



ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ГЕРБИЦИДАМИ ГРУППЫ 2,4-D НА ОТДЕЛЬНЫЕ ЭКОЛОГО-ТРОФИЧЕСКИЕ ГРУППЫ МИКРОБИОЦЕНОЗА

Чепкасов К.В.^{1*}, Егорова Д.О.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь, Россия

*E-mail: chepkasovkirill8@gmail.com

IMPACT OF SOIL TREATMENT WITH 2,4-D HERBICIDES ON INDIVIDUAL ECOLOGICAL-TROPHIC GROUPS OF MICROBIOCENOSIS

Chepkasov K.V.^{1*}, Egorova D.O.²

¹Perm State University, Perm, Russia

²Institute of ecology and genetics of microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*E-mail: chepkasovkirill8@gmail.com

Аннотация

2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота и соединения, разработанные на ее основе, активно используются в сельском хозяйстве в качестве гербицидов. Учитывая токсические свойства данных соединений, актуальными являются исследования состояния микробиоценоза почв, подвергнутых обработке гербицидами группы 2,4-D. В настоящем исследовании изучено состояние эколого-трофических групп микробиоценоза сельскохозяйственных полей Куединского района Пермского края (Россия). Обработка полей гербицидами группы 2,4-D проходила в период 2006–2023 гг. Установлено, что численность сапротрофной группы микроорганизмов составляет $1.5–7.2 \times 10^7$ КОЕ/г почвы, а ее изменения коррелируют с периодом, прошедшим после обработки полей гербицидами. Количество олиготрофов находится на низком уровне, что свидетельствует о достаточной доступности углерода в исследуемых почвах. Группа деструкторов 2,4-D составляет 0.03–0.24% от сапротрофов, а численность находится в обратной линейной зависимости от временного интервала между последней обработкой полей гербицидами и отбором образцов почв. В исследуемых почвах не выявлено наличие 2,4-D, что свидетельствует об эффективном разрушении данного гербицида в условиях возделываемых полей.

Ключевые слова:

2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, 2,4-D, почвенные микроорганизмы, гербициды, деструкторы, сапротрофы

Поступила в редакцию: 14.04.2026

Принято в печать: 06.05.2026

Abstract

2,4-Dichlorophenoxyacetic acid and its derived compounds are widely used as agricultural herbicides. Given the toxic properties of these compounds, studies on soil microbiocenosis after treatment with 2,4-D herbicides are of current interest. This study examined the state of ecotrophic groups in the microbiocenosis of agricultural fields in the Kuedinsky District of Perm Krai (Russia). Fields were treated with 2,4-D herbicides from 2006 to 2023. Saprotrophic microbial populations ranged from 1.5 to 7.2×10^7 CFU/g of soil, and changes in these populations were correlated with herbicide treatment duration. The oligotrophic populations were low, indicating sufficient carbon availability in the soils under study. The 2,4-D degrader group accounts for 0.03%–0.24% of saprotrophs, and its abundance is inversely and linearly related to the time interval between the last herbicide application and soil sampling. No 2,4-D was detected in the studied soils, indicating the effective destruction of this herbicide in cultivated fields.

Keywords:

2,4-dichlorophenoxyacetic acid, 2,4-D, soil microorganisms, herbicides, degraders, saprotrophs

Received: 14.04.2026

Accepted: 06.05.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-2-12> EDN: <https://www.elibrary.ru/ywdlkk>

ВВЕДЕНИЕ

Группа 2,4-D – гербициды класса феноксикарбоксилатов на основе 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-D) [Jote 2019]. Дихлорфеноксиуксусная кислота обладает

ауксиновой и ингибиторной активностью. Реализация ауксиновой функции не нашла широкого применения в сельском хозяйстве, в то время как высокая ингибиторная активность 2,4-D в отношении двудольных широколистных сорных растений сделала ее одним из самых востребованных гербицидов на рынке [Lewis *et al.* 2016; Peterson *et al.* 2016]. Например, в Китае для борьбы с сорняками при выращивании пшеницы, сои, кукурузы и других культур ежегодно используется 5000–8000 тонн бутилового эфира 2,4-D [Islam *et al.* 2018]. В виде кислоты гербицид применяется в сельском хозяйстве довольно редко, в основном в так называемых баковых смесях (в комплексе с другими активными веществами). На сегодня диметиламиновая соль и этилгексилловый эфир 2,4-D составляют примерно 90–95% от общего мирового потребления [Хмелевская *и др.* 2016].

Изучение эффектов от применения гербицидов группы 2,4-D показало, что помимо подавления роста сорных растений, данные соединения оказывают негативное воздействие на другие растения и некоторых животных, влияют на структуру почвенного биоценоза [Park *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2010; Bhat *et al.* 2015; Marouani *et al.* 2017; Jote 2019; Oliveira *et al.* 2026]. Однако данные о воздействии на микробиоценозы сельскохозяйственных почв, обработанных 2,4-D, носят противоречивый характер и требуют дальнейшего исследования.

Естественная деградация остаточных количеств 2,4-дихлорфеноксисукусной кислоты в почве может происходить как путем самораспада химических соединений под влиянием условий внешней среды, так и с участием почвенных микроорганизмов, обладающих соответствующими ферментативными системами [Nguyen *et al.* 2022]. Активную роль в разложении 2,4-D играют представители родов *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Achromobacter*, *Cupriavidus*, *Flavobacterium*, *Streptomyces* [Bukowska 2006; Zabaloy *et al.* 2010; Papade *et al.* 2025]. Активные штаммы-деструкторы, осуществляющие разложение 2,4-D и его производных путем последовательного окисления молекулы с расщеплением ароматического кольца, выделены из почв Индии, Японии, Бразилии и ряда других стран [Peckle *et al.* 2022; Silva *et al.* 2022; Muhammad *et al.* 2024; Sakai 2024; Papade *et al.* 2025].

