

УДК 581.1

**ВЛИЯНИЕ СУЛЬФАТА КАДМИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ
КОНЦЕНТРАЦИЙ НА ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ**

© 2010 г.

Е.А. Ерофеева, М.М. Наумова

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

progresso.1812g@list.ru

Поступила в редакцию 04.04.2010

Исследовано влияние сульфата кадмия в широком диапазоне концентраций на физиолого-биохимические показатели (интенсивность липопероксидации, содержание хлорофиллов и каротиноидов, рост корневой системы и побега, устойчивость к осмотическому стрессу) проростков пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.). Выявлено немонокотное изменение всех исследованных показателей при увеличении концентрации сульфата кадмия, за исключением роста побега. Показано, что содержание хлорофиллов и каротиноидов, по сравнению с остальными исследованными показателями состояния гомеостаза проростков пшеницы, наиболее устойчиво к токсическому действию высоких концентраций сульфата кадмия.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., сульфат кадмия, липопероксидация, пигменты, рост, кросс-адаптация.

Введение

Одним из наиболее распространенных загрязнителей почв являются тяжелые металлы [1], в том числе и кадмий, оказывающий значительное токсическое воздействие на растения. Для изучения механизмов адаптации растений к негативному влиянию кадмия необходимо проведение исследований как в полевых условиях, так и в модельном эксперименте.

В настоящее время известно, что тяжелые металлы вызывают угнетение роста [2], нарушение процессов фотосинтеза [1], усиление интенсивности липопероксидации [3]. Однако существует ряд работ, в которых показано, что некоторые дозы тяжелых металлов способны оказывать положительное влияние на состояние растений: уменьшать интенсивность перекисного окисления липидов [4], стимулировать рост [1], повышать содержание пигментов [5].

Существование таких парадоксальных эффектов делает весьма актуальной проблему изучения дозовых зависимостей физиолого-биохимических показателей растений в широком диапазоне концентраций кадмия. Кроме того, для оценки влияния неблагоприятного фактора на живой объект в целом необходимо использование системных критериев состояния биосистемы, одним из которых может служить ее устойчивость к действию стрессоров [6]. Таким образом, целью настоящей работы было изучение влияния сульфата кадмия в широком

диапазоне доз на физиолого-биохимические показатели проростков пшеницы мягкой (интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ), содержание хлорофиллов и каротиноидов, рост корневой системы и побега) и их устойчивость к действию стрессового фактора в условиях модельного эксперимента.

Экспериментальная часть

Объектом исследования служили семидневные проростки пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) сорта Волжская, выращенные в лабораторных условиях при температуре 20–22°C и четырнадцатичасовом световом дне в чашках на подложке из фильтровальной бумаги. Контрольную группу выращивали на дистиллированной воде, опытные – на растворах сульфата кадмия различных концентраций, приготовленных с использованием дистиллированной воды, которые каждый день заменяли на свежие. Концентрации кадмия были подобраны на основании данных предварительных экспериментов таким образом, чтобы максимальное содержание тяжелого металла в растворе было токсичным для пшеницы, но не вызывало гибели растений (таблица). Растения каждой из групп выращивали в 5 чашках (по 120–150 растений в каждой чашке) в течение 7 суток, определение физиолого-биохимических показателей и устойчивости растений осуществляли на 8-е сутки эксперимента.

Таблица

Концентрации сульфата кадмия, использованные в эксперименте

№ группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 контроль
CdSO ₄ , % (x10 ⁻³)	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.03125	0

