

# ***Влияние кадмия на рост и развитие растений***

Юхина Дарья Сергеевна

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение  
«Школа № 3 «Центр развития образования»  
11 класс

Руководитель:  
Стуколкина Г.А.,  
учитель биологии

Рязань, 2023

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	3
Обзор литературы.....	6
Методы исследования.....	11
Результаты и обсуждение.....	15
Выводы.....	30
Список литературы.....	32
Приложения .....	36

## ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных загрязнителей окружающей среды одно из главных мест занимают тяжелые металлы, которые отличаются высокой токсичностью и способностью по пищевым цепям поступать в организм человека и животных, тем самым представляя серьезную угрозу их здоровью.

Проблема техногенного загрязнения агроландшафтов обострилась в последние десятилетия во многих регионах России. Она актуальна и для Рязанской области. Во многих районах области отмечается критическая ситуация по загрязнению культурных ландшафтов тяжелыми металлами [19].

Опасность возрастания содержания тяжелых металлов в почве и атмосфере связана также с их активным поглощением и накоплением в растениях, что не только негативно отражается на жизнедеятельности самих растений, но и представляет серьезную угрозу здоровью человека и животных. В связи с этим в настоящее время проблеме устойчивости и адаптации растений к действию тяжелых металлов уделяют большое внимание во всем мире

Среди тяжелых металлов одним из наиболее токсичных для всех живых организмов считается кадмий. На сегодняшний день во многих странах мира почвы, предназначенные для сельскохозяйственного производства, загрязнены этим металлом вследствие широкого применения высоких доз фосфорных удобрений и гербицидов, а также осадков сточных вод, содержащих в своем составе кадмий. Это существенно ограничивает их использование для выращивания продовольственных культур, поскольку кадмий не только поглощается корнями растений, но и способен перемещаться в надземные органы, в том числе в плоды и семена. Опасность кадмия усугубляется тем, что он накапливается в растении и сохраняет токсические свойства в течение длительного времени. Поступивший в почву кадмий присутствует в ней, в основном, в подвижной форме, что обуславливает его высокую миграционную способность.

Кадмий входит в список десяти самых опасных химических веществ, влияющих на здоровье человека и экологическое состояние наземных экоси-

стем [7]. Из всех загрязнителей кадмий все больше привлекает внимание исследователей в связи с недостаточностью данных о необходимости его для жизни растений и серьезных нарушениях процессов обмена у человека и животных при поступлении в организм этого элемента. Опасность кадмия усугубляется еще и тем, что он медленно выводится из организма, поэтому его количество увеличивается с возрастом. Организм человека к пятидесяти годам способен накопить от 30 до 50 мг металла. При этом вызванные кадмием нарушения в организме человека необратимы и могут прогрессировать даже после прекращения контакта с ним.

Канцерогенные и мутагенные свойства этого элемента позволили считать его одним из самых опасных тяжелых металлов в санитарно-гигиеническом отношении и отнести к 1 классу опасности [2]. Кадмий относится к элементам, содержание которых жестко регламентируется в пищевых продуктах<sup>1</sup> и зерне<sup>2</sup>. Установлены предельные содержания кадмия во всех продуктах: мясе и мясопродуктах, рыбе, молоке, хлебобулочных изделиях, зерновых, зернобобовых, масличных.

Загрязнение почвенного покрова кадмием считается одним из наиболее опасных экологических явлений, так как он накапливается в растениях выше нормы даже при слабом загрязнении почвы

В последние годы многие российские и зарубежные ученые все больше внимания обращают на перспективность применения методов очистки почвенных грунтов с использованием зеленых растений для оздоровления загрязненных почв – фиторемедиации. Термин «фиторемедиация» («phyto» - растение, «remedium» - очистить, восстановить) относится к разнообразной коллекции технологий, которые используют растения для очистки загрязненной окружающей среды [23, С. 551].

---

<sup>1</sup> Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». Утвержден Решением Комиссии таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880.

<sup>2</sup> Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна». Утвержден Решением Комиссии таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 874.

Известно, что характер накопления тяжелых металлов и других загрязнителей различен и прямо связан с их видовой принадлежностью. Научные исследования по этой проблеме в основном направлены на изучение сельскохозяйственных культур. В качестве растений гипераккумуляторов, то есть, фиторемедиаторов, тяжелых металлов современными учеными указываются: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg), полынь горькая (*Artemisia absinthium* L), бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и некоторые другие [13].

При этом отмечается, что содержащийся в растениях кадмий представляет наибольшую опасность, так как может служить источником поступления в организмы человека и животных. Поэтому толерантность и адаптация некоторых растительных видов к повышенным содержаниям кадмия, хотя они и важны с точки зрения сохранности окружающей среды, представляют угрозу для здоровья человека [18, с. 113].

**Цель** настоящего исследования: изучить устойчивость к кадмию растений разных видов.

Для достижения указанной цели последовательно решаются следующие **задачи**:

- 1) Определить степень металлоустойчивости растений разных видов в условиях эксперимента.
- 2) Сравнить степень металлоустойчивости разных растений при разных концентрациях кадмия.
- 3) Выяснить влияние разных концентраций кадмия на растения в разных типах почв.
- 4) Определить фитотоксичность разных типов почв при разных концентрациях кадмия.

**Объект** исследования: растения, устойчивые к кадмию – редька масличная (*Brassica rapa*, сем. Крестоцветные), горчица сарептская (*Brassica juncea*, сем. Крестоцветные), шалфей поникающий (*Salvia nutans*, сем. Губо-

цветные), бархатцы прямостоячие (*Tagetes erecta*, сем. Сложноцветные), целозия гребенчатая (*Celosia cristata*, сем. Амарантовые), резуха альпийская (*Arabis alpina*, сем. Крестоцветные), овес посевной (*Avena sativa*, сем. Злаковые).

**Предмет исследования:** влияние разных концентраций кадмия на развитие растений.

При проведении работ применялись следующие **методы исследования:** экспериментального моделирования, абстрагирования, наблюдения, измерения и сравнения, анализа и синтеза, математической и статистической обработки данных.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

Влияние кадмия на растения является предметом исследования как основательных монографий, так и научных статей [9, 10, 18, 23, 25, 27, 28 и др.].

Уже в 1989 году отмечалось, что длительное использование неорганических фосфатных удобрений существенно повышает природный уровень кадмия в почвах, а загрязнение почв кадмием рассматривается как наиболее серьезная опасность для здоровья. В антропогенных условиях содержание кадмия в поверхностном слое почв обычно возрастает. Даже в лесных и сельских местностях различных стран атмосферное поступление кадмия превышает вынос этого металла из почвенного профиля [19, с. 110].

В последние годы большое внимание уделяется регулированию содержания кадмия в фосфорных удобрениях. Длительное использование фосфорных удобрений может привести к значительному накоплению кадмия в почвах, что может привести к повышенному поглощению кадмия сельскохозяйственными культурами. Поведение кадмия в почвах характеризуется относительно высокой подвижностью по сравнению с другими тяжелыми металлами [27, 29, 30]. Долгосрочные (100 лет) наблюдения и расчеты показывают, что содержание кадмия в фосфорных удобрениях влияет на дальнейший уро-

вень его содержания как в почве, так и в растениях. Накопление кадмия в почве (пахотные и пастбищные уголья) продолжается, если содержание кадмия в фосфорных удобрениях превышает 20 мг/кг [30, С. 4]. Для многих сельскохозяйственных культур, включая пшеницу, рис, картофель, уровни кадмия в почвах связаны с уровнями в сельскохозяйственных культурах, причем уровни в культурах увеличиваются с увеличением уровней в почве, хотя реакция на повышение кадмия в почве различается как между культурами, так и между почвами. Примерно 50% продуктов питания могут быть напрямую связаны с качеством почвы [30, С. 5]. Снижение накопления кадмия в почвах и его переноса в сельскохозяйственные культуры заметно при содержании кадмия в 20 мг/кг фосфорных удобрений или менее. Отмечается возможность иммобилизации кадмия за счет повышения pH почв путем известкования или добавления основных поправок в почву. Однако это приводит к накоплению кадмия в почвах, так как перенос в культуры ограничен, что может быть опасно в среднесрочной и долгосрочной перспективе [29].

Использование фосфорных удобрений и пестицидов с пониженным содержанием кадмия – одно из основных направлений в производстве сельскохозяйственной продукции [3].

Для кадмия установлены ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) в почве: 0,5 мг/кг для песчаных и супесчаных почв; 1,0 мг/кг для кислых суглинистых и глинистых ( $\text{pH KCl} < 5,5$ ); 2,0 для близких к нейтральным, нейтральных суглинистых и глинистых ( $\text{pH KCl} > 5,5$ ) [2]. При этом, согласно письму Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации от 27 декабря 1993 года №04-25/Комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 27 декабря 1993 года №61-5678 «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» для кадмия установлено фоновое содержание в дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах – 0,05 мг/кг, дерново-подзолистых суглинистых и глинистых – 0,12 мг/кг, серых лесных – 0,2 мг/кг, в черноземах – 0,24 мг/кг. Уровни загрязнения земель по

кадмию также установлены в зависимости от ПДК (ОДК): менее ПДК (ОДК) – 1 (допустимый), от 1 ПДК (ОДК) до 3 мг/кг – 2 (низкий), от 3 до 5 мг/кг – 3 (средний), от 5 до 20 мг/кг – 4 (высокий), более 20 мг/кг – 5 (очень высокий) [1].

В работе «Экология агроландшафта Рязанской области» выпадение кадмия с осадками на территории Рязанской области в период 1993-1999 оценивалось от 1,5 до 8,4 г/га в год (в среднем – 4,7 г/га) [19, с.40]. Также отмечалось, что основным источником поступления кадмия в почву в результате сельскохозяйственной деятельности являются органические и минеральные удобрения (фосфорные и калийные). По классификации, приведённой в работе, региональный фон содержания кадмия в почвах Рязанской области – 0,18±0,02 мг/кг, незагрязнённая почва – при содержании кадмия <0,18 мг/кг, низкая загрязнённость – при 0,18-0,36 мг кадмия на 1 кг почвы, средняя – 0,36-0,54 мг/кг, повышенная – 0,54-0,72 мг/кг, высокая – 0,72-0,90 мг/кг [19, с. 73]. При этом для дерново-подзолистых почв содержание кадмия оценивалось в 0,07-0,08 мг/кг (на глубине 0-40 см), для серых лесных – 0,22 - 0,16 мг/кг, для черноземов – 0,26-0,3 мг/кг [21].

Также, в среднем, ежегодно на каждый гектар Рязанской области поступает с осадками 4,7 г кадмия. Отмечается аккумуляция кадмия и других металлов в корнеобитаемом слое почвы [20].

Одним из основных и визуально сравнительно легко регистрируемых проявлений фитотоксичности кадмия является торможение роста растений и замедление их развития.

На кислой дерново-подзолистой почве дозы кадмия 2,5 мг/кг уже можно считать опасными. Содержание подвижного кадмия в почвах, при котором превышено ПДК в кормах: дерново-подзолистая – 2,0 мг/кг, окультуренная дерново-подзолистая – 2,5 мг/кг, чернозем – 5,5 мг/кг. Гибель урожая наблюдается при содержании кадмия 10 мг/кг в дерново-подзолистой неокультуренной почве, но при 100 мг/кг в окультуренной дерново-подзолистой почве и черноземе [15].



В отдельных работах установлено, что внесение кадмия в дозах 0,25-4,0 мг/кг на дерново-подзолистой почве и черноземе не оказывает отрицательного влияния на урожай пшеницы картофеля, овса и горчицы. Снижение урожайности наблюдается при внесении кадмия в дозе 8 мг/кг почвы. При дополнительном внесении кадмия в почву возрастает накопление его в растениях [25].

В последние годы в научной литературе все чаще рассматривается использование ремедиационных технологий для детоксикации почв. Суть метода заключается в том, что зеленые растения могут извлекать различные элементы из окружающей среды и концентрировать их в тканях. Такой способ очистки является эффективным и экономически выгодным [11]. Известны различные способы очистки почв от тяжелых металлов, среди которых особый интерес вызывает фитоэкстракция. Она заключается в посеве и выращивании в течение определенного периода времени на загрязненных участках специально подобранных видов сельскохозяйственных растений для извлечения из почвы тяжелых металлов корневой системой и накопления их в наземной биомассе, с последующей утилизацией. Для фитоэкстракции лучше использовать специально подобранные виды сельскохозяйственных растений, чем растения-гипераккумуляторы из числа диких видов. Они хотя и накапливают в десятки раз больше металлов, чем другие растения, но отличаются низкой скоростью роста и небольшой надземной биомассой. Завершающим этапом фитоэкстракции является жатва, сбор и утилизация загрязненной тяжелыми металлами надземной биомассы растений, так как уборка всей корневой массы, первоначально насыщаемой тяжелыми металлами, практически невозможна [13].

Способность семян прорасти в присутствии высоких концентраций кадмия является одним из критериев отбора видов растений для их использования в фитомелиорации (очистки с помощью растений) загрязненных металлом земель [27, с. 18]. Распространенный метод лабораторной оценки металлоустойчивости видов растений основан на изучении всхожести их се-

мян в присутствии различных концентраций тяжелых металлов [22].

Уже на стадии проращивания семян можно выяснить степень металлоустойчивости, которая будет отражать ремедиационный потенциал будущего растения [11].