Цель исследования – оценка воздействия гербицидов группы 2,4-D на значимые эколого-трофические группы микробиоценоза сельскохозяйственных почв, подвергавшихся обработке коммерческими препаратами, содержащими соединения группы 2,4-D.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор почвенных образцов проводили на полях в Куединском муниципальном округе Пермского края, вблизи населённых пунктов Большие Кусты, Кашка, Верхний Тымбай и Нижний Тымбай в июне 2025 г (рис. 1). Данная территория является крупным сельскохозяйственным центром с большой площадью пахотных земель (97.297 тыс. га по данным на 2024 г. [Министерство природных ресурсов 2024]). Точки отбора расположены на плоском приводораздельном участке рельефа. Для всех площадок характерна дерново-среднеподзолистая тяжелосуглинистая почва, слабокислая реакция среды и низкое содержание гумуса (табл. 1). Территории пробоотбора представляют собой сельхозугодья с регулярной многолетней химической обработкой. Все поля находятся под регулярной вспашкой, зарастания за период с 2006 г. по настоящее время не отмечено.

Рисунок 1. Расположение площадок для отбора почвенных образцов в Куединском районе Пермского края

Figure 1. Location of soil sampling sites in the Kuedinsky District of Perm Krai

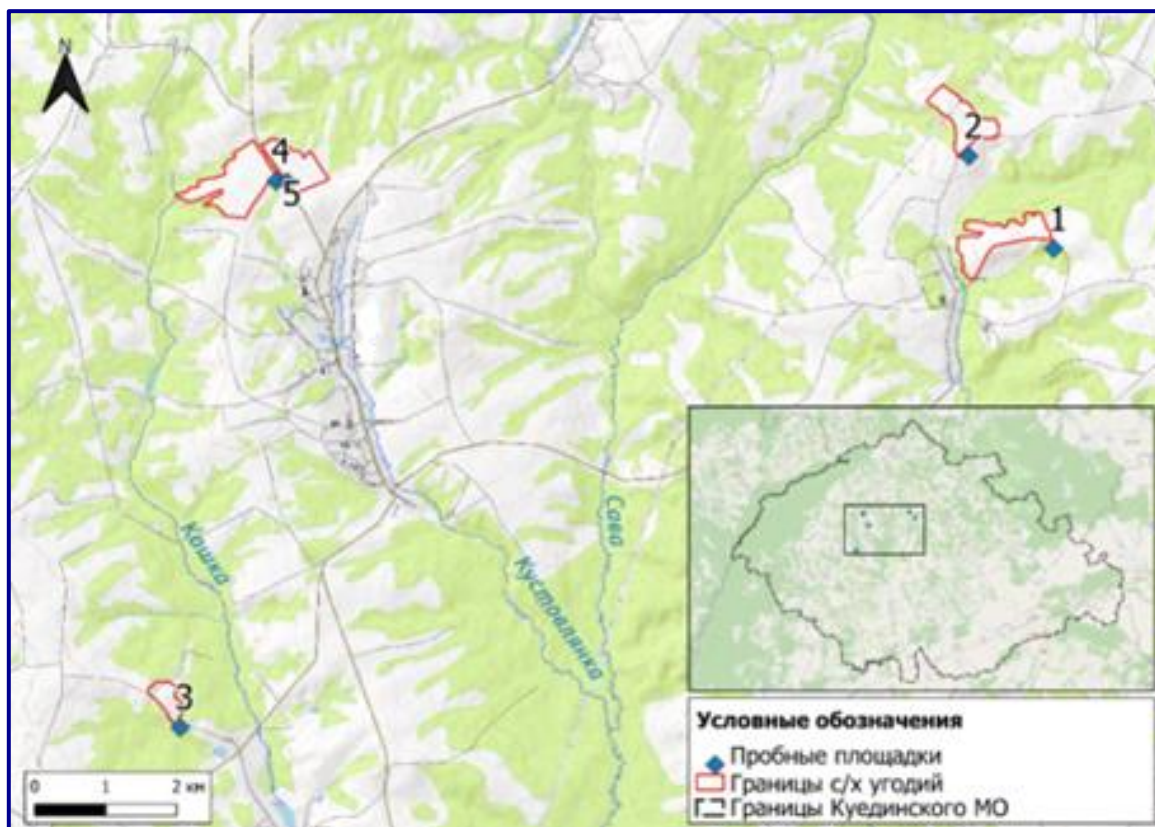


Таблица 1. Характеристика почвенных образцов и периода их обработки гербицидом

Table 1. Characteristics of soil samples and the period of their herbicide treatment

№ Пробы	Гумус, %	pH	Культура на момент пробоотбора	Дата последней обработки 2,4-D, год	Количество внесенного 2,4-D в год обработки, л/га
1	2.3	4.6-5.5	Луговая растительность	2007	0.7
2	2.1-2.3	4.1-4.5	Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i>)	2010	0.8
3	2.1-2.3	4.1-4.5	Овёс обыкновенный (<i>Avena sativa</i>)	2006	0.7
4	2.2-2.3	4.1-5.0	Овёс обыкновенный (<i>Avena sativa</i>)	2023	0.6
5	2.2-2.3	4.1-5.0	Пашня. ранее Кукуруза сахарная (<i>Zea mays</i>)	2007	0.7

Отб почвенных проб проводили в соответствии с [ГОСТ 17.4.4.02-2017](#) «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» и [ГОСТ 17.4.3.01-83](#) «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» методом конверта, размер пробной площадки составил 10×10 м. Перед

пробоотбором участок был очищен от дёрна, растительности, веток и т. д., непосредственно отбор почвенного образца производили на глубину 0.2 м. Масса каждой объединённой пробы составила 1 кг.