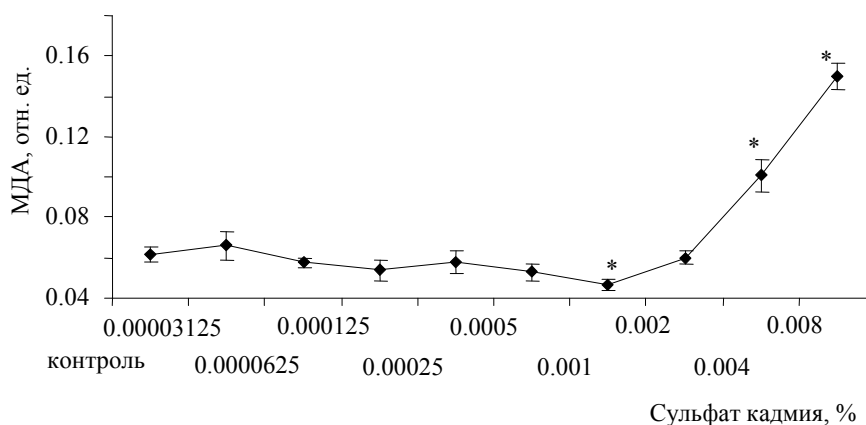


Рис. 1. Влияние сульфата кадмия на интенсивность липопероксидации у проростков пшеницы

Примечание: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю

При оценке биохимических показателей из каждой чашки отбирали по четыре независимые пробы (1 проба – 350 мг сырых побегов, около 20 побегов в 1 пробе), две из которых использовали для оценки интенсивности перекисного окисления липидов, две – для определения содержания пигментов. Таким образом, интенсивность липопероксидации и содержание пигментов для каждой группы определяли в 10 биологических повторностях ($n = 10$).

Интенсивность перекисного окисления липидов оценивали по содержанию малонового диальдегида (МДА) с использованием стандартной методики, основанной на образовании окрашенного комплекса с максимумом поглощения 532 нм при взаимодействии МДА с тиобарбитуровой кислотой [7].

Содержание фотосинтетических пигментов – каротиноидов и хлорофиллов А и В – определяли общепринятым методом абсорбционной спектрофотометрии. Для экстракции пигментов использовали 80%-ный ацетон [8].

Для изучения влияния сульфата кадмия на ростовые процессы в каждой из групп измеряли длину побега и максимальную длину корневой системы у 50 проростков пшеницы (по 10 растений из каждой чашки) [9].

Устойчивость проростков к осмотическому стрессу оценивали, помещая на 30 мин 100 растений (по 20 из чашки) каждой группы в насыщенный раствор хлорида натрия ($t = 20^\circ\text{C}$) и определяя долю проростков, сохранивших тур-

гор (не потерявших вертикальное положение) к концу экспозиции.

Статистический анализ полученных данных проводили, используя ПП STATISTICA 6.0 и программу БИОСТАТИСТИКА 3.11. Так как распределение исследованных показателей не отличалось от нормального (установлено с использованием критерия Шапиро – Уилкса), статистическую обработку данных осуществляли с помощью параметрических критериев: однофакторного дисперсионного анализа, критерия Стьюдента с поправкой Бонферрони. Кроме того, для анализа качественных признаков использовали критерий хи-квадрат.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов было обнаружено, что изменение интенсивности перекисного окисления липидов у проростков *T. aestivum* при действии сульфата кадмия имело двухфазный характер (рис. 1). В области относительно низких концентраций соли ($0.5 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}\%$) отмечалось уменьшение уровня МДА (на 14–24% по сравнению с контролем; $p < 0.05$). Наиболее высокие из исследованных концентраций сульфата кадмия ($2 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}\%$) приводили к значительному увеличению содержания МДА (до 2.4 раз по сравнению с контролем; $p < 0.05$) (рис. 1). Необходимо отметить, что немонокотное изменение содержания МДА было выявлено нами ранее также при изучении действия

