

ORIGINAL ARTICLE

**THE INFLUENCE OF HIGH Cd CONCENTRATIONS ON WINTER
WHEAT (*Triticum aestivum* L.) AND CANOLA (*Brassica napus* L.)
ETIOLATED SHOOTS**

Kolesnichenko V.V.

Timiryazev Institute of Plant Physiology, Moscow, Russia

Received September 20, 2008

ABSTRACT

The influence of high CdCl₂ concentrations on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and canola (*Brassica napus* L.) etiolated shoots was studied. It is shown that if in canola high Cd concentrations caused full inhibition of weight and length increase of shoots, in wheat these Cd concentrations caused less effect. The influence of high Cd concentrations on lipid peroxidation in wheat in canola differs too. If in canola Cd treatment caused the increase of lipid peroxidation rate, in wheat in most variants this treatment caused the decrease of lipid peroxidation rate. The very high peroxidase activity in wheat may be an important part of Cd-resistance mechanism in wheat shoots.

Key words: Triticum aestivum L; Brassica napus; catalase; peroxidase; Lipid peroxidation; Cd influence.

ORIGINAL ARTICLE

**Изучение влияния разных концентраций кадмия на
этиолированные проростки пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и рапса
(*Brassica napus*)**

Колесниченко В.В.

Институт Физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской Академии наук. Москва.

Поступила в редакцию 20 сентября 2008

Изучено влияние высоких концентраций CdCl_2 на этиолированные проростки пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и рапса (*Brassica napus* L.). Установлено, что, если у рапса высокие концентрации кадмия сразу практически полностью ингибируют увеличение веса и роста проростков, то у пшеницы этот эффект выражен в гораздо меньшей степени. Различается и влияние кадмия на процессы перекисного окисления липидов, причем, если у рапса в целом кадмий вызывал интенсификацию процессов ПОЛ, то у пшеницы в большинстве вариантов кадмий вызывал снижение интенсивности процессов ПОЛ. На порядок более высокая активность пероксидазы пшеницы по сравнению с пероксидазой рапса является одним из важных механизмов устойчивости пшеницы к действию токсиканта.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L.; *Brassica napus*; каталаза; пероксидаза; ПОЛ; влияние кадмия

В настоящее время вопросы загрязнения окружающей среды, связанные, в первую очередь, с деятельностью человека, приобретают особое значение. В условиях современного роста городов, промышленного строительства и развития автотранспорта происходит загрязнение среды обитания некоторыми тяжелыми металлами, которые наиболее для организмов растений и животных при концентрации 10^{-5} М и выше (Кузнецов, Дмитриева, 2005). Их высокая опасность для экосистем и здоровья человека была неоднократно показана во многих работах (Stolt et al., 2006; House et al., 2003). В связи с этим, особый интерес для эколого-физиологических исследований представляет кадмий, относящийся к металлам первого класса опасности, содержание которого в почвах

колеблется между 0,07 и 1,1 мг/кг и определяется химическим составом материнских пород (Ilg et al., 2004). При этом все более высокие обнаруженные значения (Ilg et al., 2004; Rodríguez et al., 2009) свидетельствуют об антропогенном вкладе в накопление кадмия в верхнем слое почв. Известно, что ежегодно в атмосферу выбрасывается свыше 25 тыс. т кадмия. С атмосферными осадками и пылью на поверхность почвы в России ежегодно выпадает 1,9-5,4 г/га кадмия, что может представлять опасность для всего растительного сообщества (Ilg et al., 2004). При этом имеются данные, что загрязнение почвы кадмием может значительно превышать приведенные средние цифры (Rodríguez et al., 2009).

Показано, что кадмий снижает поглощение кислорода корнями и изолированными клетками табака. Он ингибирует транспорт электронов и протонов в митохондриях, что может приводить к нарушению работы электронно-транспортной цепи. Кадмий ингибирует активность ключевых ферментов гликолиза и пентозофосфатного окислительного пути, нарушает водный статус и рост растения (Belimov et al., 2003). Однако известно, что растения, оказываясь в резко измененной человеком среде произрастания, и даже не имея механизмов специфической защиты к этим металлам, встают на преадаптивный путь обеспечения устойчивости и более или менее успешно произрастают в этих условиях. Кроме того, преадаптационная концепция устойчивости растений к антропогенным факторам основана на фактах способности отдельных структур растительного организма выполнять новые защитные функции без ущерба для первоначальной функции (Усманов и др., 2001). В настоящее время известны ряд конститутивных механизмов устойчивости к тяжелым металлам (БТШ, лиганды, фитохелатины, металлотионеины и др.), позволяющих растениям аккумулировать токсичные элементы в метаболически инертных органах и органеллах или включать их в хелаты и тем самым переводить в физиологически безопасные формы (Lindberg et al., 2007; Groppa et al., 2006; Stolt et al., 2006). К сожалению, единого механизма, обеспечивающего устойчивость растения к нескольким тяжелым металлам, не существует.

Ранее было показано, что токсическое воздействие тяжелых металлов вызывает образование активных форм кислорода в любой клетке, испытывающей состояние окислительного стресса, и вызывают денатурацию белков, повреждение нуклеиновых кислот, а также перекисное окисление липидов (ПОЛ) (Mediouni et al., 2006; Jin et al., 2008).

Считается, что такой продукт ПОЛ, как малоновый диальдегид (МДА) может быть использован как биологический индикатор у растений при токсичном воздействии кадмия и других тяжелых металлов (Mediouni et al., 2006; Jin et al., 2008). Кроме того известно, в разных растениях и при разных стрессах используются одни и те же механизмы защищающие их от АФК, которые включают в себя такие ферменты как каталазу, глутатионпероксидазу, супероксиддисмутазу и др. (Grant et al., 1997).

Поскольку, кадмий является сравнительно новым элементом для биосферы, содержание которого в окружающей среде связан в первую очередь с деятельностью человека, и остаются до конца не изучены общие механизмы защиты растений от их токсичного воздействия, то целью данной работы было изучение токсичного влияния высоких концентраций солей кадмия на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) и рапс (*Brassica napus*), в частности, исследовать влияние высоких концентраций кадмия на процессы ПОЛ и накопление МДА в этилированных проростках пшеницы и рапса, а также определить активность антиоксидантных ферментов каталазы и пероксидазы в этих условиях.

Материалы и методы

Получение растительного материала. В работе были использованы этилированные проростки рапса (*Brassica napus*, сорт «Ратник») и пшеницы (*Triticum aestivum* L., сорт «Московская 69»).

Для получения этилированных проростков семена рапса и пшеницы тщательно промывали в мыльном растворе, обрабатывали в слабом растворе марганцовки и оставляли для набухания при комнатной температуре в течение 1 — 2 часа. Затем семена раскладывали в кюветы на влажную фильтровальную бумагу и проращивали в термостате при 26 °C от 3 до 21 дня.

Для изучения влияния солей кадмия на рост растений, уровень перекисного окисления липидов, активности каталазы и пероксидазы в разложенные на фильтровальной бумаге в кюветах семена пшеницы и рапса добавляли раствор CdCl_2 в диапазоне концентрации от 0,5 до 7,5 мМ.

Определение активности ПОЛ по содержанию МДА. Об изменении интенсивности ПОЛ судили по содержанию вторичного продукта ПОЛ — МДА с помощью метода Costa с соавторами (2002). Метод основан на том, что при высокой температуре в кислой среде МДА реагирует с 2 — ТБК, образуя розовый триметилловый комплекс с максимум поглощения при 535 нм (Costa et al, 2002).