Индекс металлоустойчивости каждого растения ( $I_t$ ) рассчитывался по формуле [22]:

$I_t = n_{оп}/n_k * 100\%$ , где  $n_{оп}$  – число проросших семян в опытном варианте,  $n_k$  – число проросших семян в контрольном варианте.

Чем выше значение  $I_t$ , тем выше металлоустойчивость растения и больше его ремедиационный потенциал [11].

Критерием оценки ремедиационного потенциала культур может выступать коэффициент биологического поглощения ( $A_x$ ) тяжелых металлов, расчет которого осуществляется по формуле, предложенной А.И. Перельманом [14]:

$A_x = K_p/K_n$ , где  $K_p$  – концентрация металла в растении,  $K_n$  – концентрация металла в почве.

Гипераккумулятор должен аккумулировать по крайней мере 100 мкг/г (0,01% сухого веса) кадмия [23, С. 551].

В Международном журнале фиторемедиации приводится множество исследований по очистке почвы и воды, загрязненной тяжелыми металлами. В качестве гипераккумуляторов кадмия рассматриваются свекла, седум, перец, рапс, ива, ряска, паслен, табак, гладиолус, целозия, эвкалипт, рис, подсолнечник, кукуруза и др. В качестве наиболее эффективных гипераккумуляторов, которые рекомендованы для фиторемедиации загрязнённых почв, отмечаются паслён черный [36, 37], бархатцы прямостоячие, целозия [31], горчица сарептская [32, 33], резуха [34], сальвия [35]. Овес также рекомендуется для рекультивации почв, загрязненных тяжелыми металлами [16, 24].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Для проведения исследования использовалась методика постановка вегетационного опыта в сочетании с моделированием загрязнения почвы кадмием.

План настоящего исследования включает разные составляющие:

- 1) Исследование влияния кадмия на прорастание семян растений, определение индекса металлоустойчивости.
- 2) Определение фитотоксичности дерново-подзолистой (окультуренной и неокulturенной) почвы и чернозема (окультуренного и неокulturенного) при разных концентрациях кадмия.
- 3) Определение степени поглощения из почвы и накопления кадмия горчицей сарептской.

При проведении опыта использовался хлорид кадмия ( $\text{CdCl}_2$ ). Исследование проводилось при концентрациях кадмия 0,5 мг/л, 1 мг/л, 2 мг/л, 4 мг/л, 8 мг/л, 16 мг/л, 25 мг/л, 50 мг/л, 100 мг/л. Концентрации были выбраны с учетом материалов публикаций [16, 25], а также с учетом кратностей ОДК при разных уровнях загрязнения почвы [1]. Расчет концентраций приведен в приложении 1.

Для проведения исследования использовались дерново-подзолистые супесчаные окультуренные и неокulturенные почвы, черноземы суглинистые с пахотных земель и из лесных массивов. Черноземы занимают 44% территории Рязанской области, дерново-подзолистые почвы – 14% [20]. Отбор дерново-подзолистой почвы для исследования проводился возле с. Агро-Пустынь Рязанского района, чернозема – в юго-западной части Пронского района. На пахотных землях почва отбиралась на глубину пахотного слоя, на лесных участка – на глубину до 25 см в соответствии с методикой [8].

Перед проведением исследования, для уточнения предполагаемых концентраций внесения кадмия, отобранные почвы были сданы на анализ в ла-

бораторию ФГБУ «ЦНМВЛ». Получившиеся результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

## Результаты исследования почвы

Тип почвы	pH KCl	Валовое содержание кадмия, мг/кг	Норматив ОДК <sup>3</sup>
Дерново-подзолистая (лес)	5,4	0,02	не более 0,5
Дерново-подзолистая (окультуренная)	5,3	3,4	не более 0,5
Чернозем (лес)	4,3	2,7	не более 1,0
Чернозем (пашня)	6,4	3,2	не более 2,0

Результаты показывают, что нормативу соответствуют только почвы из лесного массива возле с. Агро-Пустынь. Во всех остальных пробах – кратное превышение ОДК. В связи с этим, набор концентраций для разных почв в опыте различался.

При этом на окультуренных почвах содержание кадмия существенно выше, чем на неокulturенных, что наиболее сильно выражено для дерново-подзолистых почв.

Для исследования прорастания семян в чашки Петри размещалась в два слоя фильтровальная бумага, смачивалась раствором  $\text{CdCl}_2$  (в дистиллированной воде) в концентрациях кадмия 0,5 мг/л, 1 мг/л, 2 мг/л, 4 мг/л, 8 мг/л, 16 мг/л, 25 мг/л, 50 мг/л, 100 мг/л. В контрольных вариантах использовалась дистиллированная вода.

На бумаге размещались семена растений редька масличная (*Brassica gara*, сем. Крестоцветные), горчица сарептская (*Brassica juncea*, сем. Крестоцветные), шалфей поникающий (*Salvia nutans*, сем. Губоцветные), бархатцы прямостоячие (*Tagetes erecta*, сем. Сложноцветные), целозия гребенчатая (*Celosia cristata*, сем. Амарантовые), резуха альпийская (*Arabis alpina*, сем. Крестоцветные), овес посевной (*Avena sativa*, сем. Злаковые) (см. приложе-

<sup>3</sup> В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

ние 2). Растения были выбраны, исходя из литературных данных о том, что они являются гипераккумуляторами кадмия, представляют разные семейства.

Всего было заложено 70 вариантов опыта по 100 семян в 4 повторностях. Опыт проводился в период с 1 июня по 15 июля 2022 года.

Проращивание семян и учет результатов проводились в соответствии с методикой, согласно ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести» и ГОСТ 24933.0-81 «Семена цветочных культур. Правила приемки и методы отбора проб». Проращивание проводилось на бумаге, в темноте (для шалфея поникающего – на свету). Определялись энергия прорастания и всхожесть в установленные сроки [4, 5] (см. приложение 3). Энергия прорастания семян – это процент проросших семян за определенный срок. Всхожесть – это количество нормально проросших семян, выраженное в процентах к пробе, взятой для анализа. К нормально проросшим относятся семена, которые имеют корешок не менее длины семени и росток не менее половины длины семени [4].

Также рассчитывался индекс металлоустойчивости каждого растения ( $I_t$ ) по формуле [22]:

$$I_t = n_{\text{оп}} / n_{\text{к}} * 100\%, \text{ где}$$

$n_{\text{оп}}$  – число проросших семян в опытном варианте,

$n_{\text{к}}$  – число проросших семян в контрольном варианте.

При разработке схемы проведения эксперимента по фитотоксичности загрязненных почв применялась международная методика, адаптированная в ГОСТ Р ИСО 22030-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений» [6]. Указанный стандарт описывает метод оценки качества почв различного происхождения, содержащих неизвестные загрязнения. Метод может также применяться для измерения токсичности известных химических соединений в почве. Токсичность химических веществ в почвах для процессов развития и репродуктивного потенциала высших растений оценивается биотестированием в условиях хронического загрязнения. Хлорид кадмия в рассчитанной для каждой

концентрации массе добавлялся в просеянную почву, тщательно перемешивался. Вегетационные сосуды заполнялись почвенными смесями до уровня, примерно на 1 см ниже верхнего края. Сразу после заполнения сосудов почвой было высажено по десять одинаковых непротравленных семян выбранных растений. ГОСТ Р ИСО 22030-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений» рекомендует использование двух видов растений: быстрорастущая редька масличная (*Brassica rapa*) и овес (*Avena sativa*). В нашем эксперименте использовалась также горчица сарептская (*Brassica juncea*). Семена высаживались пинцетом на глубину от 5 мм до 10 мм для редьки масличной и горчицы сарептской и от 10 до 15 мм для овса посевного и увлажнялись дистиллированной водой. Схема опыта приведена в приложении 5. Каждый вариант был заложен в 4 повторностях. С учетом требования ГОСТ Р ИСО 22030-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений» о том, что продолжительность опытов должна быть достаточна для достижения конечных точек при определении способности тест-растений к размножению, опыт проводился с середины июля до конца ноября 2022 года. С середины октября в опыте использовались фитолампы для увеличения продолжительности светового дня (не менее 16 часов).

Высевалось по десять семян в каждый из четырех вегетационных сосудов. Прореживалось до восьми растений в каждом сосуде (на 7-й день) и собиралось по четыре растения на 14-й день и в конце опыта. В ходе опыта измерялись параметры прорастания, роста и размножения растений. Для предотвращения влияния неравномерного освещения, температуры, влажности или вентиляции на рост растений сосуды регулярно переставлялись случайным образом 2 раза в неделю. С началом цветения для растений редьки масличной и горчицы сарептской проводилось искусственное опыление с помощью ватной палочки.

В каждом сосуде отмечалось появление всходов, дата появления 50%

всходов в контрольных сосудах. На 14-й день после появления всходов в контрольных сосудах в каждом сосуде оставляли четыре растения для окончательного сбора и определяли следующие точки:

- наличие бутонов (кроме овса);
- количество цветов на одно растение (кроме овса);
- сырую массу на одно растение;
- процент живых растений (к количеству растений после прореживания);
- количество поврежденных растений (пожелтевших, увядших и т.д).

При окончательном сборе растения срезались на уровне поверхности почвы и определялись следующие конечные точки:

- стадия развития в соответствии со схемой ВВСН;
- общее число цветов на растении (кроме овса);
- количество стручков с фертильными семенами (визуально раздутые) (кроме овса);
- сырая масса побегов/длина надземной части растений;
- сырая масса бутонов (овес) или стручков;
- доля мертвых растений (в процентах к количеству растений после прореживания).

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ.**

В результате исследования было установлено, что наименьшее влияние повышенные концентрации кадмия оказали на энергию прорастания и всхожесть у горчицы сарептской, целозии гребенчатой и редьки масличной (рис. рис 1, 2). Можно отметить, что повышение концентраций кадмия до 8 мг/л не повлияло на всхожесть овса. На энергию прорастания в целом увеличение концентрации кадмия оказало большее влияние, чем на всхожесть.

Индекс металлоустойчивости также показывает высокую устойчивость всех исследуемых растений при высоких концентрациях (таблица 2, рис. 3).

Индекс металлоустойчивости ( $I_t$ )

Культуры	Концентрация кадмия, мг/л								
	0,5	1	2	4	8	16	25	50	100
Редька масличная	100	100	100	100	100	100	100	73	73
Горчица сарептская	100	100	100	100	100	100	99	96	92
Овес посевной	100	100	100	100	100	94	86	80	80
Шалфей поникающий	100	96	96	80	81	81	32	34	26
Бархатцы прямостоя- чие	101	101	101	95	86	79	76	72	72
Целозия гребенчатая	100	98	98	98	95	95	95	95	84
Резуха альпийский	100	101	101	89	85	85	80	69	63

Исследование показало, что все выбранные растения отличаются высокой металлоустойчивостью при концентрациях кадмия до 16 мг/л. При этом, наиболее высокие значения отмечены для представителей семейства Крестоцветных. Наибольшей металлоустойчивостью отличается горчица сарептская. Очень высокий индекс отмечен при высоких концентрациях кадмия у целозии гребенчатой и овса посевного. Для шалфея поникающего при концентрации кадмия от 25 мг/л индекс металлоустойчивости резко снижается – более чем в 2,5 раза. Для бархатцев прямостоячих и резухи альпийской индекс металлоустойчивости при концентрациях кадмия до 2 мг/л оказался больше 100%. Такие данные отражают явление гормезиса – улучшения прорастания семян при малых концентрациях химических веществ, обладающих токсичностью при использовании в больших количествах, по сравнению с контролем [6].

Таким образом, исследование показало наибольший ремедиационный потенциал в отношении кадмия у горчицы сарептской, редьки масличной, овса посевного, то есть, сельскохозяйственных растений.