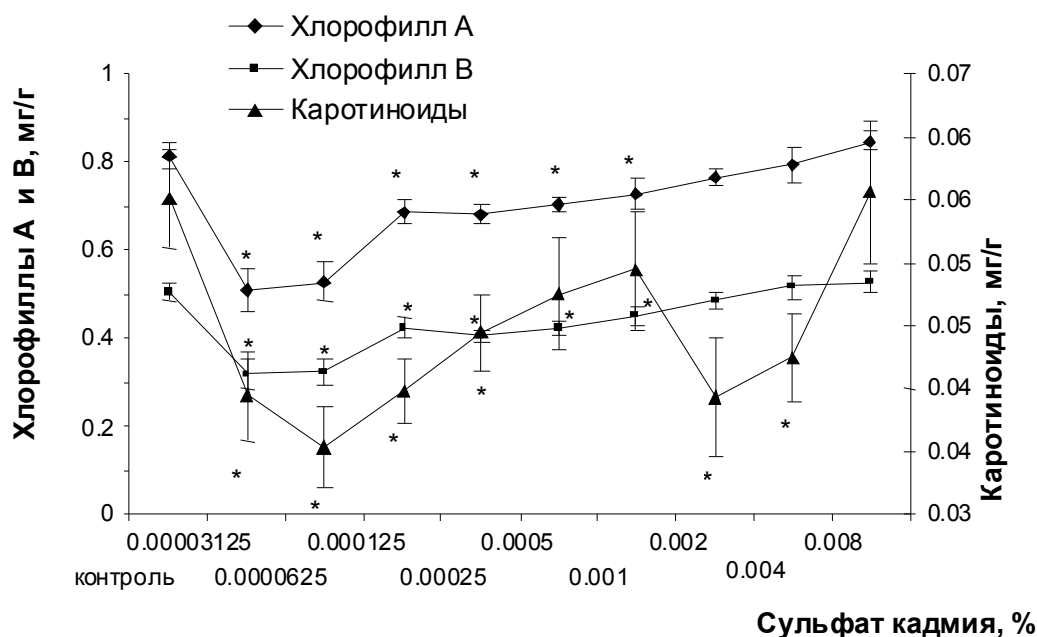


Рис. 2. Влияние сульфата кадмия на содержание фотосинтетических пигментов у проростков пшеницы
Примечание: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю

нитрата свинца на состояние проростков пшеницы [10].

Известно, что при высоком уровне загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами они могут вызывать развитие хлороза листа, что преимущественно обусловлено нарушением синтеза хлорофиллов [1]. Действительно нами было установлено, что сульфат кадмия в концентрациях ($0.03125 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-3}\%$) приводил к достоверному снижению количества хлорофиллов А и В по сравнению с уровнем растений контрольной группы (рис. 2). Однако в области наиболее высоких концентраций соли ($2 \cdot 10^{-3}$ – $8 \cdot 10^{-3}\%$) количество хлорофиллов в побегах *T. aestivum* возрастало до уровня растений контрольной группы (рис. 2). В целом динамика изменения уровня хлорофиллов А и В в побегах *T. aestivum* при действии кадмия была во многом сходна (рис. 2).

Для другой группы фотосинтетических пигментов – каротиноидов – зависимость содержания от концентрации кадмия имела иной характер. В области относительно низких концентраций соли кадмия, вызвавших уменьшение количества хлорофиллов, также отмечалось снижение содержания каротиноидов до 35% по отношению к контролю (рис. 2). Однако дальнейшее возрастание концентрации сульфата кадмия до $0.5 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-3}\%$ нормализовало уровень каротиноидов ($p > 0.05$). Затем снова происходило снижение содержания данных пигментов ($2 \cdot 10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-3}\%$). И, наконец, при наиболее высокой концентрации соли ($8 \cdot 10^{-3}\%$)

содержание каротиноидов опять достигало уровня контрольной группы (рис. 2). Таким образом, изменение содержания каротиноидов имело многофазный характер, в отличие от хлорофиллов, на зависимости уровня которых от концентрации соли можно выделить только две фазы.

Зависимость длины корневой системы и побега проростков пшеницы от концентрации сульфата кадмия была практически монотонной. За исключением незначительного усиления роста корня (на 10% по сравнению с контролем) при концентрации сульфата кадмия $0.25 \cdot 10^{-3}$ – $0.5 \cdot 10^{-3}\%$ в целом отмечалось существенное угнетение ростовых процессов при увеличении содержания тяжелого металла в питательном растворе (рис. 3).