Для проведения эксперимента брали 250 мг этилированных проростков пшеницы, рапса и и гомогенизировали с 4 мл 20% трихлоруксусной кислотой (ТХУ), с последующим центрифугированием в течение 20 мин при 8000 об/мин. Затем к 1 мл реакционной смеси добавляли 4 мл 0.5% ТБК, приготовленной в 20% ТХУ, и в течение 30 мин кипятили при 95°C на водяной бане, с последующим охлаждением. После охлаждения исследуемые пробы центрифугировали в течение 12 мин при 8000 об/мин. Измерение оптической плотности (E) проб проводили на фотоколориметре «КФК — 2» при длине волны 532 нм и 600 нм. Затем рассчитывали содержание МДА: $E_{\text{МДА}} = E_{532} - E_{600}$; $C = E_{\text{МДА}} / E \cdot L$, где C — концентрация МДА; $E_{\text{МДА}}$ — оптическая плотность; L — длина луча (для КФК — 2 = 1 см); E — коэффициент молярной экстинкции МДА ($155 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

Определение активности каталазы. При определении активности каталазы исследуемых растений использовали метод Королюк, основанный на способности перекиси водорода образовывать с солями молибдена стойкий окрашенный комплекс (Королюк и др., 1988).

Для этого реакцию запускали добавлением 0,1 мл растительного гомогената к 2 мл 0,03% раствора перекиси водорода. В качестве контрольной пробы использовали 0,1 мл дистиллированной воды. Реакцию останавливали через 10 мин добавлением 4% молибдата аммония. Затем измеряли интенсивность окраски на фотоколориметре «КФК — 2» при длине волны 410 нм против контрольной пробы, в которой вместо перекиси водорода вносили 2 мл воды. Расчет измерений проводили следующим образом:

$$E = (A_k - A_d) \cdot x \cdot V \cdot t \cdot k \cdot x \cdot p \text{ (мкат/л)}.$$

где E — активность каталазы в мкат/л; A — оптическая плотность контрольной и опытной проб; V — объем вносимой пробы, 0,1 мл; t — время инкубации, 600 сек; k — коэффициент миллимолярной экстинкции перекиси водорода, равный $22,2 \cdot 10^3 \cdot \text{мМ}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. За единицу активности каталазы принимали то количество фермента, которое участвует в превращении 1 мкат перекиси водорода за 1 сек при заданных условиях.

Определение активности пероксидазы. Определение пероксидазной активности проводили с помощью метода H.U Bergmeyer (1974). Измерение проводили на фотоколориметре «КФК — 2» при длине волны 436 нм. В качестве контроля использовали дистиллированную воду.

Регистрирование скорости увеличения активности в пробах проводили, используя линейную пропорцию кривой после первоначальной лаг фазы.

Результаты

Рапс (*Brassica napus*, сорт «Ратник»)

Влияние кадмия на рост и вес рапса. При изучении влияния кадмия на этилированные проростки рапса (*Brassica napus*) проводили отбор проб каждые 7 суток на протяжении 21 дня. В качестве контроля использовали

этиолированные проростки рапса, не подвергшиеся воздействию кадмия. В экспериментах были использованы следующие концентрации кадмия — 0,5; 1; 2,5; 5; 7,5 мМ. К концу четвертой недели эксперимента наблюдалась практически полная гибель проростков при всех использованных концентрациях кадмия.

В ходе экспериментов было обнаружено, что в течение первых 7 суток проращивания проростков рапса, кадмий оказывал на них слабое воздействие (рис. 1). При этом, разница в весе контрольных этиолированных проростков и

проростков рапса, подвергнутых действию максимальной использованной концентрации кадмия 7,5 мМ, составляла около 30%. В тоже время, в ходе дальнейшего выращивания проростков до 14 суток, вес контрольных проростков увеличивался, а вес экспериментальных проростков рапса, подвергнутых максимально использованной концентрации кадмия, практически затормозился на том же значении. В результате, на 21 сутки проращивания разница в весе между контрольным и опытным вариантами рапса составляла уже более 80% (рис 1).

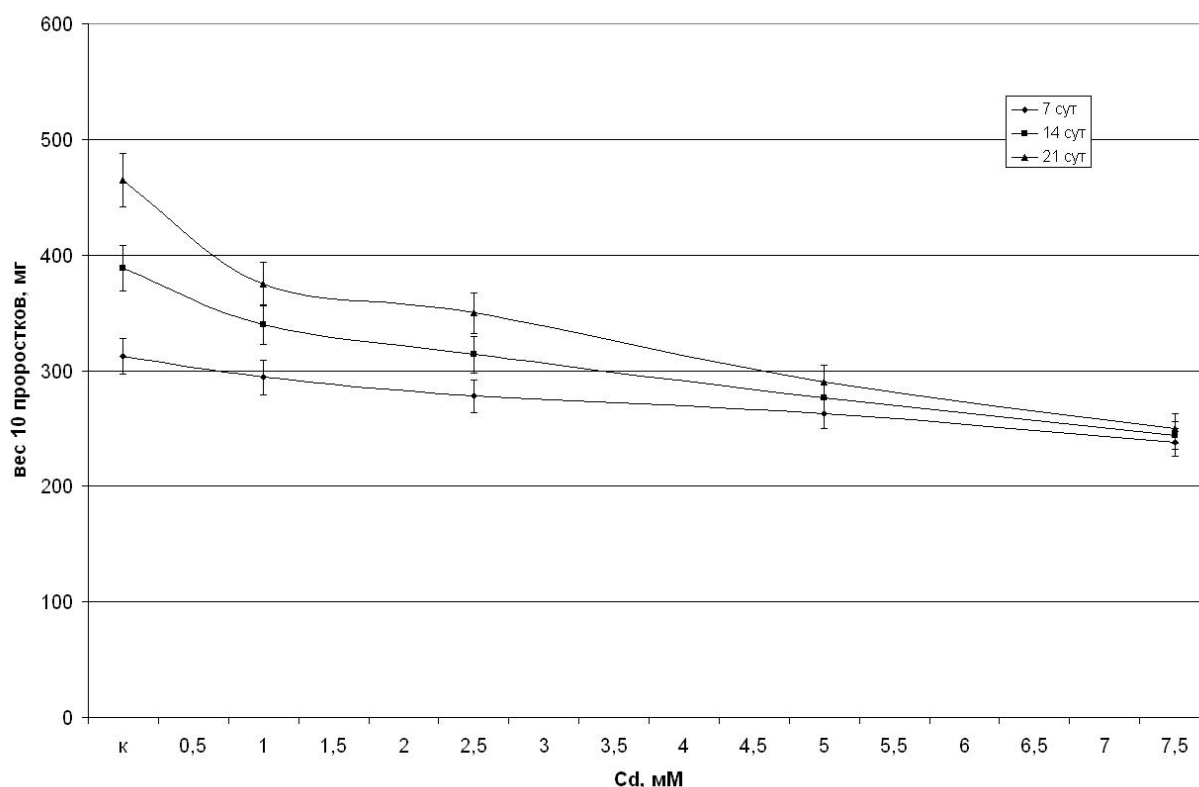


Рис. 1. Вес проростков рапса на 7, 14 и 21 сутки эксперимента. Вес 10 замоченных зерен рапса составляет 210 ± 10 мг.

Визуально воздействие от 0,5 мМ до 7,5 мМ кадмия заключалось в ингибировании роста этиолированных проростков рапса, причем уже воздействие 5 мМ CdCl_2 практически полностью

ингибировало рост (Рис. 2) и в появлении у проростков различных отклонений в развитии.