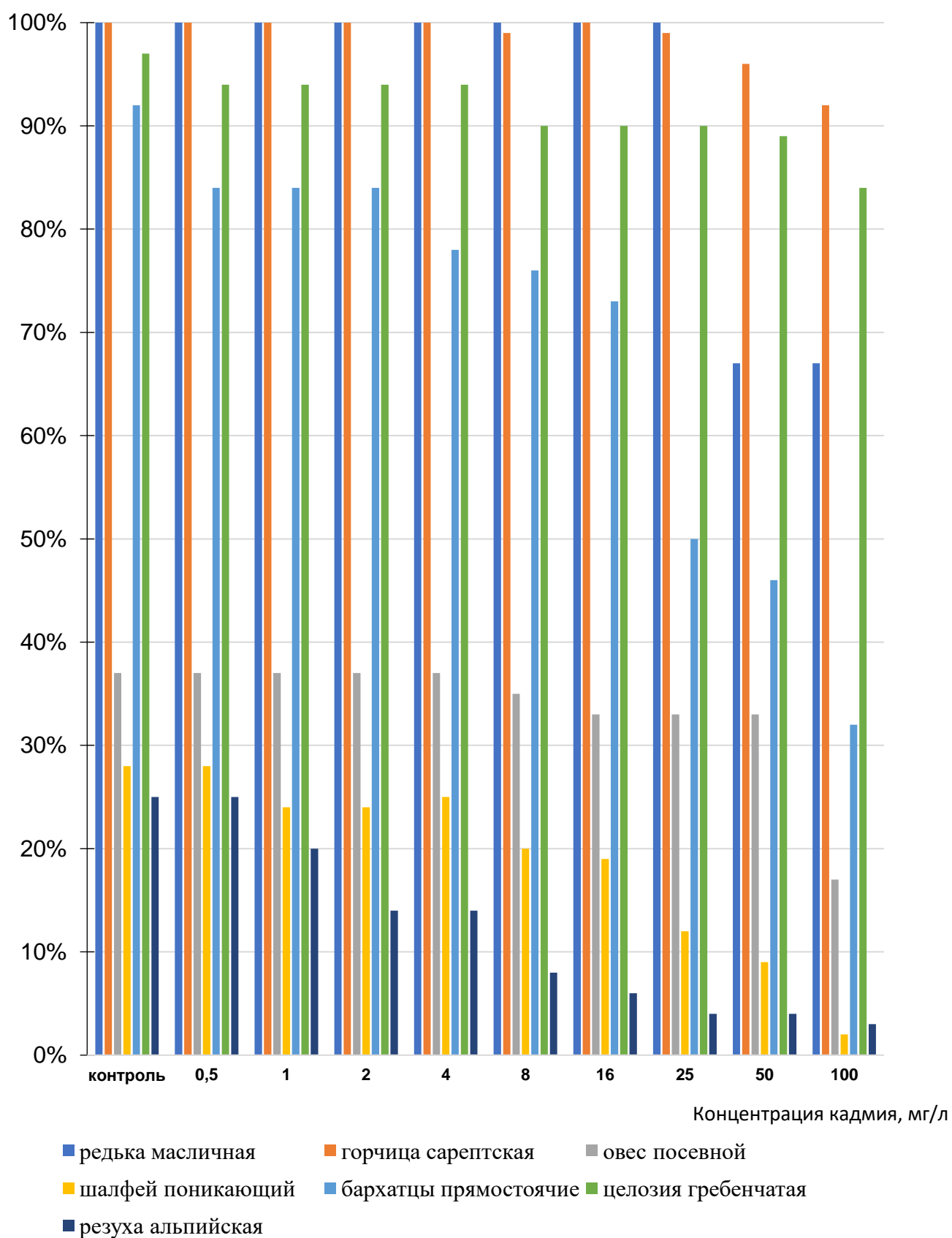


Рис. 1. Энергия прорастания семян.

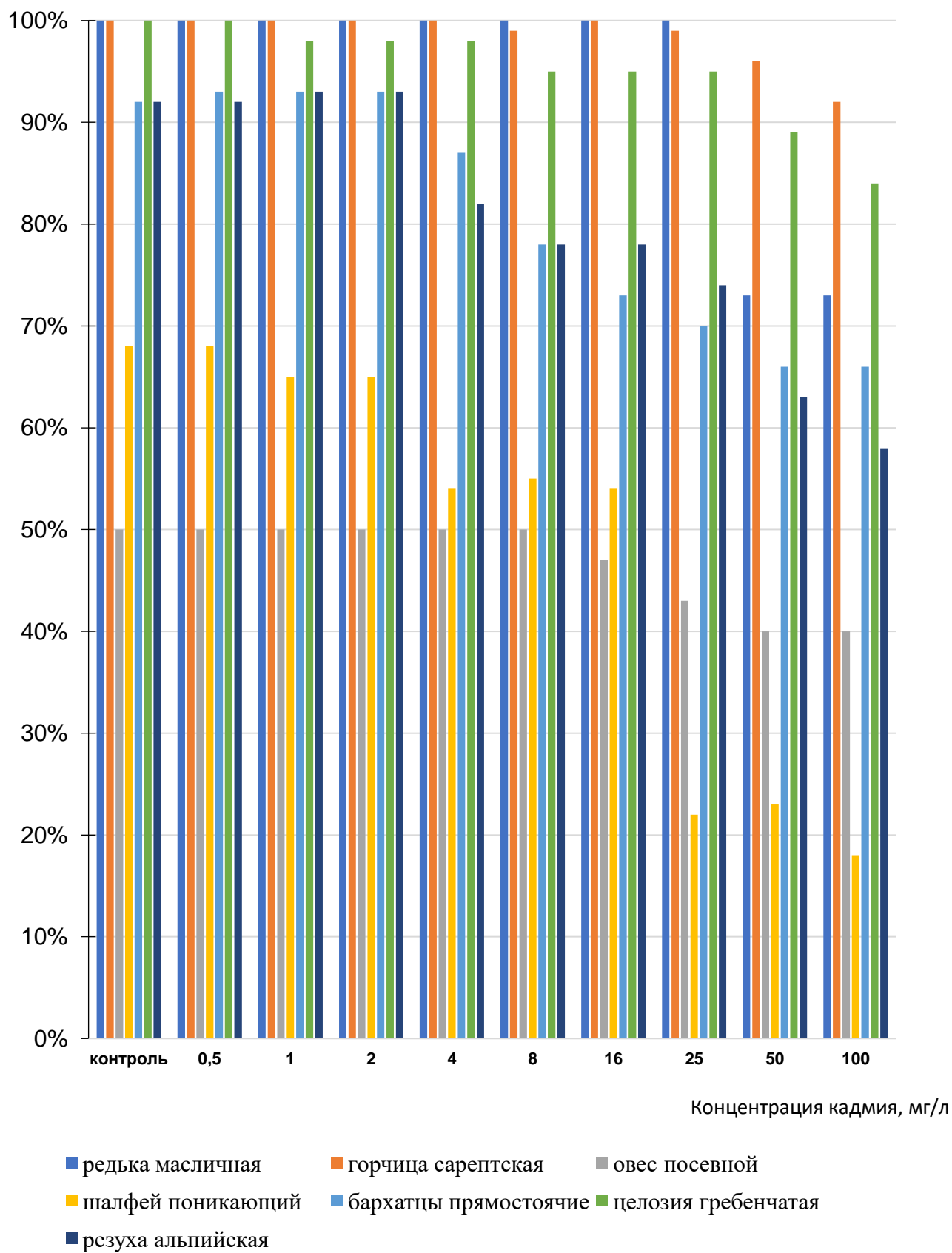


Рис. 2. Всхожесть семян.

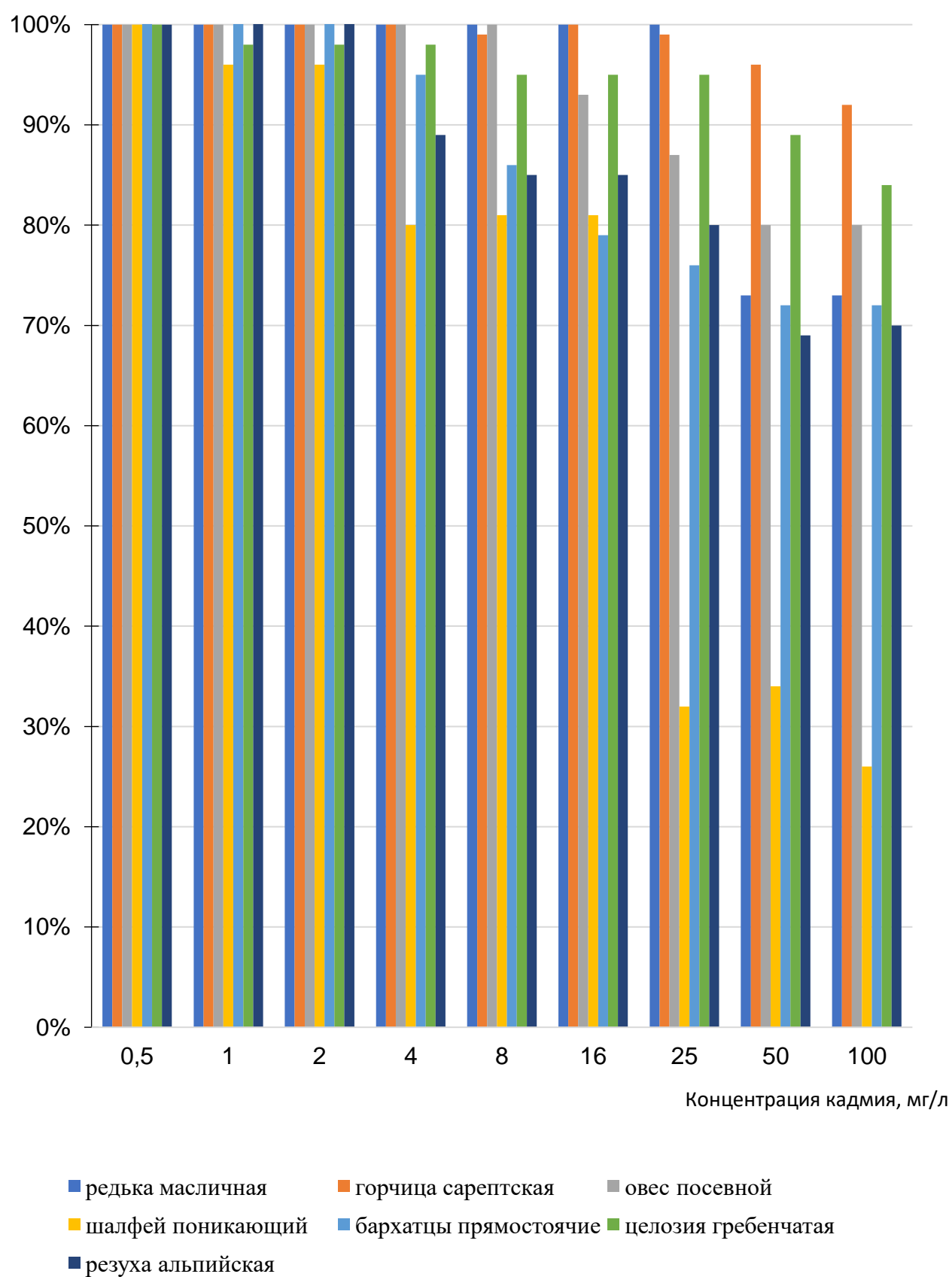


Рис. 3. Индекс металлоустойчивости.

При этом, снижение  $I_t$  отмечается только при высоких концентрациях кадмия – от 16 мг/кг для овса, от 50 мг/кг для редьки масличной.

Исходя из полученных данных, исследованные цветочные культуры также могут использоваться в целях ремедиации, например, в городском озеленении, даже при высоком уровне загрязнения.

Из наиболее устойчивых к кадмию растений для продолжения опыта были выбраны редька масличная, овес посевной и горчица сарептская, так как они возделываются в сельском хозяйстве и используются в пищу. Накопление кадмия из почвы этими растениями может привести к поступлению его по пищевым цепям к человеку.

С учетом того, что влияние кадмия больше проявляется на стадии роста проростков, чем на стадии прорастания семян [16, 27], у выбранных растений были измерены длины проростков в день определения всхожести. Можно отметить, что и у других растений визуально проростки при высоких концентрациях кадмия сильно отличались от контрольных вариантов (см. приложение 6).

Полученные данные были статистически обработаны с расчетом критерия Стьюдента (в расчетах использовался уровень значимости 0,05).

Наименьшие отклонения от средних величин контрольного варианта (рис. 4) отмечены для редьки масличной – не более 20%, то есть, отмечается наименьшее токсическое влияние кадмия.

По данным расчета критерия Стьюдента для редьки масличной достоверная разница с контролем отмечена при увеличении концентрации кадмия в растворе до 4 мг/л (и выше). Дальнейшее увеличение концентрации при общем уменьшении средней величины проростка не вызвало статистически достоверной разницы между каждой из концентраций.

Для овса посевного, также при общем уменьшении длины проростков при увеличении концентрации кадмия, статистически достоверным оказалось различие при увеличении концентрации кадмия до 2 мг/л (и выше), а также при увеличении концентрации от 16 мг/л до 25 мг/л.

Для горчицы сарептской результаты оказались иными. Не отличались статистически только средние величины при увеличении концентрации до 0,5 мг/л. Все остальные увеличения концентраций кадмия привели к достоверным отличиям.

В вегетационном опыте (см. приложение 7) у редьки масличной во всех вариантах сразу появилось не менее 50% всходов, за исключением концентраций 50 мг/кг и 100 мг/кг на окультуренном черноземе, где 50% всходов не было (см. приложение 8). Также для горчицы сарептской отмечались дружные всходы во всех вариантах на один день позже редьки. У овса всходы появились позднее всего – через 3 дня после посева. При этом 50% всходов отмечалось на 1-2 дня (на неокультуренной дерново-подзолистой почве – на 3-4 дня) позже, а на черноземе окультуренном вообще 50% всходов не было.

По показателям роста и развития растений, которые фиксировались на 14-й день после всходов в контрольных вариантах (см. приложение 9), можно сделать следующие промежуточные выводы. Для редьки масличной в контрольных вариантах минимальная масса одного растения отмечена на дерново-подзолистой неокультуренной почве (рис. 5). На окультуренном черноземе уже с контроля отмечена гибель части растений и повреждение всех оставшихся. При возрастании концентрации кадмия на дерново-подзолистой неокультуренной почве от 1 мг/кг отмечается снижение массы растения и повреждение всех растений. Для всех почв, кроме окультуренного чернозема, отмечаются повышения массы растения по сравнению с контролем в отдельных вариантах при общем снижении при повышенных концентрациях. При этом с концентрации кадмия с 8 мг/кг отмечается повреждение растений на дерново-подзолистой неокультуренной почве, с 50 мг/кг – на неокультуренном черноземе. Бутоны и цветы отмечены единично только на дерново-подзолистой неокультуренной почве в контрольном варианте.

Для горчицы сарептской также уже с контроля на окультуренном черноземе отмечается гибель и повреждение растений. Минимальная масса одного растения отмечена также на окультуренном черноземе (рис. 6). Сниже-

ние массы и повреждение растений на дерново-подзолистой неокультуренной почве фиксируется с концентрации кадмия 2 мг/кг. Начиная с концентрации кадмия 4 мг/кг общее снижение массы растения отмечено для всех вариантов. Бутоны и цветы отмечены во всех вариантах на дерново-подзолистой неокультуренной почве и неокультуренном черноземе при снижении их количества при повышении концентраций кадмия.