Сульфат кадмия вызывал повышение устойчивости проростков пшеницы к осмотическому стрессу в ряде исследованных концентраций ($0.03125 \cdot 10^{-3}$ – $0.125 \cdot 10^{-3}\%$; $1 \cdot 10^{-3}\%$), которые чередовались с концентрациями тяжелого металла, не влиявшими на данный показатель ($0.25 \cdot 10^{-3}$ – $0.5 \cdot 10^{-3}\%$) и даже снижавшими его ($2 \cdot 10^{-3}$ – $8 \cdot 10^{-3}\%$) (рис. 4).

Таким образом, выявлено немонотонное изменение почти всех исследованных показателей состояния проростков пшеницы при увеличении концентрации сульфата кадмия, за исключением роста побега. Следует отметить, что в области наиболее высоких из исследованных концентраций сульфата кадмия наблюдались существенные сдвиги большинства показателей, соответствующие токсиче-

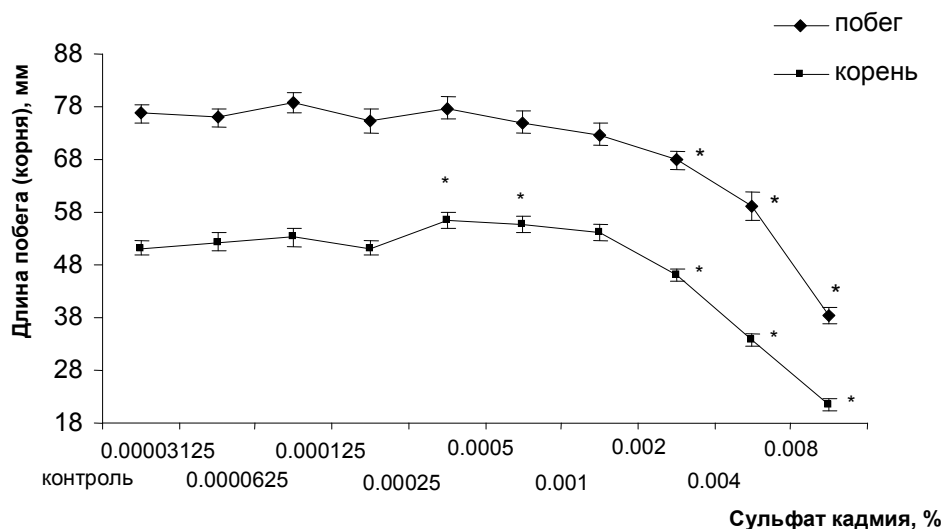


Рис. 3. Влияние сульфата кадмия на линейные размеры побега и корневой системы у проростков пшеницы
Примечание: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю

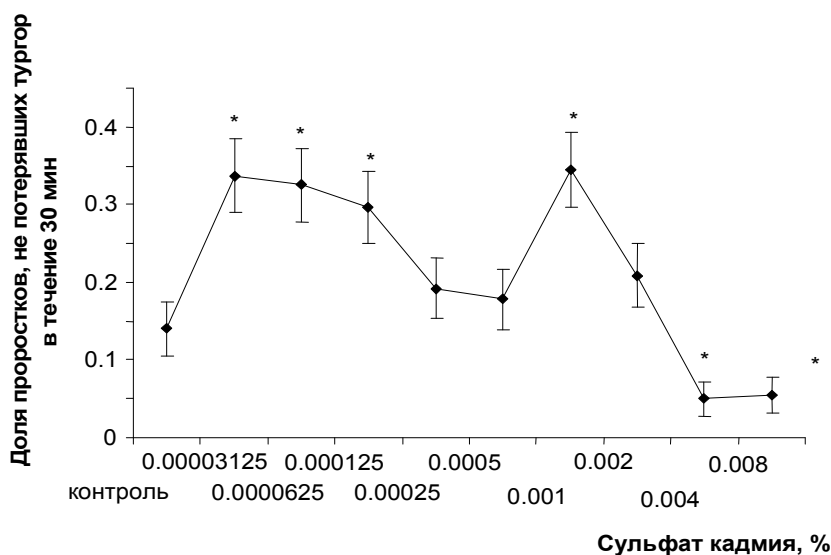


Рис. 4. Влияние сульфата кадмия на устойчивость проростков пшеницы к хлориду натрия в гиперосмотической концентрации
Примечание: * – $p < 0.05$ по отношению к контролю