Наличие в почве остаточных концентраций 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты определяли методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Почвенный материал объёмом 5 г смешивали с 3 г Na_2SO_4 , переносили в колбу на 50 мл с притёртой крышкой, куда добавляли 10 мл гексана. Перемешивание производили на орбитальном шейкере в течение двух часов, после чего осуществляли фильтрование жидкой фазы через фильтр «Синяя лента». Анализ полученного экстракта проводили на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором Agilent GC 7890A MSD 5975C inert XL EI/CI (Agilent Technology, США) и кварцевой капиллярной колонкой HP-5MS (30 м × 0.25 мм) (Agilent Technology, США). В качестве газа-носителя использовали гелий, температура испарителя составляла 230°C, а объем пробы – 1.0 мкл. Нижний предел обнаружения 2,4-D равен 1.0 нг/кг. Используемая методика определения 2,4-D сопоставима с методикой предложенной [James *et al.* 2023]. Анализ полученных масс-спектров проводили на основе сравнения с масс-спектрами контрольных образцов: чистого раствора 2,4-D и вытяжки из почвы с известной концентрацией внесённого 2,4-D, а также на основании базы данных NIST.

Учёт эколого-трофических групп микроорганизмов проводился по стандартной методике учёта колоний на агаризованной среде [Селивановская, Ахметзянова 2021]. Для выделения эколого-трофических групп использовали среды:

- 1) Питательная среда LB (Luria-Bertani Broth) для выделения сапротрофов (г/л): триптон – 1.0, дрожжевой экстракт – 0.5, хлорид натрия 1.0;
- 2) Минеральная среда K1 для выделения олиготрофов и деструкторов (г/л): $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ – 3.2, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ – 0.4, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0.5, $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.15, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 0.01.

Для получения плотных сред вносили агар-агар до конечной концентрации 1.5%. 2,4-D вносили в виде раствора в минеральную среду K1 до конечной концентрации 0.2 г/л.

10 г почвенного образца помещали в колбу Эрленмейера, вносили 100 мл 0.8%-ного раствора хлорида натрия и выдерживали 2 часа в термошейкере (Environmental Shaker-Incubator ES 20/60, BioSan, Латвия) при +28°C, частоте вращения 100 об/мин. Полученную суспензию высевали на соответствующую среду с использованием метода десятикратных разведений. Культивирование осуществляли в термостате ТС-1/80 СПУ (Санкт-Петербург, Россия) при +28°C. Учет колоний производили на 7 и 14 сут.

Индекс олиготрофности рассчитывали по формуле: отношение количества олиготрофных бактерий к количеству сапротрофных бактерий и умноженное на коэффициент 100 [Рогожина, Захарихина 2022].

Статистический анализ полученных результатов проводили с использованием непарного t-критерия Стьюдента. Данные представляли в виде среднего значения и стандартной ошибки ($M \pm SE$). Достоверность полученного результата оценивали при значения $p < 0.05$. Проводили расчёт коэффициента корреляции Пирсона, а также однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

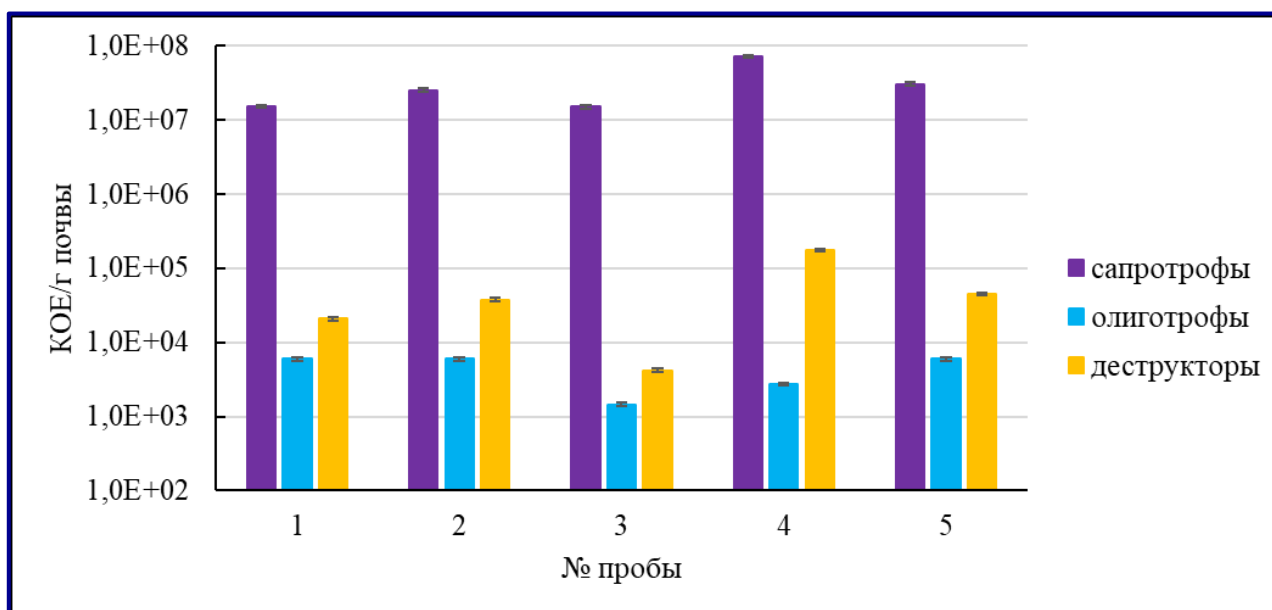
Для оценки влияния гербицида 2,4-D на микробные сообщества почвы был выбран участок в Куединском районе Пермского края, характеризующийся однородными показателями верхнего

