % происходило дальнейшее подавление ростовых процессов побега – у ржи на 46 %, ячменя на 64 % и сорго на 53 %. Длина корней Злаковых при 4 % концентрации нефти в почве была меньше на – 31, 43 и 31 % соответственно (табл. 2).

Таким образом, при содержании нефти в почве в концентрации до 4 % для проведения фиторемедиационных работ можно использовать растения люцерны посевной и ржи посевной.

Выявленное в экспериментальных образцах серой лесной почвы значение природного валового содержания ТМ соответствовало данным многолетних исследований почв Башкирии [12]. Внесение в почву нефти в концентрации 4 % привело к повышению содержания ТМ в почве (табл. 3). Причем достоверно увеличилось содержание Cu (+16 %), Zn (+17 %) и As (+176 %). Из литературы известно, что основным сопутствующим нефтяному загрязнению токсическим агентом является мышьяк [13]. Показатели по уровню загрязнения ТМ и мышьяком используемых образцов почвы находятся в пределах ориентировочно допустимых концентраций (ОДК).

Таблица 2

Влияние нефтяного загрязнения почвы на длину побега (П) и корня (К) растений разных видов, см

Показатели	Рожь	Ячмень	Сорго	Люцерна	Клевер	Донник	Вика
Контроль	П	5,2 ± 0,02	4,1 ± 0,03	3,6 ± 0,02	3,2 ± 0,02	2,7 ± 0,03	2,3 ± 0,04
	К	3,3 ± 0,01	2,8 ± 0,02	2,6 ± 0,04	3,5 ± 0,01	3,7 ± 0,01	2,3 ± 0,02
Нефть 1 %	П	3,9 ± 0,02*	3,8 ± 0,03*	2,8 ± 0,03	3,1 ± 0,04*	2,6 ± 0,03*	2,0 ± 0,02*
	К	2,8 ± 0,02*	2,7 ± 0,03*	2,1 ± 0,02*	3,1 ± 0,04*	3,1 ± 0,04*	2,0 ± 0,02*
Нефть 3 %	П	2,8 ± 0,02*	2,6 ± 0,03*	2,5 ± 0,03*	2,9 ± 0,04*	2,2 ± 0,02*	1,5 ± 0,02*
	К	2,6 ± 0,01*	2,1 ± 0,03	2,0 ± 0,02	2,7 ± 0,03*	2,7 ± 0,03	1,5 ± 0,02*
Нефть 4 %	П	2,4 ± 0,01*	1,9 ± 0,03	1,7 ± 0,01	2,7 ± 0,03*	2,1 ± 0,02	0,9 ± 0,01
	К	2,3 ± 0,01*	1,6 ± 0,02	1,8 ± 0,02	2,5 ± 0,03*	2,2 ± 0,02	1,1 ± 0,01
Нефть 6 %	П	1,6 ± 0,01	1,1 ± 0,01	1,2 ± 0,01	2,0 ± 0,02*	1,1 ± 0,01	0,5 ± 0,01
	К	2,1 ± 0,01	1,3 ± 0,02	1,6 ± 0,02	1,9 ± 0,01	2,0 ± 0,03	0,7 ± 0,01
Нефть 8 %	П	1,7 ± 0,01	1,1 ± 0,01	0,9 ± 0,01	1,7 ± 0,01	0,9 ± 0,01	0,3 ± 0,01
	К	1,6 ± 0,01	1,0 ± 0,01	1,3 ± 0,01	1,7 ± 0,01	1,5 ± 0,01	0,3 ± 0,01

Примечание. Представлены средние значения и их стандартные ошибки; * – значения достоверны при $p \leq 0,05$.

Установлена избирательная аккумуляция ТМ и мышьяка в надземной части у ржи и люцерны (табл. 3). После проведения расчетов коэффициента накопления было установлено, что наиболее активно накапливались в надземной части ржи свинец, медь и мышьяк, а у люцерны – медь и мышьяк. КН кадмия у обоих растений был одинаковым и меньше 10 % от установленного в нефтезагрязненных почвах. Аккумуляция цинка в надземной части у обоих растений не была установлена, что может свидетельствовать об их избирательности поглощения и транспорта в надземную часть ионов цинка (табл. 3).