скому действию тяжелого металла (значительное угнетение ростовых процессов корневой системы и побега, резкое возрастание интенсивности липопероксидации и снижение устойчивости к осмотическому стрессу). В то же время данные концентрации сульфата кадмия вызвали нормализацию содержания хлорофиллов и каротиноидов. Возможно, что при адаптации к высоким дозам тяжелых металлов происходит исчерпание адаптационного потенциала растения, что вызвано дефицитом энергоресурсов. В связи с этим для выживания в данных условиях наиболее актуально поддержание процессов фотосинтеза (в

том числе и уровня фотосинтетических пигментов) как источника энергетических ресурсов растения.

Возможно, что немонотонные изменения исследованных показателей пшеницы обусловлены различными порогами активации защитных систем растения и, соответственно, постепенным вовлечением их в процесс адаптации к повреждающему действию тяжелого металла при возрастании его концентрации. Необходимо отметить, что несмотря на немонотонные изменения большинства исследованных нами показателей состояния гомеостаза пшеницы, далеко не всегда такие изме-

нения были синхронны. То есть при нормализации одних параметров могло наблюдаться отклонение других от уровня контроля. Возможно данный факт может быть обусловлен спецификой действия кадмия, а также различной ролью данных параметров гомеостаза растения в процессе адаптации.

В целом следует заключить, что немонотонная зависимость от силы повреждающего фактора (концентрации сульфата кадмия) характерна не только для отдельных показателей состояния гомеостаза проростков пшеницы, но и состояния растения в целом, о чем свидетельствует многофазное изменение устойчивости к осмотическому стрессу.

Список литературы

1. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.
2. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
3. Zhanq F.Q., Wang Y.S., Lou Z.P., Donq J.D. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*) // Chemosphere. 2007. 67(1). P. 44–50.
4. Башмаков Д.И. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород: ННГУ, 2002. 23 с.
5. Stiborova M., Daubravova M., Brezcinova A. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley *Hordeum vulgare* L. // Photosynthetica. 1986. V. 20. P. 418–425.
6. Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Кузьменко Т.С. Антистрессорные реакции и активационная терапия. Реакция активации как путь к здоровью через процессы самоорганизации. М.: ИМЕДИС, 1998. 617 с.
7. Жиров В.К., Мерзляк М.Н., Кузнецов Л.В. Перекисное окисление мембранных липидов холодостойких растений при повреждении отрицательными температурами // Физиология растений. 1982. Т. 29. С. 1045–1052.
8. Гавриленко В.Ф., Жигалов Т.В. Большой практикум по фотосинтезу. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 253 с.
9. Wilkins D.A. A Technique for the Measurement Lead Tolerance in Plants // Nature. 1957. V. 180. Issue 4575. P. 38.
10. Ерофеева Е.А., Наумова М.М., Лисицына О.Н. // Тез. докл. междунар. конф. «Физико-химические основы структурно-функциональной организации растений», Екатеринбург, 20–25 октября 2008 г. С. 170–171.

INFLUENCE OF CADMIUM SULFATE IN A WIDE RANGE OF CONCENTRATIONS ON PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF WHEAT SEEDLINGS

Е.А. Erofeeva, М.М. Naumova

The influence of cadmium sulfate in a wide range of concentrations on physiological and biochemical parameters (lipid peroxidation intensity, chlorophyll and carotenoid content, root system and shoot growth, resistance to osmotic stress) of wheat (*Triticum aestivum* L.) has been studied. Nonmonotonic change of all parameters (except shoot growth) with the increase of cadmium sulfate concentration has been revealed. The chlorophyll and carotenoid content has been shown to be the most stable parameter in terms of resistance to the toxic action of high concentrations of cadmium sulfate.

Keywords: *Triticum aestivum* L., cadmium sulfate, lipid peroxidation, pigments, growth, cross-adaptation.