горизонта почвенного покрова, что обеспечивает возможность сравнения полученных в ходе исследования данных между собой. На выбранных территориях ведет свою деятельность СПК «Верный путь», согласно архивных данных которого было установлено, что для обработки полей гербицидами на основе 2,4-D были использованы препараты «Элант Премиум», «Всполох» и ряд других производства «Dow AgroScienes», «Doktor Farmer», ООО «Агрусхим», ООО «СибАгрохим», ООО «Листер». Количество внесенных препаратов отличалось незначительно (0.6–0.8 л/га) (табл. 1), период от последней обработки составил от 2 до 19 лет.

Проведенный газохроматографический анализ почвенных образцов не выявил присутствие 2,4-D и других соединений, входящих в состав гербицидов на основе 2,4-D. Отсутствие значимых концентраций 2,4-D на исследуемой территории согласуется с данными о периоде полураспада соединений группы 2,4-D в природных средах. В работе [Jote 2019] указано, что период полураспада 2,4-D в почве действующей пашни составляет 59.5 сут. Учитывая высокую чувствительность использованного для анализа метода, можно заключить, что в настоящее время микробные сообщества исследуемых почв не находятся под давлением данной группы соединений.

В результате проведенного микробиологического исследования установлена численность ряда эколого-трофических групп аэробных бактерий, присутствующих в микробиоценозе исследуемых почв (рис. 2).

Рисунок 2. Численность эколого-трофических групп аэробных культивируемых бактерий в исследованных почвах **Figure 2. Abundance of ecotrophic groups of aerobic cultivable bacteria in the studied soils**



Численность сапротрофной группы варьировала от 1.5×10^7 КОЕ/г почвы до 7.2×10^7 КОЕ/г почвы. Средняя численность данной группы аэробных бактерий в исследованных почвенных образцах составила 2.9×10^7 КОЕ/г почвы. Данный показатель несколько выше, чем численность отдельных эколого-трофических групп микроорганизмов окультуренных дерново-подзолистых почв, описанных в работе [Богатырева и др. 2024]. Сопоставление с данными для слабо окультуренных и хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв показало, что выявленная численность находится в пределах нижней границы численности микроорганизмов хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв [Миненко 2009]. Относительно невысокая численность

сапротрофных бактерий может быть обусловлена различными факторами, одним из которых выступает применение гербицидов группы 2,4-D. Так, в работе [Bankole *et al.* 2020] показано, что внесение 2,4-D приводит к снижению общей численности бактерий в почве на два порядка (с 9.5×10^7 КОЕ/г почвы до 4.3×10^5 КОЕ/г почвы). Напротив, в модельных экспериментах с внесением 2,4-D в почвы (рН 6.6, общий углерод 20.1 г/кг), отобранные на территориях ранее обрабатывавшихся гербицидами группы 2,4-D (последняя обработка за два года до отбора почв), не выявлено изменений в количественном содержании сапротрофной группы аэробных бактерий [Zabaloy *et al.* 2010]. В настоящем исследовании, проведенный корреляционный анализ выявил сильную обратную линейную корреляцию ($r = -0.947$) между временным интервалом, прошедшим от последней обработки территории гербицидом группы 2,4-D, и численностью сапротрофов в микробиоценозе. Количество сапротрофов достоверно выше в образцах с меньшим временным интервалом, прошедшим после обработки территории гербицидом исследуемой группы (ANOVA, $F_{4,9}=10.2$, $p=0.009$). Сопоставление полученных данных о численности сапротрофной группы микроорганизмов с аналогичными данными для почв заповедников Вьетнама, характеризующихся сходными физико-химическими показателями (рН 4.0–5.1, гумус 2.2–2.8%) позволило установить, что в настоящем исследовании численность сапротрофов выше на порядок [Князева *и др.* 2023].

Олиготрофная эколого-трофическая группа бактерий является неотъемлемым компонентом почвенных микробиоценозов. Установлено, что в исследуемых сельскохозяйственных почвах численность олиготрофов варьировала в пределах $1.4–6.0 \times 10^3$ КОЕ/г почвы (рис. 2). Коэффициент олиготрофности характеризовался низкими значениями и составил 0.004–0.04. Такое значение свидетельствует об активном развитии сапротрофной эколого-трофической группы микроорганизмов, что вероятно обусловлено высоким содержанием доступного углерода в почвах. Интересно отметить, что индекс олиготрофности в почвах дендрария г. Сочи, характеризующихся сходными показателями рН (верхняя зона рН 5.2, средняя зона рН 5.1, нижняя зона рН 5.9) и гумуса (верхняя зона 4.7%, средняя зона 2.8%, нижняя зона 4.1%) с исследуемыми сельскохозяйственными почвами, выше на 4 порядка [Рогожина, Захарихина 2022]. Так же отмечено, что чем выше индекс олиготрофности, тем ниже степень окультуренности почв [Рогожина, Захарихина 2022]. В работе И.В. Русаковой [Русакова 2018] отмечено, что индекс олиготрофности дерново-подзолистых почв при длительном применении соломы и минеральных удобрений составлял 0.98–1.23, при этом индекс повышается при недостаточном поступлении свежего органического вещества. Для вермикомпостов коэффициент олиготрофности составил 1.1–6.19, при этом повышение коэффициента происходило при нарушении соотношения C : N [Сенкевич *и др.* 2019]. Обработка полей гербицидами группы 2,4-D может рассматриваться как поступление дополнительного органического субстрата для олиготрофной группы микроорганизмов. Однако, в настоящем исследовании не выявлено достоверных корреляционных зависимостей между численностью группы олиготрофных культивируемых микроорганизмов и давностью обработки полей гербицидами. По всей видимости внесение 2,4-D не оказывало влияния на численность группы олиготрофных микроорганизмов.