Таблица 3

Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка
в почве и в надземной части растений, мг/кг

Показатели	Свинец	Кадмий	Медь	Цинк	Мышьяк
В почве до внесения нефти	11,22 ± 0,75	0,89 ± 0,05	29,45 ± 1,75	82,33 ± 7,15	3,02 ± 0,02
В почве после внесения 4 % нефти	11,79 ± 1,25	1,04 ± 0,15	34,22 ± 2,77	96,44 ± 8,95	8,36 ± 1,22
ОДК с учетом фона	130	2	132	220	10
Рожь НЧ	5,62 ± 0,06	0,1 ± 0,01	14,7 ± 1,21	0	2,32 ± 0,01
Рожь КН	0,47	0,09	0,42	0	0,27
Люцерна НЧ	1,89 ± 0,02	0,1 ± 0,01	11,34 ± 1,21	0	2,75 ± 0,01
Люцерна КН	0,16	0,09	0,33	0	0,33

Примечание. НЧ – надземная часть; ОДК – ориентировочно допустимые концентрации тяжелых металлов в почве [14]; КН – коэффициент накопления определяется как отношение содержания ТМ в растении/в почве [15].

Таким образом, по результатам нашего исследования люцерну посевную и рожь посевную можно рекомендовать к возделыванию поочередно или в травосмеси для фитоэкстракции земель, подвергнутых нефтяному загрязнению¹.

Список литературы

1. Панченко Л. В., Муратова А. Ю., Дубровская Е. В. [и др.]. Атлас растений-фиторемигрантов. Саратов : Научная книга, 2015. 560 с.
2. Башмаков Д. И., Лукаткин А. С. Аккумуляция тяжелых металлов некоторыми высшими растениями в разных условиях местообитания // Агрехимия. 2002. № 9. С. 66–71.
3. Тафеева Е. А., Иванов А. В., Титова А. А., Петров И. В. Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в почве на территории нефтедобывающих районов Республики Татарстан // Гигиена и санитария. 2016. № 10. С. 939–941. doi:http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-10-939-941

¹ ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 11 с.

4. Prabha J., Kumar M., Tripathi R. Opportunities and challenges of utilizing energy crops in phytoremediation of environmental pollutants // *Bioremediation for Environmental Sustainability*. Elsevier, 2021. P. 383–396.
5. Киреева Н. А., Кузяхметов Г. Г., Мифтахова А. М., Водопьянов В. В. Фитотоксичность антропогенно-загрязненных почв. Уфа : Гилем, 2003. 266 с.
6. Киреева Н. А., Григориади А. С., Водопьянов В. В., Амирова А. Р. Подбор растений для фиторемедиации почв, загрязненных нефтяными углеводородами // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, № 5. С. 184–187.
7. Trakal L., Martínez-Fernández D., Vítková M., Komárek M. Phytoextraction of Metals: Modeling Root Metal Uptake and Associated Processes // *Phytoremediation Management of Environmental Contaminants*. 2015. Vol. 1. P. 69–86.
8. Галиулин Р. В., Галиулин Р. А. Особенности фитоэкстракции тяжелых металлов из загрязненных почв // *Агрохимия*. 2010. № 11. С. 81–85.
9. Pinto A. P., Varennes A. de, Dias C. M. B., Lopes M. E. Microbial-Assisted Phytoremediation: A Convenient Use of Plant and Microbesto Clean Up Soils // *Phytoremediation Management of Environmental Contaminants*. 2020. Vol. 6. P. 21–91.
10. Фирсов И. П., Соловьев А. М., Трифонова М. Ф. Технология производства продукции растениеводства. М. : КолосС, 2006. 472 с.
11. Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ / пер. с болг. Г. А. Шейниной ; под ред. С. З. Яковлевой. Л. : Химия, 1983. 144 с.
12. Асылбаев И. Г., Хабиров И. К. Концентрация химических элементов в почвах и породах Республики Башкортостан // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2013. № 2. С. 11–16.
13. Бабаев Э. Р., Мовсумзаде Э. М. Фитоэкстракция тяжелых металлов из нефтезагрязненных почв Апшеронского полуострова // *Нефтегазохимия*. 2016. № 3. С. 27–30.
14. Патент 2231944 Российская Федерация. Способ биологической очистки почв / Башмаков Д. И., Лукаткин А. С. ; заявитель и патентообладатель Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. № 2002117549/12 ; заявл. 01.07.2002 ; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.
15. Патент 2582352 Российская Федерация. Способ биологической очистки почв / Красильников В. В., Серебренников Б. В., Поторопин Е. Б., Дымнич С. А. ; заявитель и правообладатель ФГБУ «33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт» Минобороны России. № 2014141425/13 ; заявл. 14.10.2014 ; опубл. 27.04.2016, Бюл. № 12.