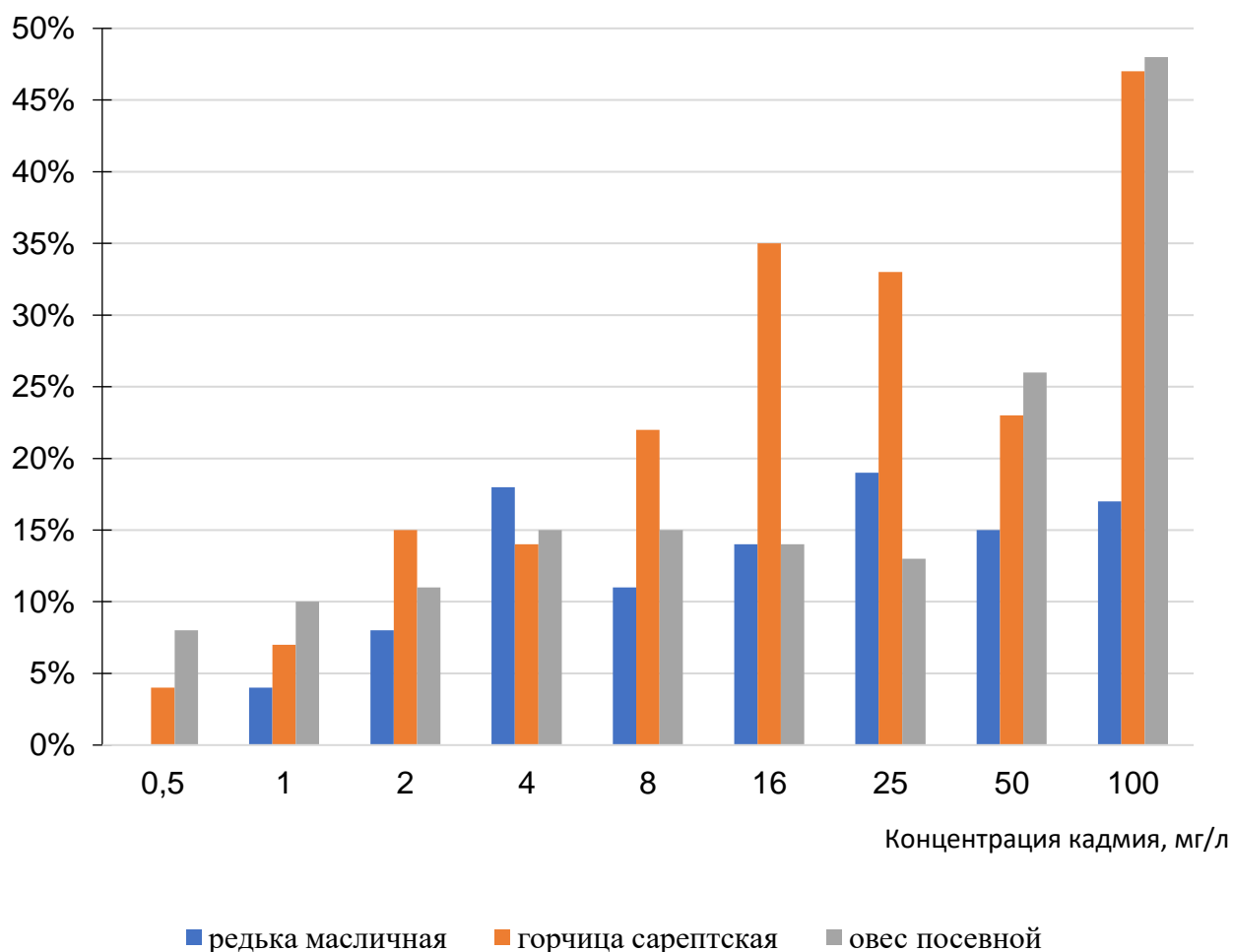


Рис. 4. Отклонения от средних величин контрольных вариантов длин проростков.

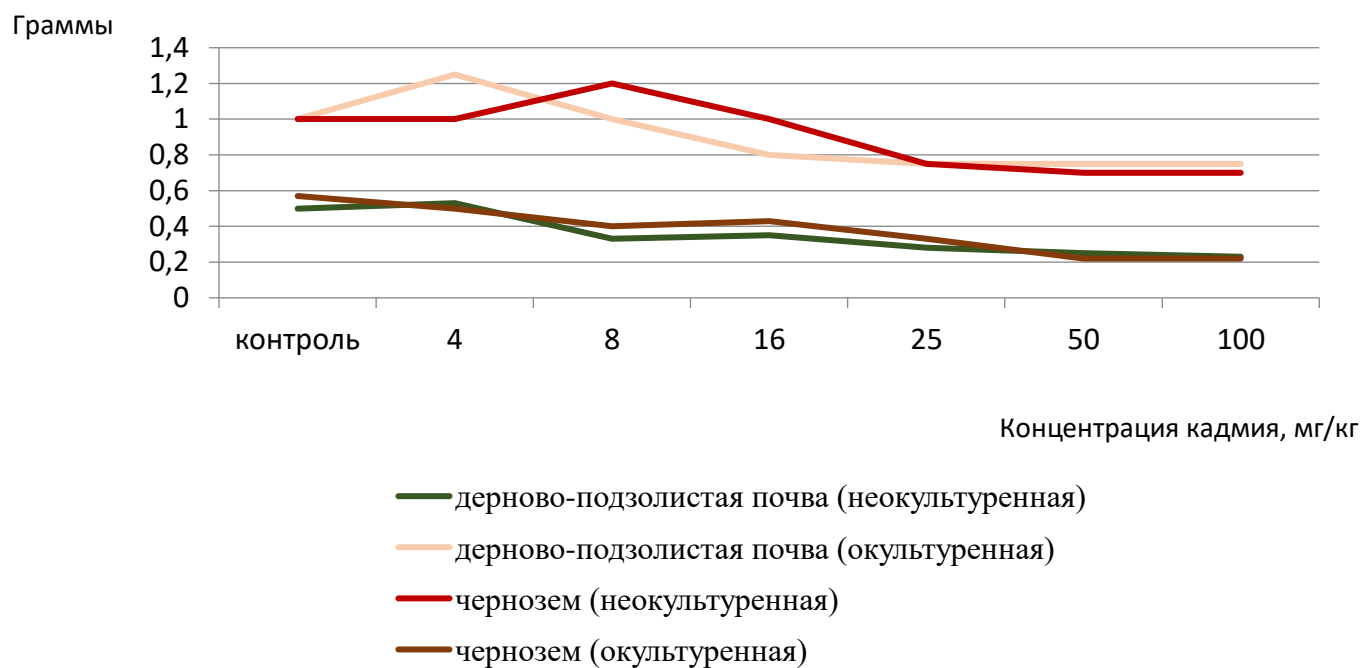


Рис. 5. Масса одного растения редьки масличной (промежуточный результат), грамм.

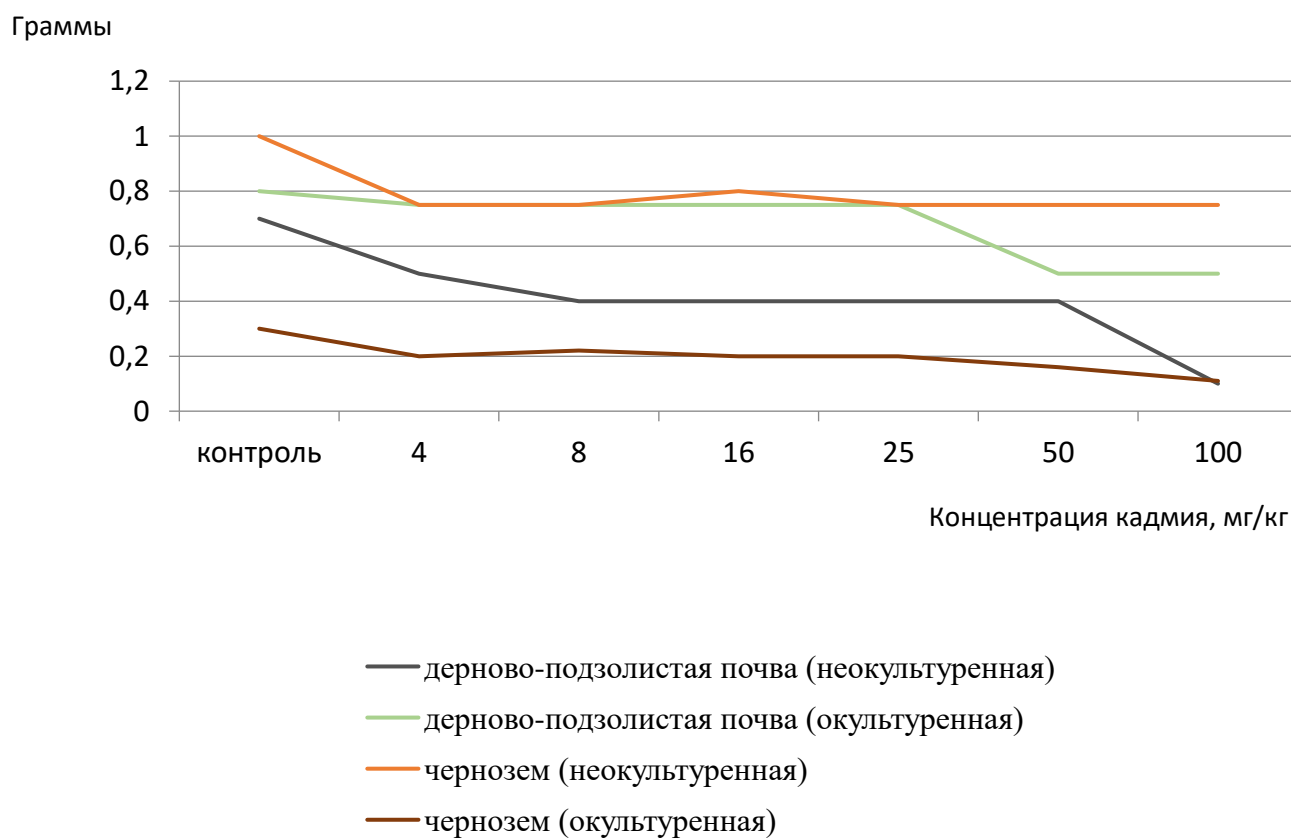


Рис. 6. Масса одного растения горчицы сарептской (промежуточный результат), грамм.

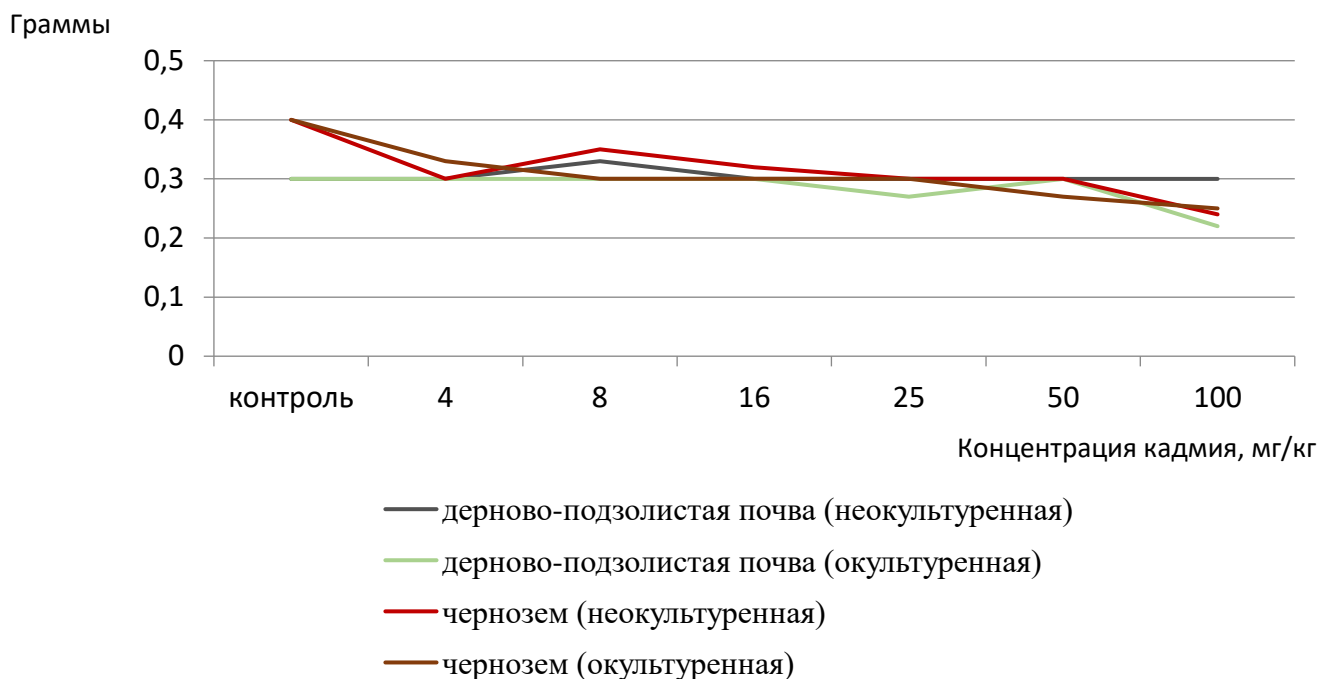


Рис. 7. Масса одного растения овса посевного (промежуточный результат), грамм.