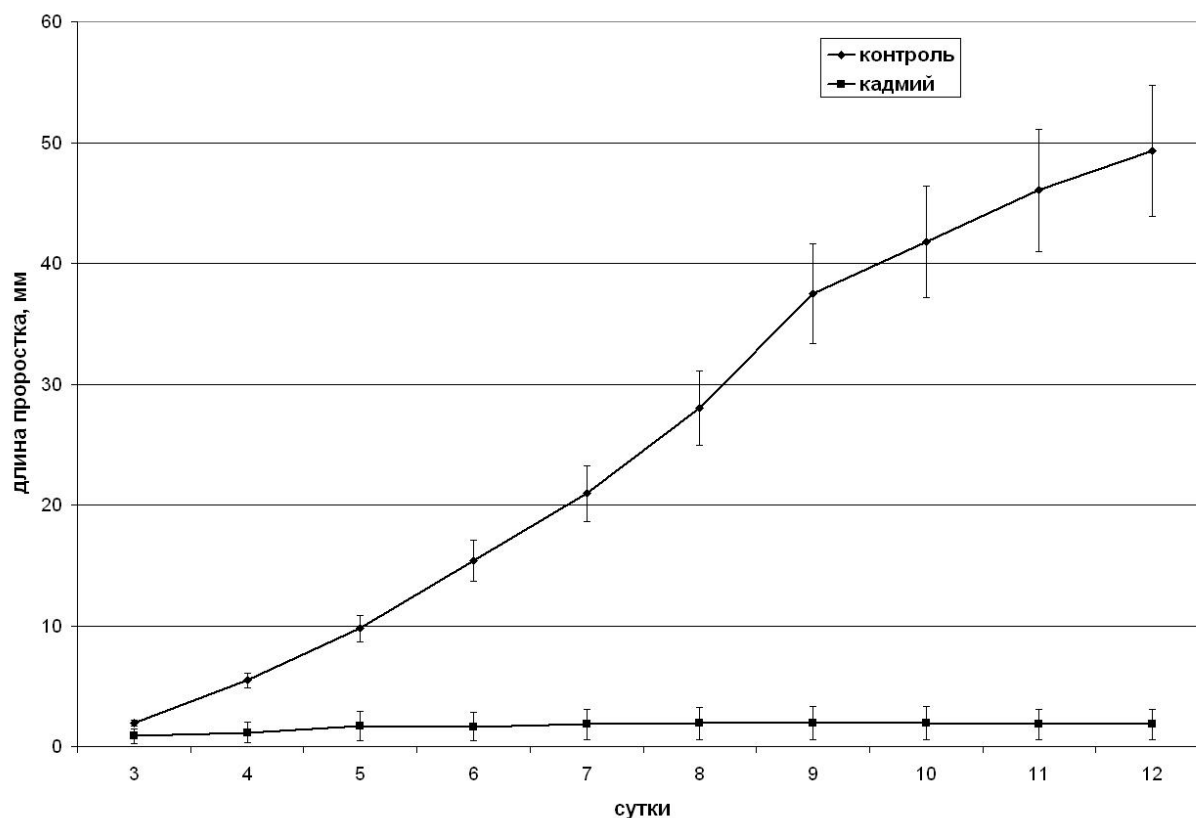


Рис. 2 Средняя длина контрольных проростков рапса и проростков рапса, экспонированных 5 мМ CdCl₂.

Перекисное окисление липидов в проростках рапса

Отбор проб проводили каждые 7 суток на протяжении 21 дня. Как видно из рис 2, в течение этого промежутка времени в контрольном варианте рапса наблюдалось равномерное уменьшение содержания МДА и, соответственно, снижение интенсивности процессов ПОЛ в ходе роста проростков.

В то же время, у 7 — суточных исследуемых проростков рапса в присутствии кадмия в концентрации от 1 до 5 мМ в среде, вызывало снижение активности реакции перекисного окисления липидов. Увеличение содержания МДА в экспериментальной пробе по сравнению с контролем наблюдалось только при концентрации 7,5 мМ в среде.

При исследовании длительного влияния кадмия от 0,5 мМ до 7,5 мМ на 14 — суточные проростки рапса, было зафиксировано увеличение интенсивности процессов ПОЛ по сравнению с контрольными проростками при всех изученных концентрациях. Необходимо отметить, что интенсивность ПОЛ при 1 мМ в среде была выше, чем при 2,5 мМ.

У 21 — суточных проростков рапса происходило дальнейшее снижение интенсивности ПОЛ в контрольном варианте и некоторый рост накопления МДА при концентрации 1 мМ. В точках 2,5 мМ, 5 мМ и 7,5 мМ накопление МДА по сравнению с двухнедельными проростками снижалось, хотя и оставалось выше, чем в контрольном варианте.

Таким образом, с увеличением возраста проростков рапса происходило увеличение накопления МДА уже при минимальной использованной концентрации кадмия, при этом

накопление МДА при максимальной использованной концентрации кадмия на 14 сутки роста несколько повышалось по сравнению с первой неделей роста, а на 21 сутки эксперимента

у проростков рапса при этой концентрации накопление МДА значительно снижалось (рис. 3).

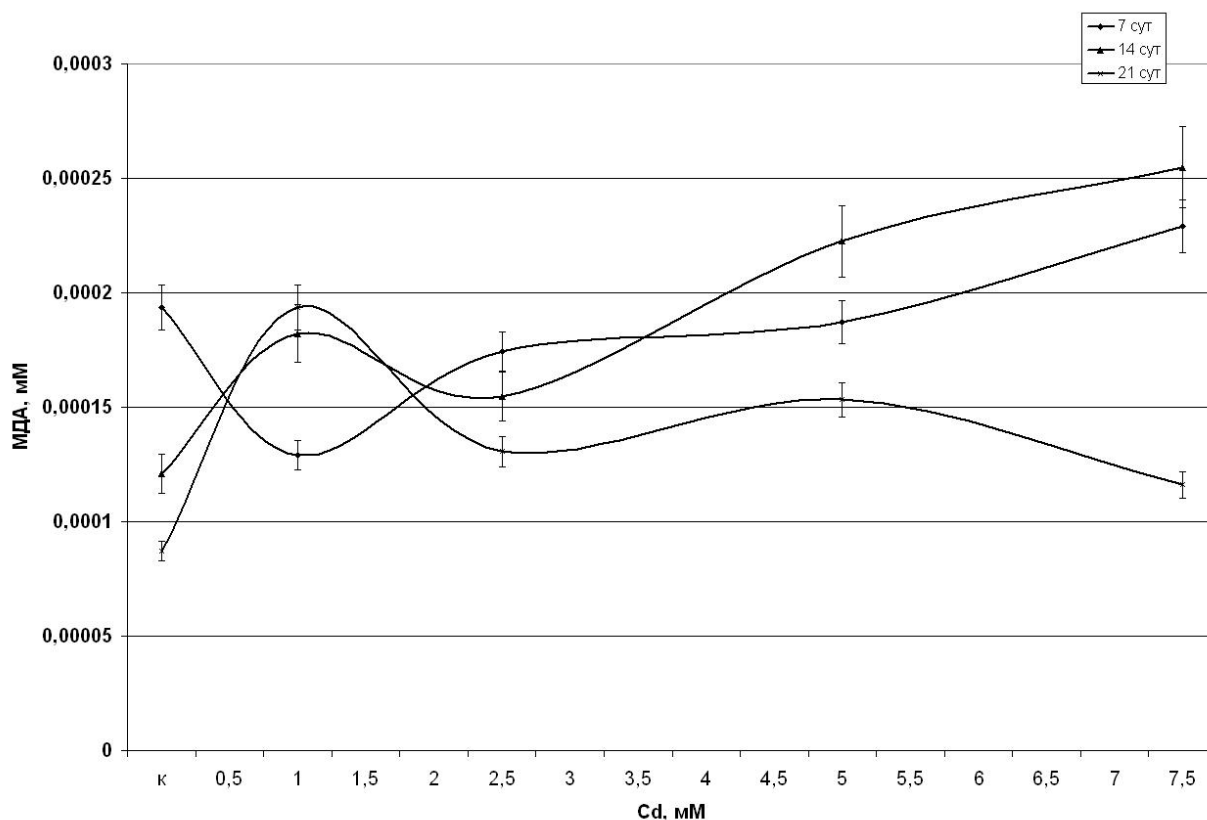


Рис. 3 Накопление МДА в проростках рапса в зависимости от концентрации кадмия в среде.