Важным компонентом микробиоценозов сельскохозяйственных почв являются бактерии-деструкторы, способные нейтрализовать поступающие в почву химически синтезированные гербициды и пестициды. Установлено, что во всех исследованных образцах присутствуют культивируемые штаммы, способные разлагать 2,4-D. Их численность варьировала в пределах $0.04–1.7 \times 10^5$ КОЕ/г почвы (рис. 2), что составило 0.03–0.24% от общего числа сапротрофных бактерий микробиоценоза. Корреляционный анализ показал, что численность группы деструкторов

находится в сильной обратной линейной зависимости (коэффициент корреляции составил 0.966) от давности периода обработки полей гербицидами. Количество деструкторов достоверно выше в образце №4, где последняя обработка проводилась в 2023 г, чем в образцах почв с полей, где обработка гербицидами группы 2,4-D проводилась в 2006–2010 гг (ANOVA, $F_{5,3}=20.8$, $p=0.002$). Также стоит отметить, что доля деструкторов также была достоверно выше в микробиоценозе образца №4 (ANOVA, $F_{5,3}=17.3$, $p=0.003$), а коэффициент корреляции составил -0.798. Выявленное количество деструкторов выше, чем показано в работе [Zabaloy *et al.* 2010] на 4 сутки после внесения 2,4-D, но ниже, чем на 33 сутки. По всей видимости, проведенные ранее обработки почвы гербицидами группы 2,4-D, способствовали развитию группы специфичных бактерий-деструкторов в микробиоценозе почв, а дальнейшее поддержание их численности происходит за счет присутствия в почвах соединений, по химической структуре схожих с 2,4-D. Таким образом, степень трансформации микробиоценоза под действием гербицидов группы 2,4-D можно рассматривать как низкую, а эффект от долгосрочного применения данных гербицидов – допустимым. Кроме того, деградационный потенциал сформировавшегося пула микроорганизмов-деструкторов оказалось достаточно для естественной очистки почвы от вносимых концентраций гербицида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была проведена комплексная оценка воздействия гербицидов группы 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-D) на микробиоценоз сельскохозяйственных почв Куединского муниципального округа Пермского края. Анализ почвенных образцов показал, что в настоящий момент концентрация 2,4-D находится ниже предела обнаружения. В результате анализа эколого-трофических групп микробиоценозов установлено, что сапротрофы представлены в значительном количестве, при этом их численность находится в обратной линейной зависимости от периода, прошедшего с даты последней обработки почвы гербицидами группы 2,4-D. Индекс олиготрофности свидетельствует о достаточном количестве доступного углерода в исследуемых почвах. Группа микроорганизмов-деструкторов 2,4-D представлена во всех исследованных микробиоценозах, при этом ее численность зависит от временного интервала, прошедшего после последней обработки полей гербицидами группы 2,4-D. Не смотря на длительный период без внесения 2,4-D пул деструкторов поддерживается на относительно стабильном уровне, что обеспечивает устойчивость микробиоценоза в случае внесения гербицидов группы 2,4-D.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ №124020500028-4 «Биоразнообразие микроорганизмов антропогенно загрязненных экосистем и функционально-генетические механизмы их адаптации к стрессовым условиям окружающей среды».

Конфликт интересов | Conflicts of Interest

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. The authors declare no actual or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богатырева Е.Н., Серая Т.М., Бирюкова О.М., Кирдун Т.М. (2024) Влияние приемов обработки дерново-подзолистой суглинистой почвы и удобрений на численность микроорганизмов.