У овса посевного существенных изменений массы одного растения по вариантам не отмечено, однако, повышение концентраций кадмия с 4 мг/кг (а для дерново-подзолистой неокультуренной почвы – с 0,5 мг/кг) ведет к снижению всхожести и повреждению растений (рис. 7).

Окончательные данные, полученные при исследовании фитотоксичности разных типов почв при разных концентрациях кадмия (для редьки масличной и горчицы сарептской измерение проводилось в конце октября, для овса посевного – в конце ноября), также показывают минимальные массу и длину побегов в контроле на дерново-подзолистой неокультуренной почве, максимальные – на черноземе неокультуренном. Наиболее сильно выражены различия между вариантами на дерново-подзолистой неокультуренной и дерново-подзолистой окультуренной почвах (см. приложение 10). При этом необходимо отметить, что из подсчета результатов исключены все варианты на черноземе окультуренном, так как в отдельных контрольных вариантах не было 75% всходов, на 14-й день все растения контрольных вариантов оказа-



лись повреждены либо погибли, не достигнув генеративных фаз. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 22030-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений» при таких результатах метод не применяется.

Определение контрольных точек для редьки масличной показывает на дерново-подзолистой неокультуренной почве увеличение массы побега при увеличении концентраций кадмия до 4 мг/кг. Длина побега при этом снижается. Длина побега уменьшается с дальнейшим ростом концентрации кадмия. На дерново-подзолистой окультуренной почве масса и длина побега уменьшаются с ростом концентрации кадмия. На черноземе неокультуренном масса побега снижается до концентрации 16 мг/кг, снижение длины побега выражено сильнее (рис. 8, 9). Фертильные стручки наблюдаются только в контрольных вариантах и до концентрации 1 мг/кг на дерново-подзолистой неокультуренной почве. При этом масса фертильных стручков в варианте с концентрацией кадмия 1 мг/кг в 30 раз меньше, чем в контроле и при концентрации 0,5 мг/кг. С концентрации кадмия 25 мг/кг на дерново-подзолистой почве (неокультуренной и окультуренной) генеративные органы не развиты. На черноземе неокультуренном генеративных органов нет только в концентрации 100 мг/кг (см. приложение 10).

Для горчицы сарептской на дерново-подзолистой неокультуренной почве масса и длина побегов также увеличивается до концентрации 2 мг/кг, а затем практически не изменяется. На дерново-подзолистой окультуренной почве масса и длина побега уменьшается с ростом концентрации до значения 25 мг/кг, затем не меняется. На черноземе неокультуренном масса и длина побегов уменьшаются с ростом концентраций, что наиболее заметно с концентрации 8 мг/кг (рис. 10, 11). Генеративные органы сформированы во всех вариантах, но фертильные стручки на дерново-подзолистой почве (неокультуренной и окультуренной) отсутствуют, начиная с концентрации кадмия 16 мг/кг, на черноземе неокультуренном – с 50 мг/кг. Масса фертильных стручков существенно снижается с ростом концентрации кадмия, что

особенно сильно (до 3 раз) выражено между вариантами на дерново-подзолистой неокультуренной и дерново-подзолистой окультуренной почвами (см. приложение 10).

Для овса посевного на дерново-подзолистой неокультуренной почве наиболее выражено снижение массы и длины побегов с ростом концентрации, начиная с концентрации кадмия 8 мг/кг. На дерново-подзолистой окультуренной почве снижение массы побега заметно только по сравнению с контролем, а с ростом концентрации от 4 мг/кг масса побегов не снижается до концентрации 100 мг/кг, но длина побегов уменьшается. Также отмечается уменьшение длины побегов с ростом концентрации кадмия на черноземе неокультуренном (рис. 12, 13). Генеративные органы не развиты только на вариантах при концентрации кадмия 100 мг/кг на дерново-подзолистой почве. При этом масса бутонов существенно (до 3 раз) снижается с ростом концентраций кадмия от контроля до 4 мг/кг, дальше практически не изменяется (см. приложение 10).

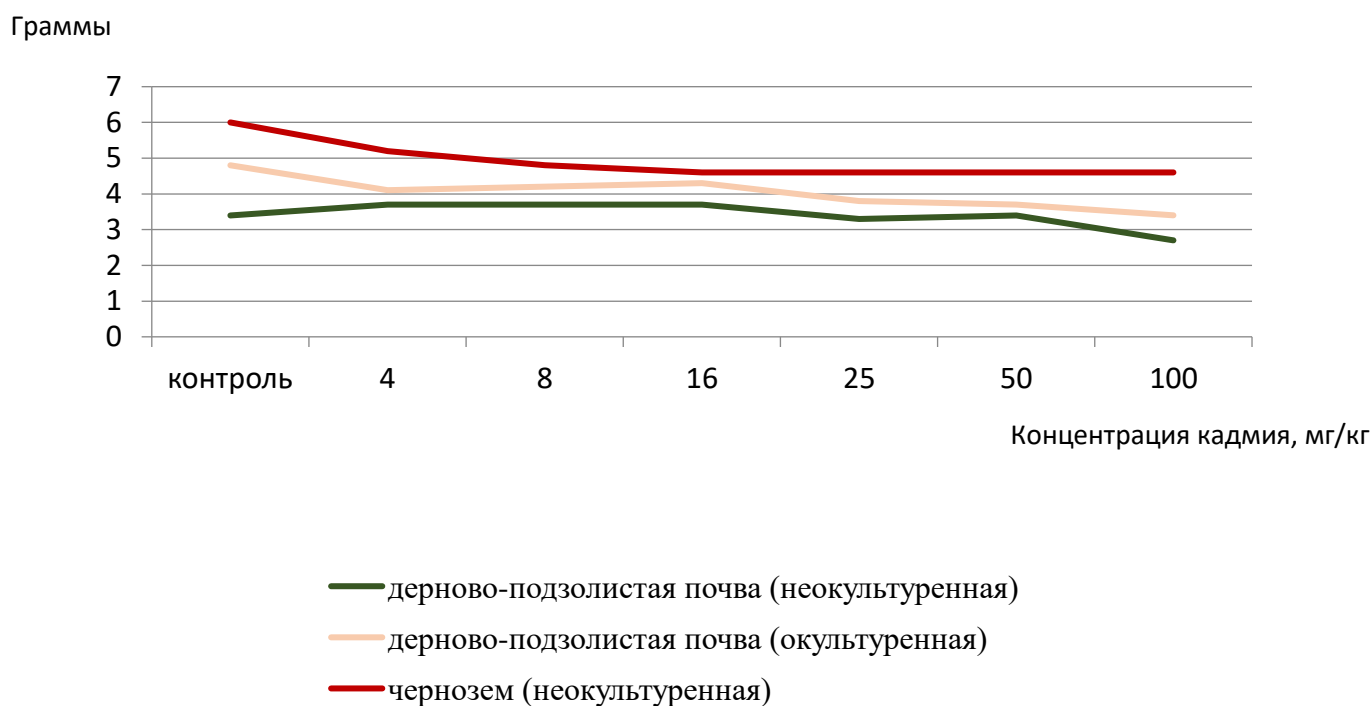


Рис. 8. Средняя масса одного растения редьки масличной (окончательный результат), грамм.

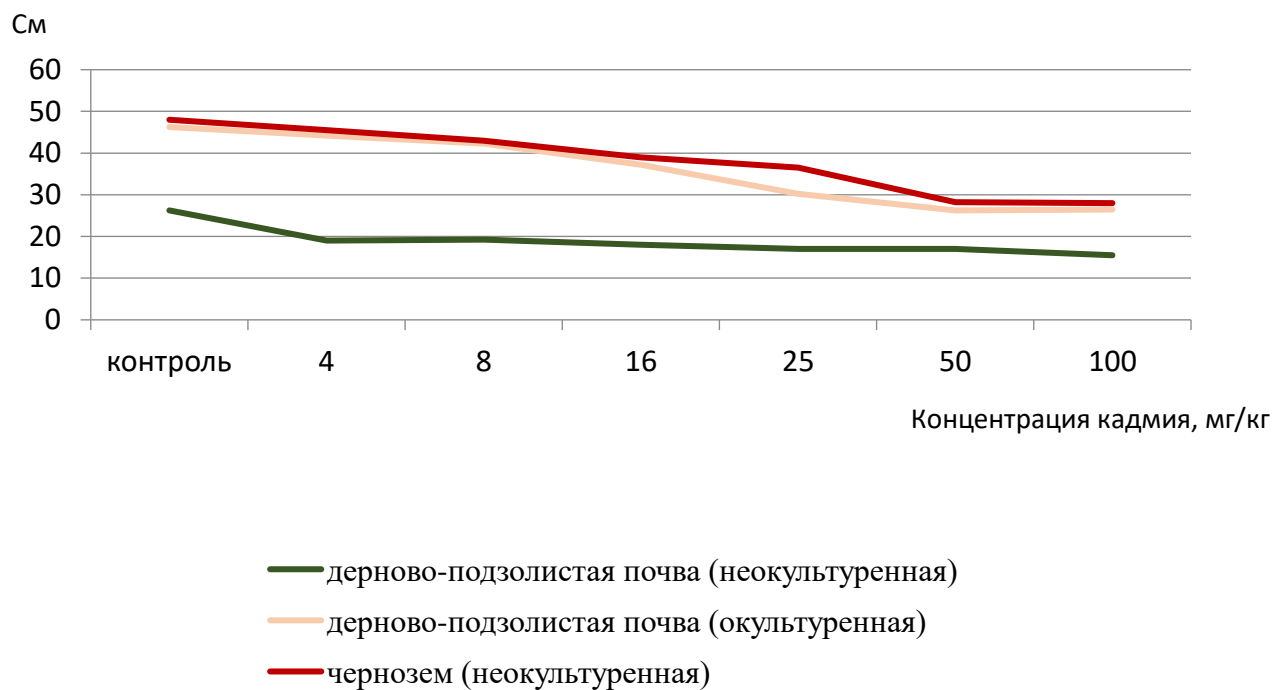


Рис. 9. Средняя длина побега редьки масличной (окончательный результат), см.

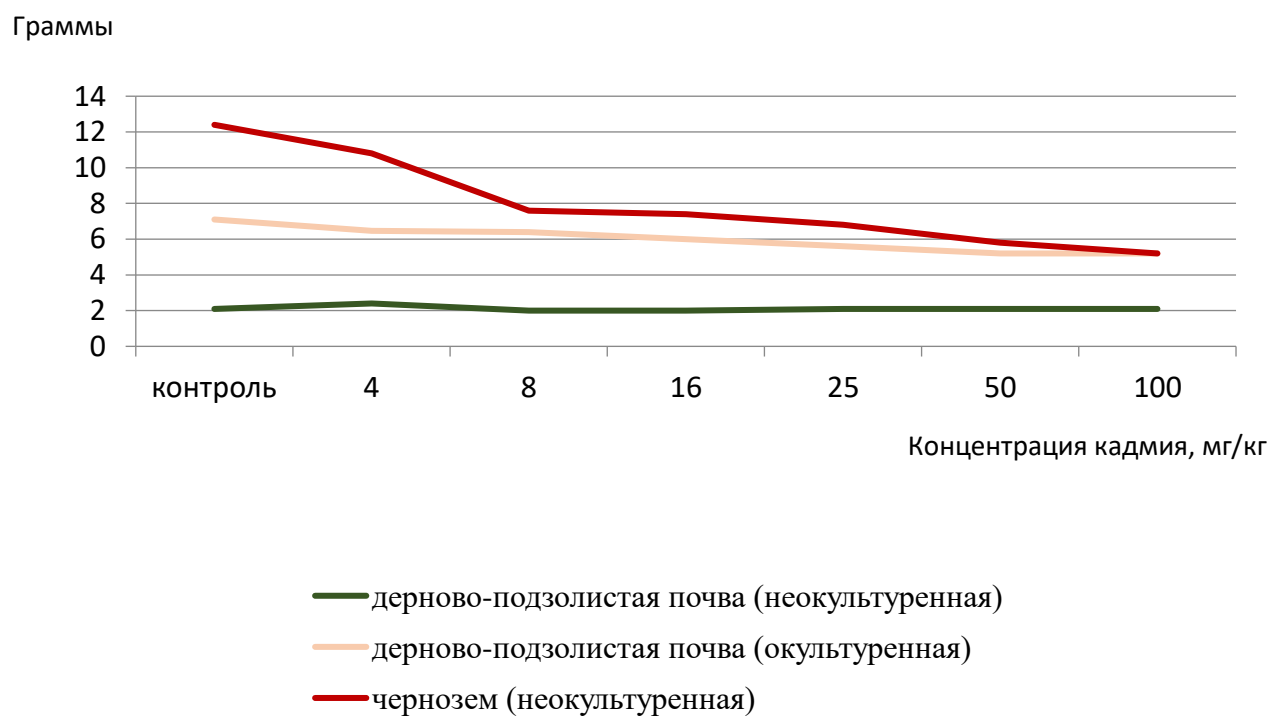


Рис. 10. Средняя масса одного растения горчицы сарептской (окончательный результат), грамм.