Активность пероксидазы

При определении активности пероксидазы в этиолированных проростках рапса, было обнаружено, что, ферментативная активность всех исследуемых проростков находилась в пределах 0,1 — 0,3 условных единиц (у.е.). При этом пероксидазная активность у контрольных 8 — суточных проростков составляла около 0,2 у.е. (рис. 4). У 15 — суточных контрольных проростков, по сравнению с 8 — суточными, активность пероксидазы возрастала до 0,25 у.е., а в дальнейшем, у 22 — суточных проростков рапса, происходило снижение ее активности.

В присутствии кадмия в точках 1 мМ и 2,5 мМ, у 8 — суточных этиолированных проростков

происходило довольно значительное снижение активности пероксидазы. В то же время, при воздействии более высоких концентраций кадмия (5 мМ и 7,5 мМ) отмечался рост активности пероксидазы по сравнению с контролем. При этом, максимум активности пероксидазы соответствовал 5 мМ содержания кадмия в среде (рис. 4).

Действие высоких концентраций кадмия на 15 — суточные этиолированные проростки рапса на активность пероксидазы было гораздо менее выражено, чем у 8 — суточных проростков. Во всех вариантах опыта активность пероксидазы составляла 0,2 — 0,25 у.е. (Рис. 4).

У 22 — суточных проростков, при концентрации 1 мМ кадмия в среде активность пероксидазы практически не менялась по сравнению с 15 — суточными проростками. Более высокие концентрации кадмия в среде вызывали уменьшение активности пероксидазы, особо заметное при 2,5 мМ кадмия в среде.

В целом, при увеличении возраста проростков рапса до 21 суток выращивания максимум активности пероксидазы смещался из области высоких концентраций кадмия в область низких концентраций (рис. 4)

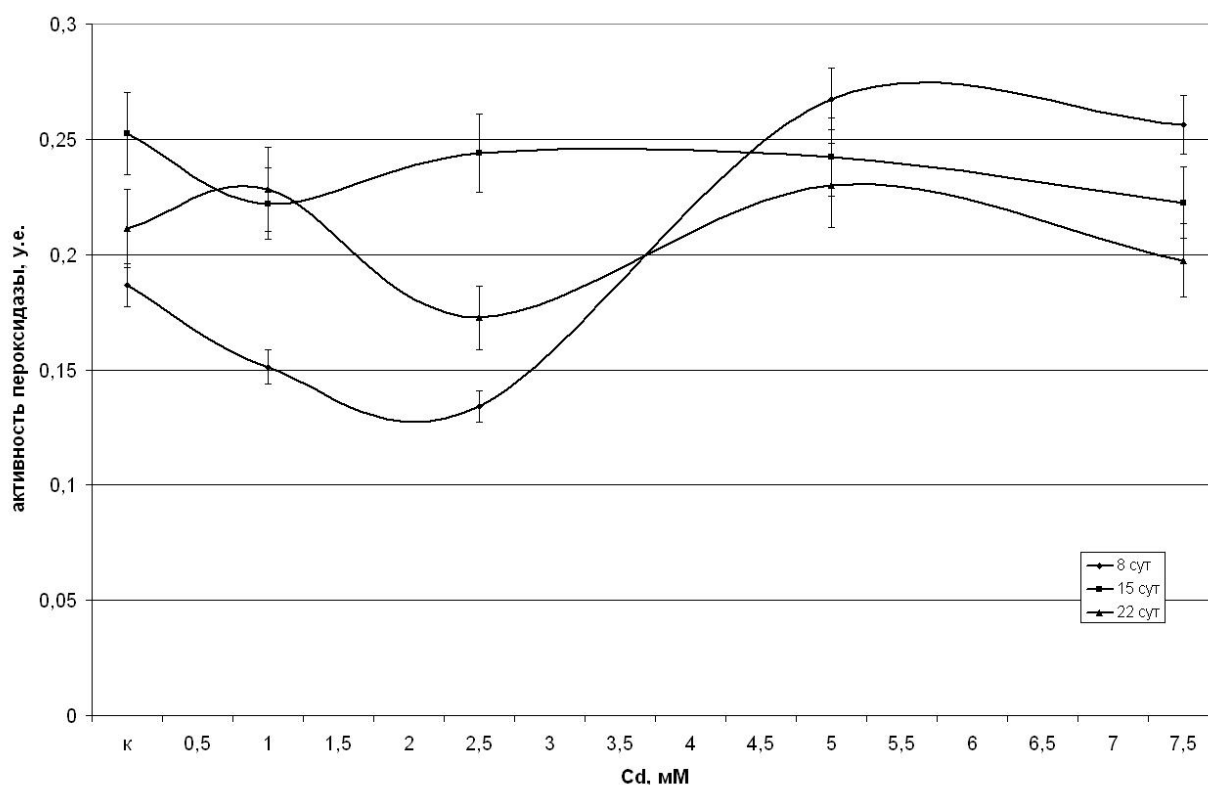


Рис. 4 Активность гваякол-пероксидазы проростков рапса в зависимости от концентрации кадмия

Активность каталазы

При определении влияния кадмия на активность каталазы в этиолированных проростках рапса было обнаружено, что, если в контрольных проростках наблюдалось падение активности каталазы при увеличении возраста, то в экспериментальных проростках на 6-е и 10-е сутки проращивания происходит падение активности каталазы (рис.), с последующим ростом ее активности на 15-е сутки выращивания и повторным падением на 21-е сутки выращивания (рис. 5).

При этом, как видно из рис 5, у 7 — суточных проростков, наиболее сильно активность каталазы ингибировали более низкие концентрации кадмия в среде. При этом, при воздействии на растения высоких концентраций кадмия, активность каталазы в исследуемых проростках практически не менялась с 7 по 15 сутки, значительное падение отмечалось только на 21-е сутки эксперимента.

Необходимо отметить, что на 15-е сутки эксперимента активность каталазы в присутствии кадмия в среде была даже выше, чем у

контрольных проростков. Однако на 21-е сутки эксперимента в вариантах в присутствии кадмия активность каталазы у оставшихся в живых

проростков понизилась практически до нуля (рис. 5).