- В: *Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия. Сборник докладов XIX Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В.В. Докучаева» 24–26 апреля 2024.* Курск: 32–37. EDN: [SIPXLU](#)
- ГОСТ 17.4.4.02-2017 (2018) Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Стандартинформ. Москва: 16.
- ГОСТ 17.4.4.02-84 (2008) Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Стандартинформ. Москва: 8.
- Князева А.В., Лысак Л.В., Лапыгина Е.В., Александрова А.В. (2023) Обилие и разнообразие микроорганизмов в почвах и сопряженных субстратах (опаде и “подвешенной почве”) некоторых заповедников Вьетнама. *Почвоведение.* (6): 730–744. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601323> EDN: [FPMROX](#)
- Миненко А.К. (2009) Изменение биологической активности дерново-подзолистых почв при их окультуривании. *Агрэкоинфо.* (2): 1. EDN: [SIPQMF](#)
- Министерство природных ресурсов лесного хозяйства и экологии Пермского края (2024) Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2024 году». Пермь: 236. [https://prioda.permkrai.ru/download.php?id=360883](https://priroda.permkrai.ru/download.php?id=360883)
- Рогожина Е.В., Захарихина Л.В. (2022) Олиготрофность микробного сообщества и динамика эмиссии CO₂ желтоземов в условиях антропогенеза (на примере г. Сочи). *Субтропическое и декоративное садоводство.* (81): 161–171. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2022-81-161-171> EDN: [SZUMKZ](#)
- Русакова И.В. (2018) Изучение экологического состояния микробного сообщества дерново-подзолистой почвы при длительном применении соломы и минеральных удобрений. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* (6):120–124 <https://doi.org/10.17513/mjpf.12303>
- Сенкевич О.В., Ульянова О.А., Хижняк С.В. (2019) Оценка влияния новых видов вермикомпоста на плодородие агросерой почвы. *Агрохимия.* (8):24–33 <https://doi.org/10.1134/S000218811908009X>
- Селивановская С.Ю., Ахметзянова Л.Г. (2021) Экология микроорганизмов: учебно-методическое пособие. Издательство Казанского федерального университета. Казань: 43.
- Хмелевская М.С., Ахрамович Т.И., Игнатовец О.С., Леонтьев В.Н., Феськова Е.В. (2016) Естественные пути деградации пестицидов на основе 2,4-дихлорфеноксиуксусных кислот. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология.* (4): 175–181. EDN: [WHMPPX](#)
- Jote C.A. (2019) A Review of 2,4-D Environmental Fate, Persistence and Toxicity Effects on Living Organisms. *Organic & Medicinal Chemistry International Journal.* 9(1): 555755. <https://doi.org/10.19080/OMCIJ.2019.09.555755>
- Bankole S.O., Oyedeji M.B., Alagbe O.A., Chukwudebe E.P., Olatunji A.O., Oyewunmi R. V., Ariwoola O.S. (2020) Effect of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) and Dichlorvos (2,2-Dichlorovinyl Dimethyl Phosphate DDVP) on Soil Microorganisms. *Journal of Advances in Microbiology.* 20(8): 49–53. <https://doi.org/10.9734/jamb/2020/v20i830275>
- Bhat S.V., Booth S.C., Vantomme E.A.N., Afroj S., Yost C.K., Dahms T.E.S. (2015) Oxidative stress and metabolic perturbations in *Escherichia coli* exposed to sublethal levels of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Chemosphere.* 135: 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.035> EDN: [USVCBH](#)
- Bukowska B. (2006) Toxicity of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid -Molecular Mechanisms. *Polish Journal of Environmental Studies.* 15(3): 365–374. <https://www.pjoes.com/pdf-87880-21739?filename=Toxicity-of-2-4-Dichlorop.pdf> EDN: [KXDFLW](#)
- Islam F., Wang J., Farooq M.A., Khan M.S.S., Xu L., Zhu J., Zhao M., Muños S., Li Q.X., Zhou W. (2018) Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International.* 111: 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020> EDN: [WVGEDG](#)
- James S., Ele Yaya E., Singh Chandravanshi B., Zewge F. (2023) Determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in water, sediment and soil using high performance liquid chromatography. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia.* 37(2): 251–263. <https://doi.org/10.4314/bcse.v37i2.1> EDN: [DEJRTT](#)
- Lewis K.A., Tzilivakis J., Warner D.J., Green A. (2016) An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal.* 22(4): 1050–1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>

- Marouani N., Tebourbi O., Cherif D., Hallegue D., Yacoubi M.T., Sakly M., Benkhalifa M., Ben Rhouma K. (2017) Effects of oral administration of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on reproductive parameters in male Wistar rats. *Environmental Science and Pollution Research*. **24**(1): 519–526. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7656-3> EDN: WNZUAI
- Muhammad J.B., Jagaba A.H., Yusuf F., Usman S., Yakubu N.S., Birniwa A.H., Yakasai H.M., Shehu D. (2024) *Achromobacter xylosoxidans* bacteria isolated from contaminated agricultural environment for a sustainable 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide degradation: An experimental study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. **9**: 100604. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100604> EDN: ORDYCK
- Nguyen T.L.A., Dao A.T.N., Dang H.T.C., Koekkoek J., Brouwer A., de Boer T.E., van Spanning R.J.M. (2022) Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) and 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T) by fungi originating from Vietnam. *Biodegradation*. **33**(3): 301–316. <https://doi.org/10.1007/s10532-022-09982-1> EDN: FZXRFE
- Oliveira B.R.F., Pereira A.G., Kremer R., Zurchimitten G.D.R., Moreira D.H., Pinheiro L.C., Simioni C., Ouriques L.C., Izídio G.S. (2026) Commercial formulation containing 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) induces cellular damage, tissue injury, and antioxidant disruption in zebrafish *Danio rerio*. *Aquatic Toxicology*. **290**: 107647. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107647> EDN: JFUZKH
- Papade S.E., Suhail M., Bagwe O.K., Phale P.S. (2025) Degradation of 2,4-D by plant growth-promoting *Cupriavidus* sp. DSPFs: role in mitigating herbicide toxicity in soil and enhancing crop production. *Microbiology Spectrum*. **13**(11) <https://doi.org/10.1128/spectrum.00560-25> EDN: YHIOGE
- Park K., Park J., Kim J., Kwak I.-S. (2010) Biological and molecular responses of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) to herbicide 2,4-D (2,4-dichlorophenoxyacetic acid). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. **151**(4): 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.01.009>
- Peckle B.A., Silva S. da, Ribeiro J.R. de A., Oliveira S.S. de, Vianez-Júnior J.L.S.G., Direito I.C.N., Macrae A. (2022) The Genome of *Enterobacter hormaechei* Strain MG02, a 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid-Degrading Bacterium Isolated from Brazilian Soil. *Microbiology Resource Announcements*. **11**(3) <https://doi.org/10.1128/mra.01104-21> EDN: JKNFWM
- Peterson M.A., McMaster S.A., Riechers D.E., Skelton J., Stahlman P.W. (2016) 2,4-D Past, Present, and Future: A Review. *Weed Technology*. **30**(2): 303–345. <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>
- Sakai Y. (2024) Genomic analysis of the degradation gene clusters and the parABS system in *Afiopia* sp. strain DD3 capable of utilizing 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *The Microbe*. **4**: 100149. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100149> EDN: XYCLKO
- Silva S. da, Peckle B.A., Ribeiro J.R. de A., Oliveira S.S. de, Bianco K., Clementino M.M., Direito I.C.N., Macrae A. (2022) The Genome Sequence of *Brucella intermedia* DF13, a 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid-Degrading Soil Bacterium Isolated in Brazil. *Microbiology Resource Announcements*. **11**(4) <https://doi.org/10.1128/mra.01105-21> EDN: VCLLUO
- Zabaloy M.C., Garland J.L., Gomez M.A. (2010) Assessment of the impact of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on indigenous herbicide-degrading bacteria and microbial community function in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*. **46**(2): 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.006>
- Zhang C., Liu X., Dong F., Xu J., Zheng Y., Li J. (2010) Soil microbial communities response to herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid butyl ester. *European Journal of Soil Biology*. **46**(2): 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.12.005>