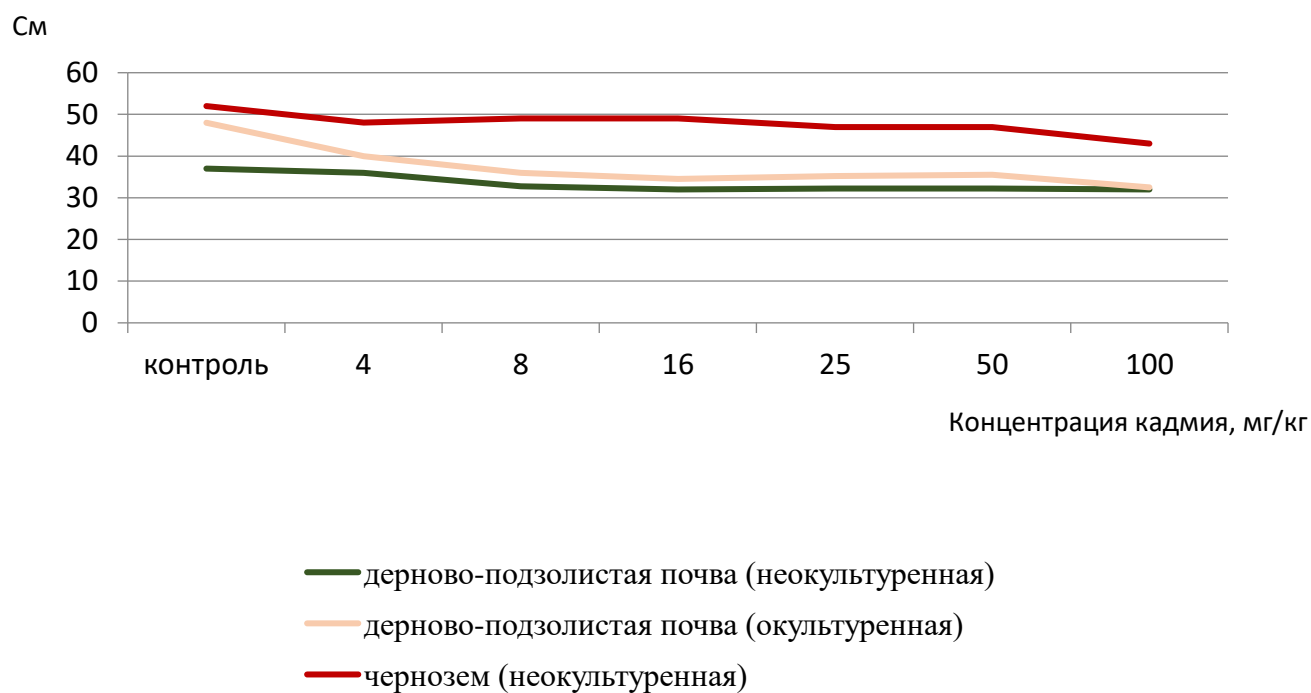


Рис. 11. Средняя длина побега горчицы сарептской (окончательный результат), см.

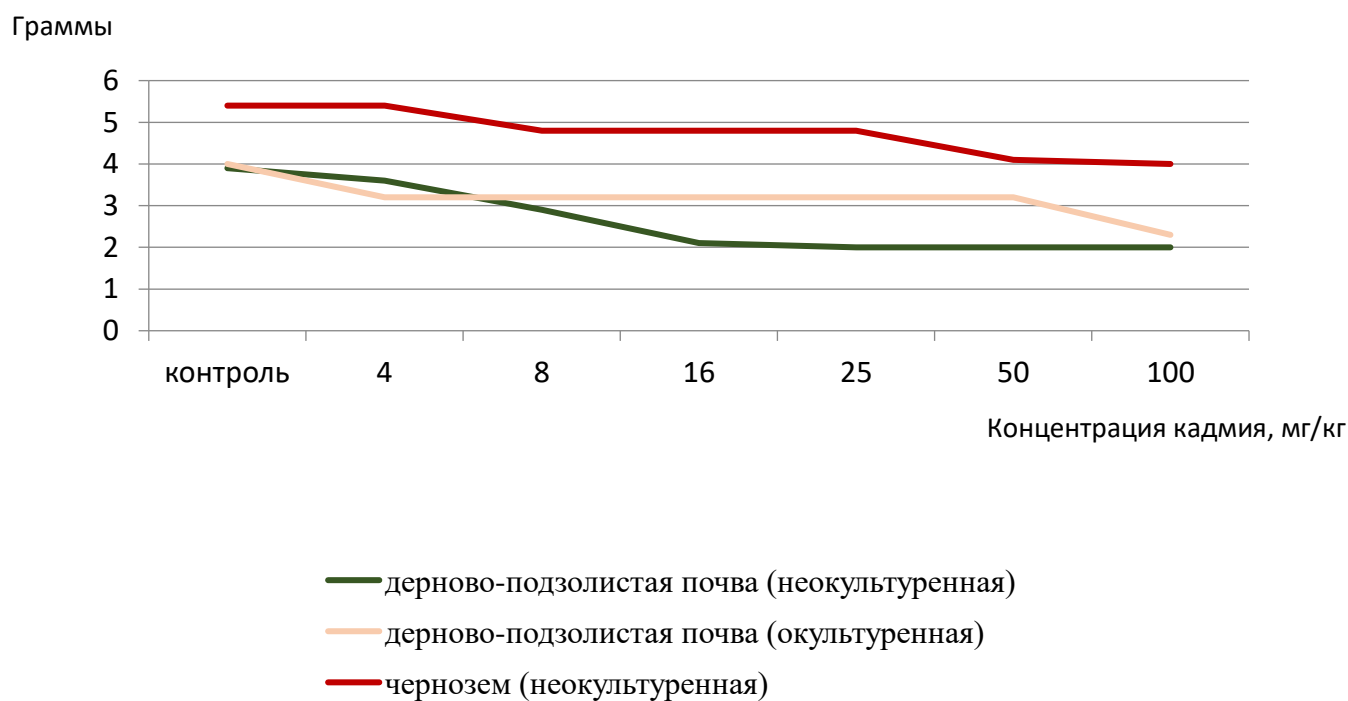


Рис. 12. Средняя масса одного растения овса посевного (окончательный результат), грамм

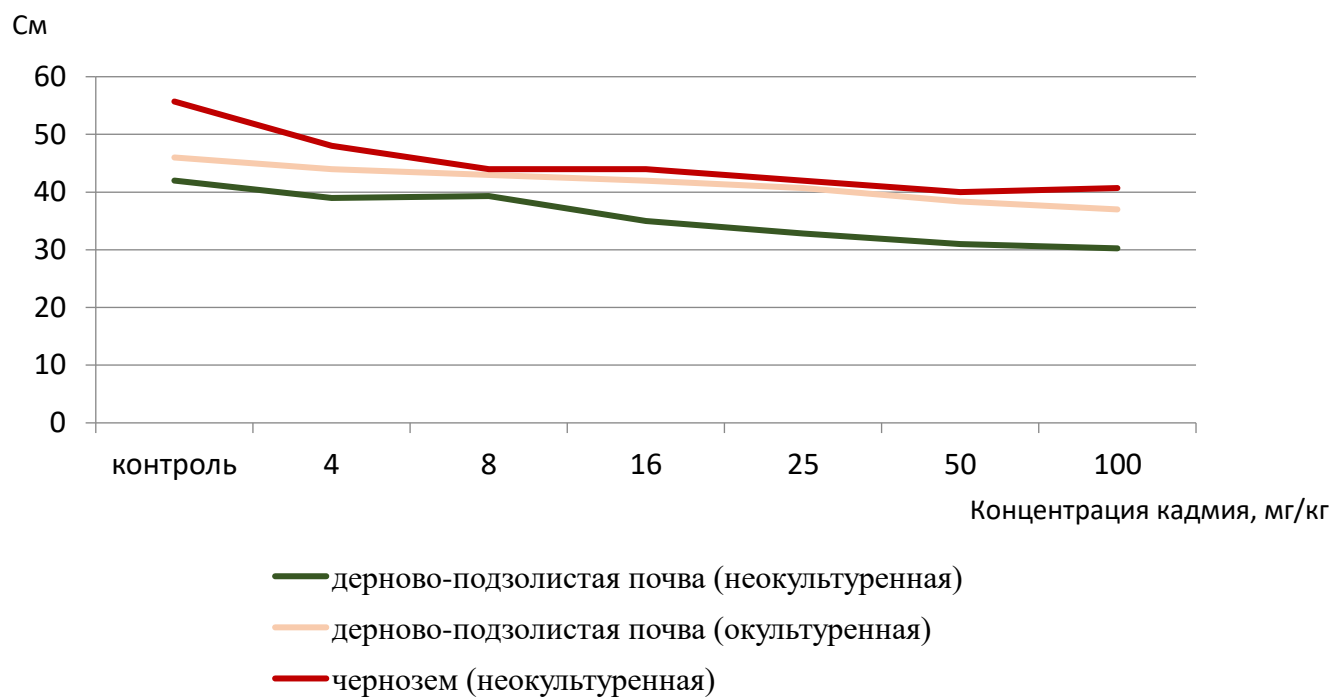


Рис. 13. Средняя длина побега овса посевного (окончательный результат), см.

## ВЫВОДЫ.

1. В условиях вегетационного опыта была определена степень металлоустойчивости растений разных видов: редька масличная (*Brassica rapa*, сем. Крестоцветные), горчица сарептская (*Brassica juncea*, сем. Крестоцветные), шалфей поникающий (*Salvia nutans*, сем. Губоцветные), бархатцы прямостоячие (*Tagetes erecta*, сем. Сложноцветные), целозия гребенчатая (*Celosia cristata*, сем. Амарантовые), резуха альпийская (*Arabis alpina*, сем. Крестоцветные), овес посевной (*Avena sativa*, сем. Злаковые). Для всех растений был установлен высокий индекс металлоустойчивости при концентрациях кадмия, которые встречаются в почвах Рязанской области, а также при повышенных концентрациях кадмия.

2. Наиболее высоким оказался индекс металлоустойчивости у сельскохозяйственных растений. Из цветочных культур наиболее перспективной оказалась целозия гребенчатая. Отмечено существенное снижение индекса металлоустойчивости у шалфея поникающего при высоких концентрациях кадмия – от 25 мг/кг.

3. Промежуточные результаты показывают, что повышение концентрации кадмия на разных типах почв ведет к снижению массы растения. На дерново-подзолистых неокультуренных почвах токсическое влияние кадмия проявляется сильнее. На 14 день исследования бутоны и цветки развиты у горчицы сарептской на дерново-подзолистой неокультуренной почве и неокультуренном черноземе, при этом их количество уменьшается при увеличении концентрации кадмия. Сильнее всего увеличение концентрации кадмия сказывается на растениях овса, приводя к снижению всхожести и повреждению растений.

При сравнении конечных точек также отмечается общее отрицательное влияние повышения концентраций кадмия в почве, что более выражено для длины побегов. При этом, для генеративных органов повышение концентра-

ции кадмия является более значимым для всех исследуемых вариантов и даже приводит к отсутствию фертильных стручков у редьки масличной.

4. Исходя из промежуточных результатов, наиболее токсичной почвой для всех растений оказался чернозем окультуренный, даже без дополнительного загрязнения. Фитотоксичность разных типов почв при повышении концентраций кадмия по-разному проявилась на разных растениях. Наименьшее влияние повышение концентраций кадмия в почве оказало на растения горчицы сарептской.

Для завершения работы планируется исследовать способность к накоплению кадмия у горчицы сарептской. Выбор горчицы сарептской для дополнительного исследования связан с тем, что это растение считается одним из лучших аккумуляторов кадмия и, в то же время, является признанным сидератом. То есть, с одной стороны, горчицы сарептская может использоваться для аккумуляции кадмия с целью фиторемедиации почв, а с другой – рекомендуется после выращивания заделывать зеленую массу горчицы сарептской в почву. В связи с этим, исследованием предполагается определить коэффициент биологического поглощения кадмия для горчицы сарептской с целью оценки целесообразности ее использования в качестве сидерата на почвах, содержание кадмия в которых превышает допустимые уровни. Расчет коэффициента биологического поглощения будет выполнен по формуле, предложенной А.И. Перельманом:  $A_x = K_p / K_n$ , где  $K_p$  – концентрация металла в растении,  $K_n$  – концентрация металла в почве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации от 27 декабря 1993 года №04-25/Комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 27 декабря 1993 года №61-5678 «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами».
2. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
3. ГОСТ 33980-2016 «Продукция органического производства. Правила производства, переработки, маркировки и реализации».
4. ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».
5. ГОСТ 24933.0-81 «Семена цветочных культур. Правила приемки и методы отбора проб».
6. ГОСТ Р ИСО 22030-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений».
7. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год. – Москва, Росгидромет, 2022. – 220 с.
8. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Утверждены Минсельхозом РФ 10 марта 1992 года.
9. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л.:Агропромиздат, 1987. – 142 с.
10. Гармаш Н.Ю. Тяжелые металлы и качество зерна пшеницы//Химия в сельском хозяйстве, 1985. - №6. – С. 48-49.
11. Данилова Е.В., Гальченко С.В. Методика изучения ремедиационного потенциала декоративных растений, используемых для озеленения урбанизированных территорий //Новые технологии в учебном процессе и производстве. Материалы XV Межвузовской научно-технической конференции. – Рязань, 2017. – С. 278-280.
12. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Очистка почв от тяжелых металлов с помощью растений//Вестник Российской Академии Наук, 2008, т. 78, №3. – С. 247-249.
13. Гальченко С.В., Мажайский Ю.А., Гусева Т.М., Чердакова А.С. Фиторемедиация городских почв, загрязненных тяжелыми металлами, декоративными цветочными культурами//Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. 2015. №4(49). - С. 144-153.