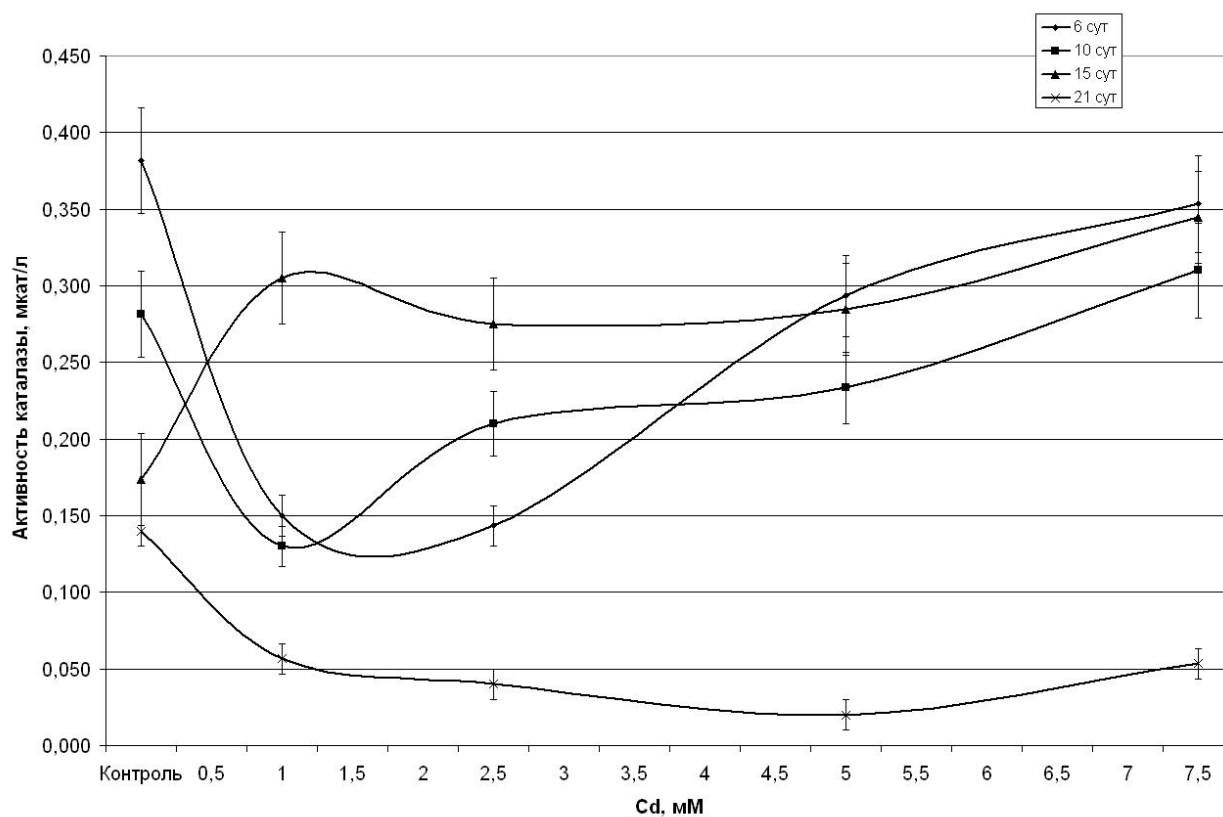


Рис. 5. Активность каталазы в проростках рапса при разных концентрациях CdCl_2 в среде.

Таким образом, активности пероксидазы и каталазы в этиолированных проростках рапса при наличии высоких концентраций кадмия в среде в течение длительного времени сохраняются на достаточно высоком уровне. При этом максимальная активность пероксидазы и каталазы смещаются в область более низких концентраций кадмия. В то же время уровень активности этих ферментов недостаточен для препятствования интенсификации процессов перекисного окисления липидов, в связи с чем накопление МДА в вариантах с высоким содержанием кадмия в среде значительно превышает его накопление в контрольных проростках того же возраста.

Изучение влияния разных концентраций кадмия на пшеницу (*Triticum aestivum*)

При изучении влияния кадмия на этиолированные проростки пшеницы отбор проб проводили на 6-е, 10-е и 14-е сутки проращивания.

В ходе экспериментов, было установлено, что в течение первых 6 суток проращивания присутствие кадмия оказывало на проростки пшеницы очень сильное ингибирующее воздействие. Как видно из рис. 6, по сравнению с контрольными проростками у опытных проростков, подвергнутых максимальной использованной концентрации кадмия, наблюдалась разница в весе более чем в 3 раза. При этом надо отметить, что, в отличие от рапса, при дальнейшем выращивании вес контрольных проростков пшеницы практически не менялся, а

вес проростков всех опытных вариантов, начиная с минимальной и вплоть до максимальной использованной концентрации кадмия за период с 6 — по 10 сутки выращивания увеличился. Это

увеличение веса этиолированных проростков пшеницы в экспериментальных вариантах с присутствием кадмия наблюдалось и при дальнейшем выращивании до 14 суток (рис. 6).

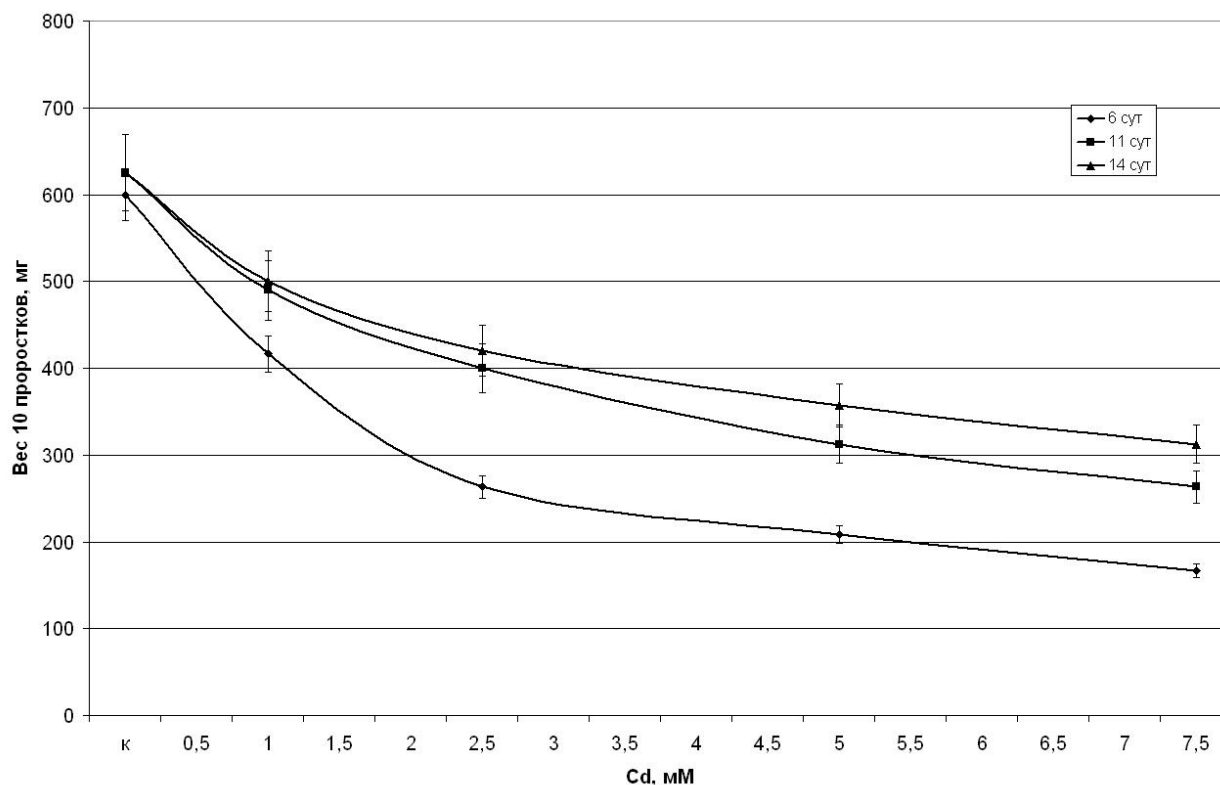


Рис. 6 Вес 10 проростков пшеницы в зависимости от концентрации кадмия, мг.

Интересно отметить, что кадмий оказывал несколько меньшее ингибирующее действие на увеличение длины проростков (рис.7) чем на увеличение их массы (рис.:6). Если масса контрольных проростков и проростков, выращенных при концентрации кадмия 5 мМ, составляла около 50%, то разница в их длине составляла около 36%.

Визуально токсичное воздействие кадмия на этиолированные проростки пшеницы, так же как и у проростков рапса, заключалось в

ингибировании роста проростков, снижение биомассы, уменьшение тургора, наблюдались различные внешние анатомические нарушения, и, наконец, гибель проростков.

Перекисное окисление липидов в проростках пшеницы

Отбор проб для измерения интенсивности процессов перекисного окисления липидов по накоплению МДА проводили на 6-е, 10-е и 14-е сутки выращивания.

В ходе эксперимента установлено, что у контрольных 6 и 10 суточных проростков пшеницы содержание МДА и, следовательно,

интенсивность процессов ПОЛ одинаково, а к 14 суткам наблюдается снижением активности ПОЛ (рис. 8).