References

1. Panchenko L.V., Muratova A.Yu., Dubrovskaya E.V. [et al.]. *Atlas rasteniy-fitoremediantov = Atlas of phytoremediation plants*. Saratov: Nauchnaya kniga, 2015:560. (In Russ.)
2. Bashmakov D.I., Lukatkin A.S. Accumulation of heavy metals by some higher plants in different habitat conditions. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2002;(9):66–71. (In Russ.)
3. Tafееva E.A., Ivanov A.V., Titova A.A., Petrov I.V. The content of heavy metals and oil products in the soil on the territory of the oil-producing regions of the Republic of Tatarstan. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2016;(10):939–941. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-10-939-941>
4. Prabha J., Kumar M., Tripathi R. Opportunities and challenges of utilizing energy crops in phytoremediation of environmental pollutants. *Bioremediation for Environmental Sustainability*. Elsevier, 2021:383–396.
5. Kireeva N.A., Kuzyakhmetov G.G., Miftakhova A.M., Vodop'yanov V.V. *Fitotoksichnost' antropogenno-zagryaznennykh pochv = Phytotoxicity of anthropogenically contaminated soils*. Ufa: Gilem, 2003:266. (In Russ.)

6. Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Vodop'yanov V.V., Amirova A.R. Selection of plants for phytoremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(5):184–187. (In Russ.)
7. Trakal L., Martínez-Fernández D., Vítková M., Komárek M. Phytoextraction of Metals: Modeling Root Metal Uptake and Associated Processes. *Phytoremediation Management of Environmental Contaminants*. 2015;1:69–86.
8. Galiulin R.V., Galiulin R.A. The features of phytoextraction of heavy metals from contaminated soils. *Agrokhiimiya = Agrochemistry*. 2010;(11):81–85. (In Russ.)
9. Pinto A.P., Varennes A. de, Dias C.M.B., Lopes M.E. Microbial-Assisted Phytoremediation: A Convenient Use of Plant and Microbesto Clean Up Soils. *Phytoremediation Management of Environmental Contaminants*. 2020;6:21–91.
10. Firsov I.P., Solov'ev A.M., Trifonova M.F. *Tekhnologiya proizvodstva produktsii raste-nievodstva = Crop production technology*. Moscow: KolosS, 2006:472. (In Russ.)
11. Khavezov I., Tsalev D. *Atomno-absorbtsionnyy analiz = Atomic absorption analysis*. Transl from. Bulgarian by G.A. Sheynina. Leningrad: Khimiya, 1983:144. (In Russ.)
12. Asylbaev I.G., Khabirov I.K. Concentration of chemical elements in soils and rocks of the Republic of Bashkortostan. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyay-stvennoy akademii = Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2013;(2): 11–16. (In Russ.)
13. Babaev E.R., Movsumzade E.M. Phytoextraction of heavy metals from oil-contami-nated soils of the Absheron Peninsula. *Neftegazokhiimiya = Petrochemicals*. 2016;(3): 27–30. (In Russ.)
14. Patent 2231944 Russian Federation. *Sposob biologicheskoy ochistki pochv = Method for biological treatment of soils*. Bashmakov D.I., Lukatkin A.S.; applicant and patentee Mordovia State University named after N.P. Ogarev. № 2002117549/12; appl. 01.07.2002; publ. 10.07.2004, bull. № 19. (In Russ.)
15. Patent 2582352 Russian Federation. *Sposob biologicheskoy ochistki pochv = Method for biological treatment of soils*. Krasil'nikov V.V., Serebrennikov B.V., Potoropin E.B., Dymnich S.A.; applicant and patentee Federal State Budgetary Institution “33 Central research institute” Ministry of defense of the Russian Federation. № 2014141425/13; appl. 14.10.2014; publ. 27.04.2016, bull. № 12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юлия Михайловна Сотникова