14. Гальченко С.В., Чердакова А.С. Накопление тяжелых металлов декоративными цветочными культурами//Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2021): Материалы XVII Международной научно-технической конференции: в 2 томах [Электронный ресурс]/Уфимск. гос. авиац.техн.ун-т. – Уфа: УНАТУ, 2021. URL:[http://www.ugatu.su/media/uploads/El\\_izd/2021-145.pdf](http://www.ugatu.su/media/uploads/El_izd/2021-145.pdf). Дата обращения 25.08.2022.

15. Зырин Н.Г., Каплунова Е.В., Сердюкова А.В. Нормирование содержания тяжелых металлов в системе почва-растение//Химия в сельском хозяйстве, 1985. - №6. – С. 45-48.

16. Ильинский А.В., Мажайский Ю.А., Ляпкало А.А. Оценка влияния степени загрязнения черноземов тяжелыми металлами на экологическое состояние растениеводческой продукции//Влияние природных и антропогенных факторов на социозкосистемы./ Под ред. профессора А.А. Ляпкало. – Рязань, 2002. – С. 25-34.

17. Ильинский А.В., Матюхин Р.И. Оценка токсичности тяжелых металлов на ранней стадии онтогенеза овса / Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий: Сб.науч.тр./Мещерский филиал ГНУ ВНИИГиМ/Под общ. ред. Ю.А. Мажайского. – Рязань, 2004. – 666 с. – С. 451-454.

18. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 439 с.

19. Мажайский Ю.А., Евтюхин В.А., Резникова А.В. Экология агроландшафта Рязанской области. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 95 с.

20. Мажайский Ю.А., Гусева Т.М. Экологические проблемы агроландшафтов Рязанской области//Биосфера. 2019. т. 11, №3. – С. 156-159.

21. Макарова В.Г., Цыганов А.Р., Мажайский Ю.А., Вильдфлуш И.Р., Кирюшин В.А., Коновалов О.Е., Персикова Т.Ф., Желязко В.И. Экологические и медико-социальные аспекты охраны природной среды и здоровья населения. – Минск: Издательство «Хата», 2002. – 286 с.

22. Мигранова И.Г. Действие ксенобиотиков на геном хлоропластов злаковых культур // Уфа: Изд-во Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015.

23. Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация / Под ред. М.В. Прасада, К.С. Саджвана, Р. Найду. – М.: Физматлит, 2009. – 815 с.

24. Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А. Биоаккумуляция тяжелых металлов овсом из техногенно загрязненных почв Тюмени // Агрохимический вестник, 2021, - №1. – С. 73-80.

25. Потатугева Ю.А., Прищеп Е.Г., Сидоренкова Н.К., Виндекер Т.А. Влияние карбоната кадмия на урожай сельскохозяйственных культур, подвижность кадмия в почве и накопление растениями // *Агрохимия*, 2005, №8. – С. 50-57.

26. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие; Институт биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.

27. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учебное пособие; Институт биологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – 55 с.

28. Убугунов В.Л., Доржонова В.О., Убугунов Л.Л. Оценка фитотоксичности кадмия в дерново-подзолистой почве// *Земледение, почвоведение и агрохимия*. 2009. №3(16). – С. 59-65.

29. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'Exposition au cadmium (CAS n°7440-43-9) – Propositions de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urine, ...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales.- Avis de l'Anses Saisine n°2015-SA-0140 Maisons-Alfort, le 17 juin 2019. URL:<https://cdn.phosagro.ru/local/templates/.default/files/greenlabel-anses.pdf>. Дата обращения 11.09.2022

30. Romkens, P.F.A.M., Rietra R.P.J.J., J. Kros, J.C. Voogd, and W. de Vries, 2018. Impact of cadmium levels in fertilisers on cadmium accumulation in soil and uptake by food crops. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2889.

URL:[https://cdn.phosagro.ru/local/templates/.default/files/impact\\_of\\_cadmium\\_levels\\_in\\_fertilisers\\_on\\_cadmiu-wageningen\\_university\\_and\\_research.pdf](https://cdn.phosagro.ru/local/templates/.default/files/impact_of_cadmium_levels_in_fertilisers_on_cadmiu-wageningen_university_and_research.pdf). Дата обращения 11.09.2022.

31. Liu Z., Chen W., He X. Evaluation of hyperaccumulation potentials to cadmium (Cd) in six ornamental species (compositae)// *International Journal of Phytoremediation*, Volume 20, 2018. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2018.1501343>. Дата обращения 18.09.2022.

32. Sunayana Goswami, Suchismita Das/A Study on Cadmium Phytoremediation Potential of Indian Mustard, *Brassica juncea*// *International Journal of Phytoremediation*, Volume 17, 2015.

URL:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2014.935289>. Дата обращения 10.08.2022.

33. C. S. Seth , V. Misra & L. K. S. Chauhan Accumulation, Detoxification, and Genotoxicity of Heavy Metals in Indian Mustard (*Brassica Juncea* L.)// International Journal of Phytoremediation, Volume 14, 2012 - URL:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2011.555799>. Дата обращения 07.07.2022.

34. Hiroshi Kubota & Chisato Takenaka *Arabis gemmifera* is a hyperaccumulator of Cd and Zn//International Journal of Phytoremediation, Volume 5, 2003 - URL:<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/713779219>. Дата обращения 10.08.2022.

35. Sukhmal Chand, M. Yaseen, Rajkumari & D. D. Patra Application of Heavy Metal Rich Tannery Sludge on Sustainable Growth, Yield and Metal Accumulation by *Clarysage*// International Journal of Phytoremediation, Volume 17, 2015. URL:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2015.1045128>. Дата обращения 10.07.2022.

36. Puhui Ji, Yufang Song, Yongji Jiang, Xiwang Tang, Yan'an Tong, Pengcheng Gao & Wenshe Han A two-year field study of phytoremediation using *Solanum nigrum* L. in China.//International Journal of Phytoremediation, Volume 18, 2016. URL:<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2015.1058325>. Дата обращения 10.07.2022.

37. Puhui Ji , Yufang Song , Tieheng Sun , Yang Liu , Xiufeng Cao , Dong Xu , Xiaoxia Yang & Tom McRae In-Situ Phytoremediation Cadmium using *Solanum Nigrum* L.: the Bio-Accumulation Characteristics Trail.//International Journal of Phytoremediation, Volume 13, 2011. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2010.549861>. Дата обращения 07.07.2022.

**ПРИЛОЖЕНИЯ****Приложение 1**

Расчет концентрации вещества, применяемого в опыте

$M_r(\text{Cd}) = 112,41 \text{ г/моль}$  и  $M_r(\text{CdCl}_2) = 183,32 \text{ г/моль}$

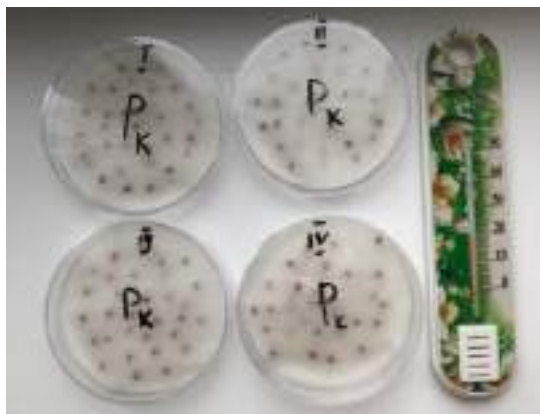
$M_r(\text{Cd}) \div M_r(\text{CdCl}_2) = 112,41/183,32 \times 100\% = 61,32\%$

1.  $m(\text{Cd}) = 0,5 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 0,5/0,6132 = 0,816 \text{ мг}$  (на 1 л)
2.  $m(\text{Cd}) = 1 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 1/0,6132 = 1,63 \text{ мг}$  (на 1 л)
3.  $m(\text{Cd}) = 2 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 2/0,6132 = 3,27 \text{ мг}$  (на 1 л)
4.  $m(\text{Cd}) = 4 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 4/0,6132 = 6,52 \text{ мг}$  (на 1 л)
5.  $m(\text{Cd}) = 8 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 8/0,6132 = 13,05 \text{ мг}$  (на 1 л)
6.  $m(\text{Cd}) = 16 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 16/0,6132 = 26,1 \text{ мг}$  (на 1 л)
7.  $m(\text{Cd}) = 25 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 25/0,6132 = 40,77 \text{ мг}$  (на 1 л)
8.  $m(\text{Cd}) = 50 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 50/0,6132 = 81,54 \text{ мг}$  (на 1 л)
9.  $m(\text{Cd}) = 100 \text{ мг}$ ;  $m(\text{CdCl}_2) = 100/0,6132 = 163,1 \text{ мг}$  (на 1 л)



Взвешивание хлорида кадмия

## Посев семян



Семена редьки масличной (контроль)



Семена горчицы сарептской (100 мг/л)



Семена резухи, шалфея, целозии (8мг/л)



Семена овса посевного (контроль)

## Сроки определения энергии прорастания и всхожести семян

№пп	Культура	Сроки определения, дни	
		Энергия прорастания	Всхожесть
1	Овёс посевной*	4	7
2	Редька масличная*	3	6
3	Горчица сарептская*	3	6
4	Шалфей поникающий**	10	21
5	Бархатцы прямостоячие**	3	10
6	Целозия гребенчатая**	6	12
7	Резуха альпийская**	4	10

---

\* ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести»

\*\* ГОСТ 24933.0-81 «Семена цветочных культур. Правила приемки и методы отбора проб»

## Энергия прорастания и всхожесть семян, %

№ пп	Культура		Концентрация Cd, мг/л									
			кон- троль	0,5	1	2	4	8	16	25	50	100
1	Редька маслич- ная	энергия прораста- ния	100	100	100	100	100	100	100	100	67	67
		всхожесть	100	100	100	100	100	100	100	100	73	73
2	Горчица сарепт- ская	энергия прораста- ния	100	100	100	100	100	99	100	99	96	92
		всхожесть	100	100	100	100	100	100	100	99	96	92
3	Овес по- севной	энергия прораста- ния	37	37	37	37	37	35	33	33	33	17
		всхожесть	50	50	50	50	50	50	47	43	40	40
4	Шалфей понижа- ющий	энергия прораста- ния	28	28	24	24	25	20	19	12	9	2
		всхожесть	68	68	65	65	54	55	54	22	23	18
5	Бархатцы прямо- стоячие	энергия прораста- ния	92	84	84	84	78	76	73	50	46	32
		всхожесть	92	93	93	93	87	78	73	70	66	66
6	Целозия гребен- чатая	энергия прораста- ния	97	94	94	94	94	90	90	90	89	84
		всхожесть	100	100	98	98	98	95	95	95	89	84
7	Резуха альпий- ская	энергия прораста- ния	25	25	20	14	14	8	6	4	4	3
		всхожесть	92	92	93	93	82	78	78	74	63	58

[illegible]



[illegible]

## Приложение 6

## Проростки растений



## Проростки целозии (контроль)



## Проростки целозии (100 мг/л)



## Проростки редьки (контроль)



## Проростки овса (контроль)

## Рост и развитие растений



Посев в вегетационные сосуды



Прореживание на 7-й день



Размещение вегетационных сосудов



Цветущая горчица



Цветок редьки





Взвешивание стручков горчицы, редьки и бутонов овса



Растения овса на дерново-подзолистой неокультуренной почве при разных концентрациях кадмия

## Появление всходов (посев – 22 июля 2022 года)

№ пп	Вариант	Дата появления всходов	Дата появления 50% всходов
1	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	24.07	24.07
2	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
3	Редька масличная (контроль) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
4	Редька масличная (контроль) чернозем (окультуренная)	24.07	24.07
5	Редька масличная (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	24.07	24.07
6	Редька масличная (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	24.07	24.07
7	Редька масличная (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	24.07	24.07
8	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	24.07	24.07
9	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
10	Редька масличная (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
11	Редька масличная (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	24.07	24.07
12	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
13	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
14	Редька масличная (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
15	Редька масличная (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
16	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
17	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
18	Редька масличная (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
19	Редька масличная (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
20	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
21	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
22	Редька масличная (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
23	Редька масличная (25 мг/кг) чернозем	25.07	25.07

	(окультуренная)		
24	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	2507
25	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
26	Редька масличная (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
27	Редька масличная (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	-
28	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
29	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	24.07	24.07
30	Редька масличная (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
31	Редька масличная (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	-
32	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
33	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
34	Горчица сарептская (контроль) чернозем (неокультуренная)	26.07	26.07
35	Горчица сарептская (контроль) чернозем (окультуренная)	26.07	26.07
36	Горчица сарептская (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
37	Горчица сарептская (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
38	Горчица сарептская (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
39	Горчица сарептская (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
40	Горчица сарептская (4мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
41	Горчица сарептская (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
42	Горчица сарептская (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
43	Горчица сарептская (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
44	Горчица сарептская (8мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
45	Горчица сарептская (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	24.07	24.07
46	Горчица сарептская (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
47	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
48	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07