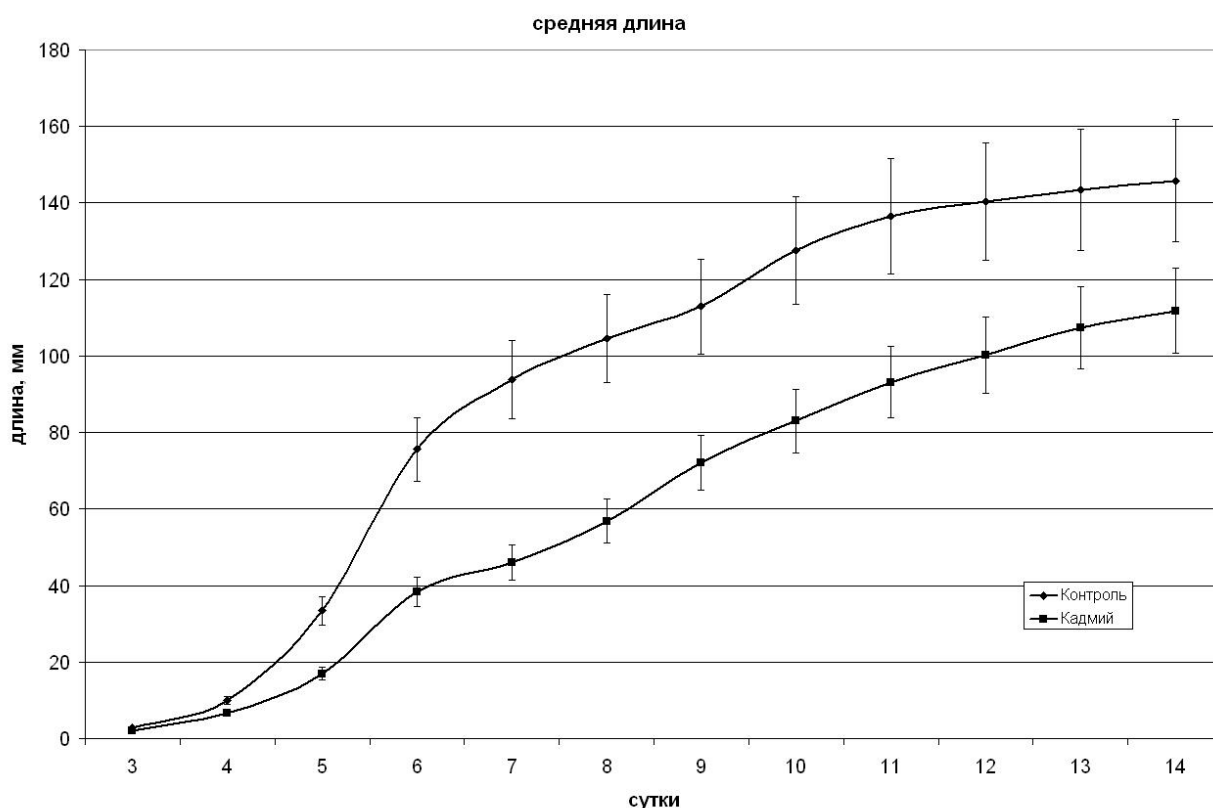


Рис. 7. Влияние 5 мМ CdCl_2 на длину проростков пшеницы.

В сравнении с контрольными пробами, у 6 — суточных проростков присутствие кадмия в среде при низких использованных концентрациях вызывало увеличение активности ПОЛ. Вместе с тем, при воздействии высоких концентраций кадмия на исследуемые проростки наблюдали отсутствие увеличения накопления МДА, что свидетельствует о том, что интенсивность ПОЛ в опытных проростках не превышает уровня ПОЛ в контроле.

Как видно из рис. 8, у 10 — суточных этилированных проростков, выращенных при всех использованных концентрациях кадмия, происходило снижение интенсивности ПОЛ как

по сравнению с контролем, так и по сравнению с 6 суточными проростками.

У 14 — суточных проростков пшеницы, присутствие кадмия в среде приводило к дальнейшему снижению уровня интенсивности ПОЛ по сравнению как с контролем, так и с 10 — суточными проростками. (рис. 8).

Таким образом, с увеличением возраста этилированных проростков пшеницы, выращенных в условиях действия от 0,5 мМ до 7,5 мМ кадмия в среде более 6 суток, наблюдали, в отличие от проростков рапса *Brassica napus*, у которых отмечался рост интенсивности процессов ПОЛ (рис. 3), отмечалось снижение

интенсивности образования продуктов ПОЛ

(рис.8).

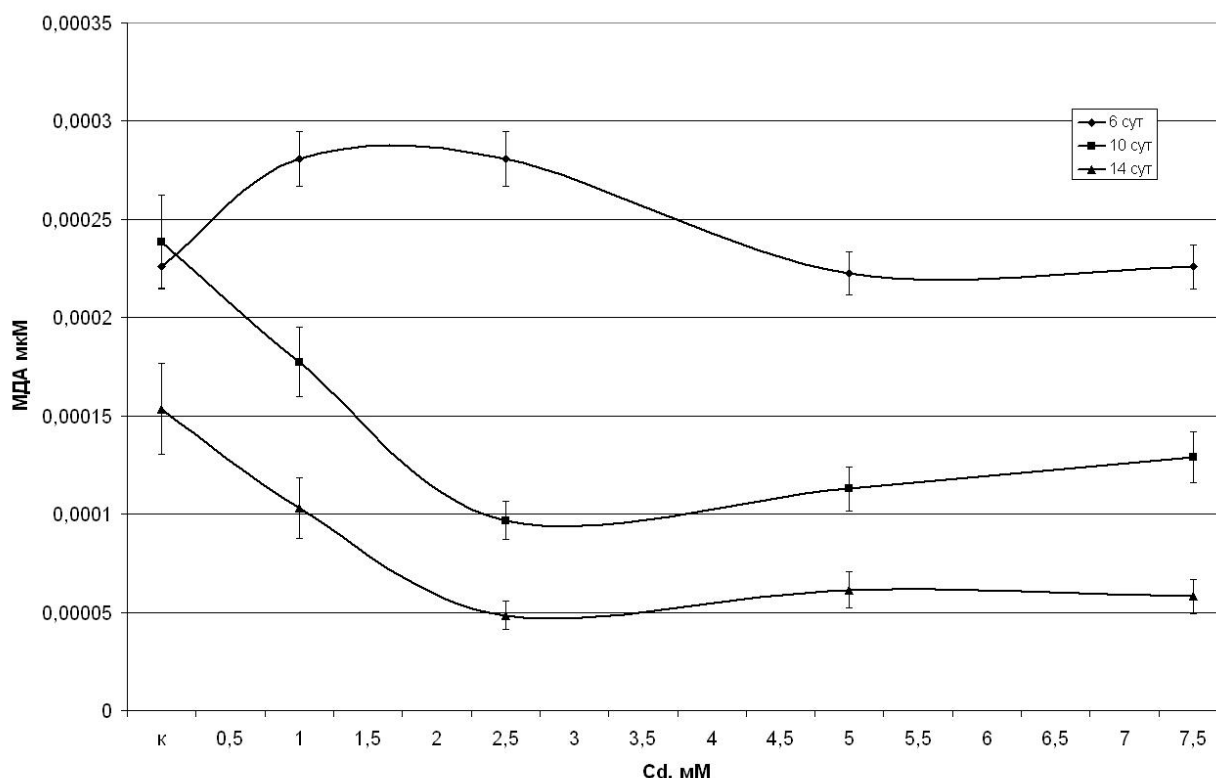


Рис. 8 Накопление МДА в проростках пшеницы в зависимости от концентрации кадмия.

Активность пероксидазы

При определении активности пероксидазы в проростках пшеницы (*Triticum aestivum* L.) было установлено, что у контрольных проростков и у 6 —, 10 — и 14 — суточных проростков пероксидазная активность различалась незначительно и находится в пределах 1,3 — 1,5 у.е. (Рис. 9), что в 7 раз выше, чем в контрольных проростках рапса (Рис. 4)..