REFERENCES

- Bogatyryova E.N., Grey T.M., Biryukova O.M. (2024) Influence of processing techniques of sod-podzolic loamy soil and fertilizers on the number of microorganisms. In: *Topical problems of soil science, ecology and agriculture. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of Kursk branch IPO «V.V. Dokuchaev Society of Soil Scientists», April 24-26, 2024*. Kursk: 32–37. EDN: SIPXLU (in Russian)
- GOST 17.4.4.02-2017 (2018) Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Standartinform Publishing. Moscow: 16. (in Russian)
- GOST 17.4.4.02-84 (2008) Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis. Standartinform Publishing. Moscow: 8. (in Russian)
- Kniazeva A.V., Lysak L.V., Lapygina E.V., Aleksandrova A.V. (2023) Abundance and diversity of microorganisms in soils and associated substrates (leaf litter and “suspended soil”) in some

- nature reserves of Vietnam. *Eurasian Soil Science.* (6): 730–744. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601323> EDN: FPMROX (in Russian)
- Minenko, A.K. (2009) Changes in the biological activity of sod-podzolic soils during their cultivation. *Agroecoinfo.* (2): 1. EDN: SIPQMF (in Russian)
- Ministry of Natural Resources, Forestry and Ecology of Perm Krai (2024) Report "On the state and protection of the environment of Perm Krai in 2024" [Doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Permskogo kraia v 2024 godu»]. Perm: 236 (in Russian) <https://priroda.permkrai.ru/download.php?id=360883>
- Rogozhina Ye.V., Zakharikhina L.V. (2022) Oligotrophy of microbial community and CO₂ emission dynamic in yellow soils under conditions of anthropogenesis (on the example of Sochi). *Subtropical and ornamental horticulture.* (81): 161–171. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2022-81-161-171> EDN: SZUMKZ (in Russian)
- Rusakova I.V. (2018) Study of the ecological state of the microbial community of sod-podzolic soil with long-term use of straw and mineral fertilizers. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* (6):120–124 <https://doi.org/10.17513/mjpf.12303> (in Russian)
- Senkevich O.V., Ulyanova O.A., Khizhnyak S.V. (2019) Assessing the effect of new types of vermicompost on the fertility of agro-gray soil. *Agrochemistry.* (8):24–33 <https://doi.org/10.1134/S000218811908009X> (in Russian)
- Selivanovskaya S.Yu., Akhmetzyanova L.G. (2021) Ecology of microorganisms: teaching manual [Ekologiya mikroorganizmov: uchebno-metodicheskoe posobie]. Kazan Federal University Publishing. Kazan: 43. (in Russian)
- Hmelevskaya M.S., Akhramovich T.I., Ignatovets O.S., Leontiev V.N., Feskova A. (2016) The natural ways of degradation of pesticides based on 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Proceedings of BSTU. Series 2. Chemical engineering, biotechnology, geoecology.* (4): 175–181. EDN: WHMPPX (in Russian)
- Jote C.A. (2019) A Review of 2,4-D Environmental Fate, Persistence and Toxicity Effects on Living Organisms. *Organic & Medicinal Chemistry International Journal.* 9(1): 555755. <https://doi.org/10.19080/OMCIJ.2019.09.555755>
- Bankole S.O., Oyedeji M.B., Alagbe O.A., Chukwudebe E.P., Olatunji A.O., Oyewunmi R. V., Ariwoola O.S. (2020) Effect of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) and Dichlorvos (2,2-Dichlorovinyl Dimethyl Phosphate DDVP) on Soil Microorganisms. *Journal of Advances in Microbiology.* 20(8): 49–53. <https://doi.org/10.9734/jamb/2020/v20i830275>
- Bhat S. V., Booth S.C., Vantomme E.A.N., Afroj S., Yost C.K., Dahms T.E.S. (2015) Oxidative stress and metabolic perturbations in *Escherichia coli* exposed to sublethal levels of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Chemosphere.* 135: 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.035> EDN: USVCBH
- Bukowska B. (2006) Toxicity of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid -Molecular Mechanisms. *Polish Journal of Environmental Studies.* 15(3): 365–374. EDN: KXDFLW
- Islam F., Wang J., Farooq M.A., Khan M.S.S., Xu L., Zhu J., Zhao M., Muños S., Li Q.X., Zhou W. (2018) Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. *Environment International.* 111: 332–351. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020> EDN: WVGEDG
- James S., Ele Yaya E., Singh Chandravanshi B., Zewge F. (2023) Determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in water, sediment and soil using high performance liquid chromatography. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia.* 37(2): 251–263. <https://doi.org/10.4314/bcse.v37i2.1> EDN: DEJRTT
- Lewis K.A., Tzilivakis J., Warner D.J., Green A. (2016) An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal.* 22(4): 1050–1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- Marouani N., Tebourbi O., Cherif D., Hallegue D., Yacoubi M.T., Sakly M., Benkhalifa M., Ben Rhouma K. (2017) Effects of oral administration of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on reproductive parameters in male Wistar rats. *Environmental Science and Pollution Research.* 24(1): 519–526. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7656-3> EDN: WNZUAI
- Muhammad J.B., Jagaba A.H., Yusuf F., Usman S., Yakubu N.S., Birniwa A.H., Yakasai H.M., Shehu D. (2024) *Achromobacter xylosoxidans* bacteria isolated from contaminated agricultural environment for a sustainable 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide degradation: An experimental study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.* 9: 100604. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100604> EDN: QRDYCK
- Nguyen T.L.A., Dao A.T.N., Dang H.T.C., Koekkoek J., Brouwer A., de Boer T.E., van Spanning R.J.M. (2022) Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) and 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid

- (2,4,5-T) by fungi originating from Vietnam. *Biodegradation*. **33**(3): 301–316. <https://doi.org/10.1007/s10532-022-09982-1> EDN: FZXRFE
- Oliveira B.R.F., Pereira A.G., Kremer R., Zurchimitten G.D.R., Moreira D.H., Pinheiro L.C., Simioni C., Ouriques L.C., Izídio G.S. (2026) Commercial formulation containing 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) induces cellular damage, tissue injury, and antioxidant disruption in zebrafish *Danio rerio*. *Aquatic Toxicology*. **290**: 107647. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107647> EDN: JFUZKH
- Papade S.E., Suhail M., Bagwe O.K., Phale P.S. (2025) Degradation of 2,4-D by plant growth-promoting *Cupriavidus* sp. DSPFs: role in mitigating herbicide toxicity in soil and enhancing crop production. *Microbiology Spectrum*. **13**(11) <https://doi.org/10.1128/spectrum.00560-25> EDN: YHIOQE
- Park K., Park J., Kim J., Kwak I.-S. (2010) Biological and molecular responses of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) to herbicide 2,4-D (2,4-dichlorophenoxyacetic acid). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. **151**(4): 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.01.009>
- Peckle B.A., Silva S. da, Ribeiro J.R. de A., Oliveira S.S. de, Vianez-Júnior J.L.S.G., Direito I.C.N., Macrae A. (2022) The Genome of *Enterobacter hormaechei* Strain MG02, a 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid-Degrading Bacterium Isolated from Brazilian Soil. *Microbiology Resource Announcements*. **11**(3) <https://doi.org/10.1128/mra.01104-21> EDN: JKNFWM
- Peterson M.A., McMaster S.A., Riechers D.E., Skelton J., Stahlman P.W. (2016) 2,4-D Past, Present, and Future: A Review. *Weed Technology*. **30**(2): 303–345. <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>
- Sakai Y. (2024) Genomic analysis of the degradation gene clusters and the parABS system in *Afipia* sp. strain DD3 capable of utilizing 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *The Microbe*. **4**: 100149. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100149> EDN: XYCLKO
- Silva S. da, Peckle B.A., Ribeiro J.R. de A., Oliveira S.S. de, Bianco K., Clementino M.M., Direito I.C.N., Macrae A. (2022) The Genome Sequence of *Brucella intermedia* DF13, a 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid-Degrading Soil Bacterium Isolated in Brazil. *Microbiology Resource Announcements*. **11**(4) <https://doi.org/10.1128/mra.01105-21> EDN: VCLLUO
- Zabaloy M.C., Garland J.L., Gomez M.A. (2010) Assessment of the impact of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on indigenous herbicide-degrading bacteria and microbial community function in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*. **46**(2): 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.006>
- Zhang C., Liu X., Dong F., Xu J., Zheng Y., Li J. (2010) Soil microbial communities response to herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid butyl ester. *European Journal of Soil Biology*. **46**(2): 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.12.005>

Цитировать как

Чепкасов К.В., Егорова Д.О. (2026). Влияние обработки почвы гербицидами группы 2,4-D на отдельные эколого-трофические группы микробиоценоза. *Экобиотех.* **9**(2): 148-158. <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-2> <https://www.elibrary.ru/btmnvs>

Cited as

Chepkasov K.V., Egorova D.O. (2026). Impact of soil treatment with 2,4-D herbicides on individual ecological-trophic groups of microbiocenosis. *Ecobiotech.* **9**(2): 148-158. <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-2> <https://www.elibrary.ru/btmnvs>

Сведения об авторах

Кирилл Викторович Чепкасов, студент бакалавриата, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия. E-mail: chepkasovkirill8@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9522-438X.

Дарья Олеговна Егорова, д.б.н., доцент, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь, Россия. E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN-код: 9450-7883, WoS Researcher ID AAF-5550-2019, ORCID: 0000-0001-8018-4687.

Information About the Authors

Kirill V. Chepkasov, undergraduate student, Perm State University, Perm, Russia. E-mail: chepkasovkirill8@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9522-438X.

Darya O. Egorova, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Institute of ecology and genetics of microorganisms UB RAS, Perm, Russia. E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN-код: 9450-7883, WoS Researcher ID AAF-5550-2019, ORCID: 0000-0001-8018-4687.