49	Горчица сарептская (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
50	Горчица сарептская (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
51	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
52	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
53	Горчица сарептская (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
54	Горчица сарептская (25 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	25.07
55	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
56	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	26.07
57	Горчица сарептская (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
58	Горчица сарептская (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	26.07
59	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	25.07
60	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	26.07
61	Горчица сарептская (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
62	Горчица сарептская (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	26.07
63	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	27.07
64	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	26.07
65	Овес посевной (контроль) чернозем (неокультуренная)	25.07	27.07
66	Овес посевной (контроль) чернозем (окультуренная)	26.07	27.07
67	Овес посевной (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	29.07
68	Овес посевной (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	29.07
69	Овес посевной (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	-
70	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	26.07	29.07
71	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	26.07	28.07
72	Овес посевной (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
73	Овес посевной (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	-
74	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-	25.07	29.07



	подзолистая почва (неокультуренная)		
75	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	25.07
76	Овес посевной (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	26.07	28.07
77	Овес посевной (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	-
78	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	30.07
79	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	26.07
80	Овес посевной (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
81	Овес посевной (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	-
82	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	30.07
83	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	26.07
84	Овес посевной (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	25.07
85	Овес посевной (25 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	-
86	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	25.07	30.07
87	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	25.07	27.07
88	Овес посевной (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	26.07	27.07
89	Овес посевной (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	26.07	-
90	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	27.07	-
91	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	26.07	-
92	Овес посевной (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	25.07	-
93	Овес посевной (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	25.07	-

Показатели роста и развития растений  
(на 14-й день после всходов в контрольных вариантах)

№ пп	Вариант	Количество растений до проре- живания (на 1 веге- тационный сосуд)	Количе- ство бу- тонов на 1 расте- ние (кроме овса)	Количе- ство цве- тов на одно рас- тение (кроме овса)	Сырая масса од- ного рас- тения,  г	Процент живых рас- тений (к количеству растений после про- реживания)	Процент повре- жденных растений
1	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	2	1	0,5	100	0
2	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	1	100	0
3	Редька масличная (контроль) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	1	100	0
4	Редька масличная (контроль) чернозем (окультуренная)	10	0	0	0,57	75	100
5	Редька масличная (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,6	100	25
6	Редька масличная (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,55	100	50
7	Редька масличная (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,5	100	100
8	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва	10	0	0	0,53	100	100

	(неокультуренная)						
9	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	1,25	100	0
10	Редька масличная (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	1	100	0
11	Редька масличная (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	8	0	0	0,5	50	100
12	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,33	100	100
13	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	1	100	0
14	Редька масличная (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	1,2	100	0
15	Редька масличная (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	8	0	0	0,4	50	100
16	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,35	100	100
17	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,8	100	0
18	Редька масличная (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	1	100	0
19	Редька масличная (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	8	0	0	0,43	50	100
20	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,28	100	100
21	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
22	Редька масличная (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
23	Редька масличная (25 мг/кг) чернозем (окультуренная)	7	0	0	0,33	50	100

24	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,25	100	100
25	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
26	Редька масличная (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	0,7	100	25
27	Редька масличная (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	6	0	0	0,22	50	100
28	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	0	0	0,23	100	100
29	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
30	Редька масличная (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	0	0	0,7	100	25
31	Редька масличная (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	6	0	0	0,22	50	100
32	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	6	1	0,7	100	0
33	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,8	100	0
34	Горчица сарептская (контроль) чернозем (неокультуренная)	10	4	0	1	100	0
35	Горчица сарептская (контроль) чернозем (окультуренная)	10	0	0	0,3	75	100
36	Горчица сарептская (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,7	100	0
37	Горчица сарептская (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,7	100	0

38	Горчица сарептская (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,6	100	25
39	Горчица сарептская (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,5	100	25
40	Горчица сарептская (4мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
41	Горчица сарептская (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	4	0	0,75	100	0
42	Горчица сарептская (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	0	0	0,2	н/п <sup>4</sup>	100
43	Горчица сарептская (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,4	100	25
44	Горчица сарептская (8мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
45	Горчица сарептская (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	4	0	0,75	100	0
46	Горчица сарептская (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	0	0	0,22	100	100
47	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	4	0	0,4	100	50
48	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
49	Горчица сарептская (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	4	0	0,8	100	0
50	Горчица сарептская (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	3	0	0	0,2	н/п	100
51	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	2	0	0,4	100	50
52	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	10	0	0	0,75	100	0
53	Горчица сарептская (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	2	0	0,75	100	0
54	Горчица сарептская (25 мг/кг) чернозем (окультуренная)	2	0	0	0,2	н/п	100

\* «н/п» - не прореживались

55	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	5	0	0,4	100	100
56	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	8	0	0	0,5	100	0
57	Горчица сарептская (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	2	0	0,75	100	0
58	Горчица сарептская (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	1	0	0	0,16	н/п	100
59	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	10	2	0	0,1	50	100
60	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	8	0	0	0,5	100	0
61	Горчица сарептская (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	10	2	0	0,75	100	0
62	Горчица сарептская (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	1	0	0	0,11	н/п	100
63	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	8	-	-	0,3	100	0
64	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	8	-	-	0,3	100	0
65	Овес посевной (контроль) чернозем (неокультуренная)	9	-	-	0,4	100	0
66	Овес посевной (контроль) чернозем (окультуренная)	5	-	-	0,4	100	0
67	Овес посевной (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	7	-	-	0,3	100	25
68	Овес посевной (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	5	-	-	0,3	100	25

69	Овес посевной (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	5	-	-	0,3	100	25
70	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	5	-	-	0,3	100	25
71	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	5	-	-	0,3	100	0
72	Овес посевной (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	7	-	-	0,3	100	0
73	Овес посевной (4 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,33	н/п	0
74	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	5	-	-	0,3	100	25
75	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	4	-	-	0,33	н/п	0
76	Овес посевной (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	5	-	-	0,3	100	0
77	Овес посевной (8 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,35	н/п	25
78	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
79	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	0
80	Овес посевной (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	5	-	-	0,32	100	0
81	Овес посевной (16 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
82	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
83	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	4	-	-	0,27	н/п	50
84	Овес посевной (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
85	Овес посевной (25 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50

86	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
87	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
88	Овес посевной (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	50
89	Овес посевной (50 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,27	н/п	50
90	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	4	-	-	0,3	н/п	100
91	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	4	-	-	0,22	н/п	100
92	Овес посевной (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	4	-	-	0,24	н/п	100
93	Овес посевной (100 мг/кг) чернозем (окультуренная)	4	-	-	0,25	н/п	100



## Приложение 10

## Показатели роста и развития растений

№ пп	Вариант	Стадия развития в соответ- ствии со схемой ВВСН	Общее число цветов (кроме расте- ний ов- са)	Количе- ство стручков с фер- тильными семенами	Сырая мас- са 1 побе- га, г/ Средняя длина 1 побега, см	Масса бутонов (овес) или стручков, г	Доля мертвых растений, %
1	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	71 <sup>5</sup>	17	2	3,4/26,25	1,2	0
2	Редька масличная (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	71	18	4	4,8/46,25	2,2	0
3	Редька масличная (контроль) чернозем (неокультуренная)	71	20	4	6,0/48,0	2,6	0
5	Редька масличная (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	71	16	4	4,5/23,25	2,4	0
6	Редька масличная (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	71	17	1	4,5/19,25	0,07	0
7	Редька масличная (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	67 <sup>6</sup>	16	0	3,8/19,5	-	0
8	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	67	16	0	3,7/19,0	-	0

<sup>5</sup> 71 - Первые плоды сформированы.<sup>6</sup> 67 - Завершение цветения: 70% лепестков опали или засохли.

9	Редька масличная (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	67	12	0	4,1/44,2	-	0
10	Редька масличная (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	67	14	0	5,2/45,5	-	0
12	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	67	8	0	3,7/19,25	-	0
13	Редька масличная (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	67	10	0	4,2/42,25	-	0
14	Редька масличная (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	67	12	0	4,8/43,0	-	0
16	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	67	4	0	3,7/18,0	-	0
17	Редька масличная (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	55 <sup>7</sup>	0	0	4,3/37,2	-	0
18	Редька масличная (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	55	0	0	4,6/39,0	-	0
20	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	51 <sup>8</sup>	0	0	3,3/17,0	-	0
21	Редька масличная (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	51	0	0	3,8/30,25	-	0
22	Редька масличная (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	55	0	0	4,6/36,5	-	0
24	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	51	0	0	3,4/17,0	-	0

<sup>7</sup> 55 - Первые одиночные цветы появляются на основном соцветии, но еще закрыты.

<sup>8</sup> 51 – Основное соцветие видно между верхними листьями. Ветви соцветия начинают удлиняться.

25	Редька масличная (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	51	0	0	3,7/26,25	-	0
26	Редька масличная (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	55	0	0	4,6/28,25	-	0
28	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	51	0	0	2,7/15,5	-	0
29	Редька масличная (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	51	0	0	3,4/26,5	-	0
30	Редька масличная (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	51	0	0	4,6/28,0	-	0
32	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	74 <sup>9</sup>	16	10	2,1/37,0	1,1	0
33	Горчица сарептская (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	74	18	12	7,1/48,0	1,4	0
34	Горчица сарептская (контроль) чернозем (неокультуренная)	75 <sup>10</sup>	26	18	12,4/52,0	2,3	0
36	Горчица сарептская (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	73 <sup>11</sup>	10	9	2,5/38,75	0,8	0
37	Горчица сарептская (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	73	7	9	2,3/37,75	0,7	0
38	Горчица сарептская (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	73	8	6	2,4/37,25	0,5	0
39	Горчица сарептская (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва	73	6	6	2,4/36,0	0,5	0

<sup>9</sup> 74 – 40% плодов сформировано.

<sup>10</sup> 75 – 50% плодов сформировано.

<sup>11</sup> 73 – 30% плодов сформировано.

	(неокультуренная)						
40	Горчица сарептская (4мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	73	8	6	6,47/40,0	0,6	0
41	Горчица сарептская (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	73	8	8	10,8/48,0	1,1	0
43	Горчица сарептская (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	72 <sup>12</sup>	8	5	2,0/32,75	0,55	0
44	Горчица сарептская (8мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	72	8	4	6,4/36,0	0,4	0
45	Горчица сарептская (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	72	10	4	7,6/49,0	0,5	0
47	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	65 <sup>13</sup>	8	0	2,0/32,0	-	0
48	Горчица сарептская (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	65	16	0	6,0/34,25	-	0
49	Горчица сарептская (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	72	10	4	7,4/49,0	0,4	0
51	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	65	10	0	2,1/32,25	-	0
52	Горчица сарептская (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	65	15	0	5,6/32,0	-	0
53	Горчица сарептская (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	72	8	4	6,8/47,0	0,4	0

<sup>12</sup> 72 – 20% плодов сформировано.

<sup>13</sup> 65 – Полное цветение: 50% цветков раскрыты.

55	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	65	8	0	2,1/32,25	-	0
56	Горчица сарептская (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	55	0	0	5,2/32,0	-	0
57	Горчица сарептская (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	65	10	0	5,8/47,0	-	0
59	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	65	8	0	2,1/32,0	-	0
60	Горчица сарептская (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	55	0	0	5,2/32,0	-	0
61	Горчица сарептская (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	65	8	0	5,2/43,0	-	0
63	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	59 <sup>i</sup>	-	-	3,9/42,0	0,7	0
64	Овес посевной (контроль) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	59	-	-	4,0/46,0	0,9	0
65	Овес посевной (контроль) чернозем (неокультуренная)	59	-	-	5,4/55,7	1,3	0
67	Овес посевной (0,5 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	59	-	-	3,6/41,5	0,6	0
68	Овес посевной (1 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	59	-	-	3,6/41,0	0,43	0
69	Овес посевной (2 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	59	-	-	3,7/41,0	0,4	0

70	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	55 <sup>ii</sup>	-	-	3,6/39,0	0,4	0
71	Овес посевной (4 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	55	-	-	3,2/44,0	0,4	0
72	Овес посевной (4 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	55	-	-	5,4/48,0	0,4	0
74	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	53 <sup>iii</sup>	-	-	2,9/39,3	0,33	0
75	Овес посевной (8 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	53	-	-	3,2/43,0	0,34	0
76	Овес посевной (8 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	53	-	-	4,8/43,0	0,37	0
78	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	53	-	-	2,1/35,0	0,3	0
79	Овес посевной (16 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	53	-	-	3,2/42,0	0,35	0
80	Овес посевной (16 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	53	-	-	4,8/42,0	0,35	0
82	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	52 <sup>iv</sup>	-	-	2,0/32,8	0,2	0
83	Овес посевной (25 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	52	-	-	3,2/40,7	0,28	0
84	Овес посевной (25 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	52	-	-	4,8/42,0	0,3	0
86	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	51 <sup>v</sup>	-	-	2,0/31,0	0,14	0
87	Овес посевной (50 мг/кг) дерново-подзолистая почва	51	-	-	3,2/38,4	0,1	0

	(окультуренная)						
88	Овес посевной (50 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	52	-	-	4,1/40,7	0,12	0
90	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (неокультуренная)	37 <sup>vi</sup>	-	-	2,0/30,25	-	0
91	Овес посевной (100 мг/кг) дерново-подзолистая почва (окультуренная)	37	-	-	2,3/37,0	-	0
92	Овес посевной (100 мг/кг) чернозем (неокультуренная)	52	-	-	4,0/40,7	0,02	0

---

<sup>i</sup> 59 – конец колошения: колос полностью появился

<sup>ii</sup> 55 – середина колошения: половина колоса появилась

<sup>iii</sup> 53 – 30% колоса появилось

<sup>iv</sup> 52 – 20% колоса появилось

<sup>v</sup> 51 – начало колошения: первый колосок едва виден

<sup>vi</sup> 37 – флаговый лист едва виден, не раскрыт