Как видно из рисунка 9, у 6 — суточных проростков активность пероксидазы при всех использованных концентрациях кадмия возрастала. При этом, у проростков, выращенных при концентрации кадмия в среде от 0,5 до 7,5

мМ, активность пероксидазы была выше, чем у контрольных проростков и находилась в пределах 2,0 — 2,5 у.е. (Рис. 9),

При этом, у 10 — суточных проростков максимум активности в абсолютных цифрах значительно превышал таковой у 6 — суточных проростков и был также значительно выше, чем в контрольных проростках.

У 14 — суточных проростков максимум активности, наблюдавшийся у 10 - суточных при более высокой концентрации кадмия, исчезал и максимальные значения активности пероксидазы отмечались уже при низких концентрациях кадмия в среде (рис 9).

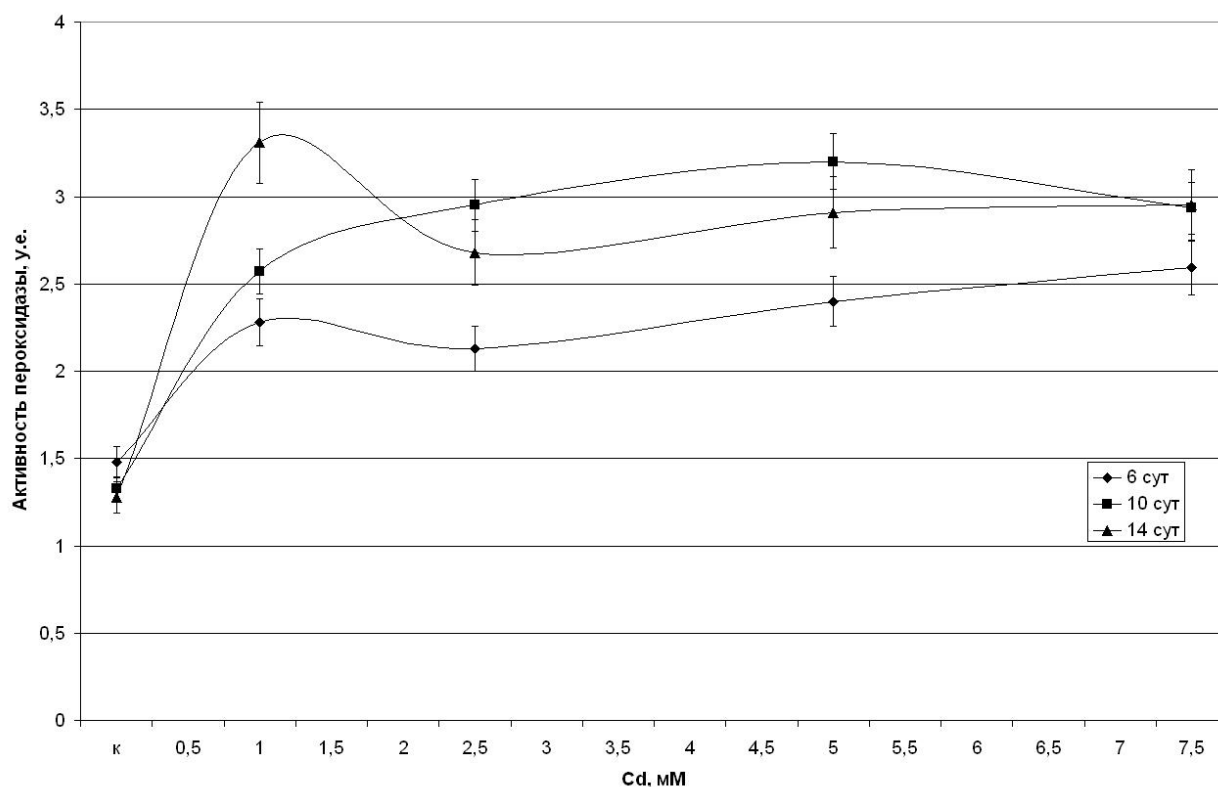


Рис. 9. Активность пероксидазы в проростках пшеницы в зависимости от концентрации кадмия.

В результате анализа полученных данных, можно утверждать, что при увеличении возраста проростков пшеницы активность пероксидазы возрастала, причем максимум ее активности с возрастом смещался в область более низких концентраций кадмия. Сравнивая данные по накоплению МДА и активности пероксидазы можно предположить, что достаточно низкий уровень накопления МДА под действием кадмия у пшеницы коррелирует с высокой активностью пероксидазы.

Активность каталазы

При определении каталазной активности у этиолированных проростков пшеницы, находящихся под воздействием от 0,5 мМ до 7,5 мМ кадмия в среде в период их выращивания обнаружили, что, в отличие от проростков рапса, у контрольных проростков пшеницы с возрастом наблюдается повышение активности фермента.

Как видно из рисунка 10 у 7 — суточных проростков уже концентрации от 0,5 мМ до 1 мМ кадмия вызвали значительное ингибирование активности по сравнению с контрольными проростками. Дальнейшее увеличение содержания кадмия до 7,5 мМ приводило к дальнейшему снижению активности данного фермента в исследуемых проростках (рис. 10).

У 10 — суточных проростков, все использованные концентрации кадмия также вызвали резкое снижение активности каталазы. При этом, активность каталазы в контрольных 10-суточных проростках была выше, чем у 7 - суточных контрольных проростков.

При исследовании 14 — суточных проростков пшеницы, рост, которых в это время был практически угнетен действием на них кадмия, обнаружили, что у проростков при действии на них от 0,5 мМ кадмия, активность каталазы была даже несколько выше, чем у контрольных

проростков, хотя это различие и не было статистически достоверно. При действии больших концентраций кадмия, активность

каталазы резко падала практически до соответствующих значений у 10-суточных проростков.