старший преподаватель кафедры биохимии и биотехнологии, Башкирский государственный университет (Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: sotnikova-bashedu@mail.ru

Yulia M. Sotnikova

Senior lecturer of the sub-department of biochemistry and biotechnology, Bashkir State University (32 Zaki Validi street, Ufa, Russia)

Вадим Валентинович Федяев

кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биохимии и биотехнологии, Башкирский государственный университет (Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32); старший научный сотрудник, Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (Россия, г. Уфа, проспект Октября, 69, лит. Е)

E-mail: vadim.fedyayev@gmail.com

Vadim V. Fedyayev

Candidate of biological sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of biochemistry and biotechnology, Bashkir State University (32 Zaki Validi street, Ufa, Russia); senior staff scientist, Ufa Biological Institute, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (69 E, Oktyabrya avenue, Ufa, Russia)

Анна Сергеевна Григориади

кандидат биологических наук, доцент
кафедры биохимии и биотехнологии,
Башкирский государственный
университет (Россия, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: nyshal111@yandex.ru

Мargarита Ивановна Гарипова

доктор биологических наук, профессор
кафедры биохимии и биотехнологии,
Башкирский государственный
университет (Россия, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: margaritag@list.ru

Айнур Рашиитович Махмутов

кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры биологии, экологии
и химии, Бирский филиал Башкирского
государственного университета
(Россия, г. Бирск,
ул. Интернациональная, 10)

E-mail: ainurmax@mail.ru

Ильшат Рафкатович Галин

кандидат биологических наук, научный
сотрудник лаборатории физиологии
растений, Уфимский Институт биологии
Уфимского федерального
исследовательского центра Российской
академии наук (Россия, г. Уфа,
проспект Октября, 69, лит. Е)

E-mail: ilshat.rafkatovitch@gmail.com

Евдокия Ивановна Новоселова

доктор биологических наук, профессор
кафедры экологии и безопасности
жизнедеятельности, Башкирский
государственный университет
(Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: novoselova58@mail.ru

Анна Александровна Ямалева

доктор биологических наук, профессор,
главный научный сотрудник кафедры
биохимии и биотехнологии, Башкирский
государственный университет (Россия,
г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: frg2@mail.ru

Anna S. Grigoriadi

Candidate of biological sciences, associate
professor of the sub-department
of biochemistry and biotechnology,
Bashkir State University (32 Zaki Validi
street, Ufa, Russia)

Margarita I. Garipova

Doctor of biological sciences, professor
of the sub-department of biochemistry
and biotechnology, Bashkir State University
(32 Zaki Validi street, Ufa, Russia)

Ainur R. Makhmutov

Candidate of chemical sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of biology, ecology
and chemistry, Birs branch of the Bashkir
State University (10 Internatsionalnaya
street, Birs, Russia)

Ilshat R. Galin

Candidate of biological sciences, researcher
of plant physiology laboratory, Ufa
Biological Institute, Ufa Federal Research
Centre of the Russian Academy of Sciences
(69 E, Oktyabrya avenue, Ufa, Russia)

Evdokia I. Novoselova

Doctor of biological sciences, professor
of the sub-department of ecology and life
safety, Bashkir State University
(32 Zaki Validi street, Ufa, Russia)

Anna A. Yamaleeva

Doctor of biological sciences, professor,
principal researcher of the sub-department
of biochemistry and biotechnology, Bashkir
State University (32 Zaki Validi street, Ufa,
Russia)

Рашид Габдулхаевич Фархутдинов

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры биохимии
и биотехнологии, Башкирский
государственный университет
(Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

E-mail: frg2@mail.ru

Rashit G. Farkhutdinov

Doctor of biological sciences, professor,
professor of the sub-department
of biochemistry and biotechnology, Bashkir
State University (32 Zaki Validi street, Ufa,
Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 09.07.2021

Принята к публикации / Accepted 25.08.2021

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике • биология.

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: тел. (841-2) 64-32-89; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку можно оформить по объединенному каталогу «Пресса России», тематические разделы: «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов», «Природа. Мир животных и растений. Экология», «Химия. Нефтехимия. Нефтегазовая промышленность». Подписной индекс – 70238.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата «___» _____ 20__ г.