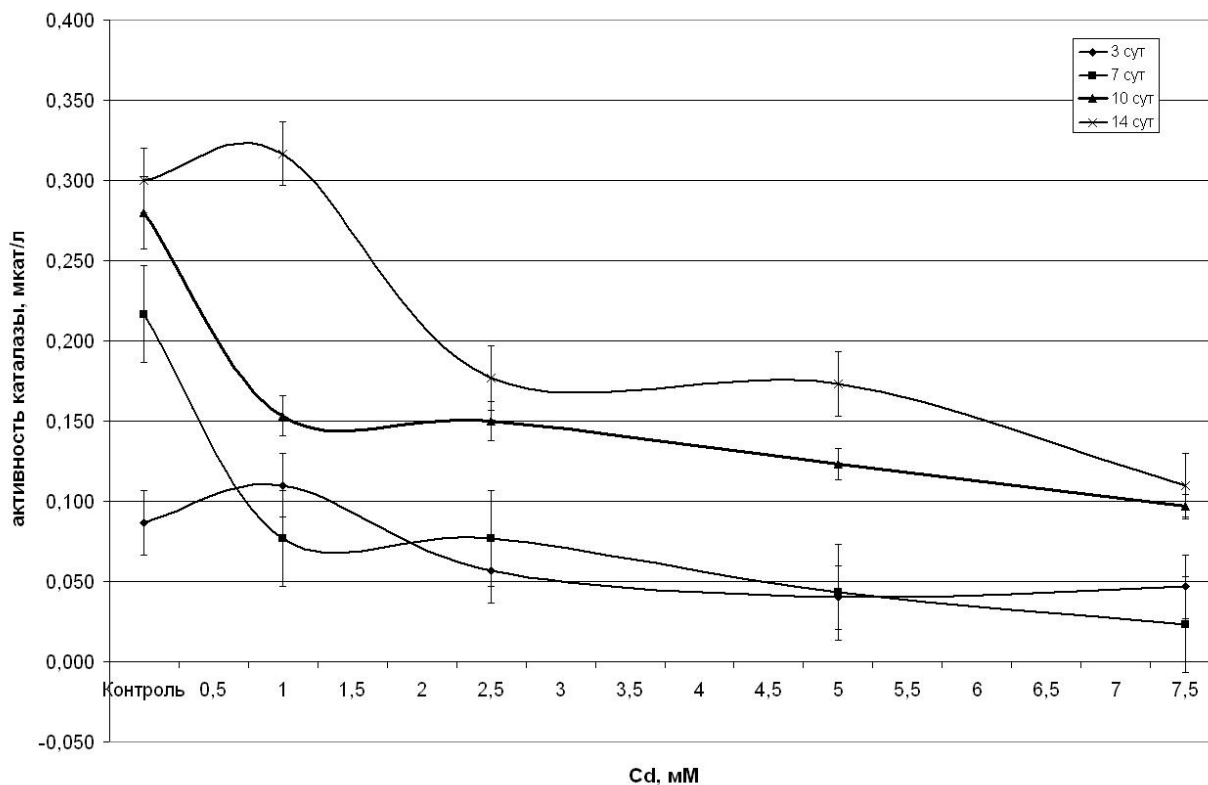


Рис. 10 Активность каталазы в проростках пшеницы в зависимости от концентрации кадмия.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что, в отличие от пероксидазы, уже в присутствии небольших концентраций кадмия в исследуемых растениях происходит ингибирование активности каталазы. При этом, при возрастании концентрации кадмия, ферментативная активность у всех экспериментальных проростков падает.

В целом, сравнивая влияние кадмия на этилированные проростки рапса и пшеницы можно отметить, что оно в значительной степени отличается даже по влиянию на рост и развитие. Если у рапса высокие концентрации кадмия сразу практически полностью ингибировали увеличение веса и роста проростков, то у пшеницы этот эффект воздействия кадмия был

выражен в гораздо меньшей степени. Также различалось и влияние кадмия на процессы перекисного окисления липидов. Более того, картина накопления МДА у рапса и пшеницы были противоположны. Если у рапса в целом кадмий вызывал интенсификацию процессов ПОЛ, то у пшеницы наблюдалась обратная картина – в большинстве вариантов кадмий вызывал снижение интенсивности процессов ПОЛ.

При этом, если у рапса активность гваякол-пероксидазы в большинстве вариантов опыта либо не менялась, либо падала по сравнению с контролем, то у пшеницы активность гваякол-пероксидазы росла в присутствии кадмия во всех вариантах опыта. Так же по разному изменялась с

возрастом у рапса и пшеницы активность каталазы. Если у контрольных проростков рапса активность каталазы падала, а обработка кадмием вызывала сначала рост активности, а только в конце эксперимента – ее падение, то у контрольных проростков пшеницы отмечался рост активности каталазы с возрастом, при этом обработка солями кадмия вызывала падение ее активности практически во всех вариантах эксперимента.

Интересно отметить, что устойчивость пшеницы в проведенных экспериментах к токсическому действию кадмия была близка к таковой ячменя и представителей семейства *Poaceae*, определенной Титовым с соавторами

(Титов и др., 2008). При этом более высокую устойчивость пшеницы к воздействию кадмия по сравнению с рапсом можно связать с более чем в 10 раз высокой активностью пероксидазы.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие выводы. Прежде всего, пшеница гораздо более устойчива к действию сверхвысоких концентраций кадмия, чем рапс, при этом в присутствии солей кадмия у нее происходит более низкое накопление продуктов перекисного окисления липидов. На порядок более высокая активность пероксидазы пшеницы по сравнению с пероксидазой рапса является одним из важных механизмов устойчивости пшеницы к действию токсиканта.

Литература

- Васин А.Е. (2007) Токсичность некоторых тяжелых металлов для инфузорий рода *Paramecium* *Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия*. №8 (58). 286-293
- Королук М. А., Иванова Л. И., Майорова И. Г., Токарев В. Е. (1988) Метод определения активности каталазы // *Лабораторное дело*. №1. 16–19.
- Кузнецов Вл. В., Дмитриева Г.А., (2005) Физиология растений, Москва, «Высшая школа», 736 с.
- Титов А.Ф., Казнина Н.М., Шалыго Н.В., Радюк М.С., Будакова Е.А., Лайдинен Г.Ф., Таланова В.В., Таланов А.В., Венжик Ю.В., Батова Ю.В. (2008) Устойчивость растений семейства POACEAE к кадмию // *Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: Материалы все-росс. конф. (22–27 сентября 2008 г.)*. Часть 6: Экологическая физиология и биохимия растений. Интродукция растений. Петрозаводск: КарНЦ РАН 129-131.
- Усманов И.Ю., Рахманкулова З.Ф., Кулагин А.Ю. (2001) Экологическая физиология растений. Москва, «Логос», 224
- Храпова Н.Г. О взаимодействии природных и синтетических антиоксидантов (1982) *Биоантиокислители в регуляции метаболизма в норме и патологии*. М., С. 59-73.
- Belimov, A.A, Safronova, V.I., Tsyganov, V.E., Borisov, A.Y., Kozhemyakov, A.P., Stepanok, V.V., Martenson, A.M., Gianinazzi-Pearson, V., Tikhonovich, I.A. (2003) Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.) *Euphytica* **131**, 1, Pages 25-35
- Bergmeyer H.U: (1974) *Methods of Enzymatic Analysis 1*, Academic Press, New York, 2nd Edition, page 495
- Bergmeyer HU. (1974) Reagents for enzymatic analysis. In: *Methods of Enzymatic Analysis Vol I* (Eds: Bergmeyer HU, Gawehn K) *Verlag Chemie*, Weinheim 494-495.
- Costa, H., Gallego, S.M., Tomaro, M.L. (2002) Effect of UV-B radiation on antioxidant

- defense system in sunflower cotyledons *Plant Science* **162** (6), 939-945
- Grant Ch. M., MacIver F.H., Dawes I.W. (1997) Mitochondrial function is required for resistance to oxidative stress in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* *FEBS Letters*, **410**, 219-222.
- Groppa MD, Tomaro ML, Benavides MP. (2006) Polyamines and heavy metal stress: the antioxidant behavior of spermine in cadmium- and copper-treated wheat leaves. *Biometals*. Oct 27; [Epub ahead of print]
- House WA, Hart JJ, Norvell WA, Welch RM. (2003) Cadmium absorption and retention by rats fed durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain. *Br J Nutr*. **89** (4):499-508.
- Ilg, K., Wilcke, W., Safronov, G., Lang, F., Fokin, A., Kaupenjohann, M. (2004) Heavy metal distribution in soil aggregates: A comparison of recent and archived aggregates from Russia *Geoderma* **123**, 1-2, 153-162
- Jin, X., Yang, X., Islam, E., Liu, D., Mahmood, Q. (2008) Effects of cadmium on ultrastructure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii* Hance *Journal of Hazardous Materials* **156**, 1-3, 387-397
- Lars, J. (2003) Hazards of heavy metal contamination *British Medical Bulletin*. **68**, 1, 167-182.
- Lindberg S, Landberg T, Greger M. (2007) Cadmium uptake and interaction with phytochelatins in wheat protoplasts. *Plant Physiol Biochem*. **45** (1):47-53.
- Mediouni, C., Benzarti, O, Tray, B., Ghorbel, M.H., Jemal, F. (2006) Cadmium and copper toxicity for tomato seedlings *Agronomy for Sustainable Development* **26**, 4, 227-232
- Rodríguez, L., Ruiz, E., Alonso-Azcárate, J., Rincón, J. (2009) Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management* **90**, 2, 1106-1116
- Stolt P., Asp H., Hultin S. (2006) Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations *Journal of Agronomy and Crop Science* **192** (3), 201–208.
- Webb, M. (1979) The Chemistry, Biochemistry and Biology of Cadmium. *North-Holland Biomedical Press*. Elsevier. 141-173.