

На правах рукописи

Плеханова Вера Александровна

**ХАРАКТЕР СОПРЯЖЕНИЯ НАКОПЛЕНИЙ
ЦИНКА И КАДМИЯ РАСТЕНИЯМИ
В УСЛОВИЯХ ФИТОЦЕНОЗА И АГРОКУЛЬТУРЫ**

Специальности 03.00.16 – экология и
03.00.12 – физиология и биохимия растений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Уфа - 2007

Работа выполнена в Институте экологии природных систем Академии наук Республики Татарстан

Научный руководитель доктор биологических наук, профессор
Зялалов Абдуллазян Абдулкадырович

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор
Кудоярова Гюзель Радомесовна

доктор биологических наук, профессор
Усманов Искандер Юсуфович

Ведущая организация: Казанский государственный университет

Защита состоится 12 ноября 2007 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Регионального диссертационного совета КМ 002.136.01 при Институте биологии Уфимского научного центра РАН по адресу: 450054 г. Уфа, Проспект Октября, 69, тел./факс 8(347)235-62-47, E-mail: urv@anrb.ru; ib@anrb.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского научного центра РАН и на официальном сайте: <http://www.anrb.ru/inbio/dissovet/index.htm>

Автореферат разослан 8 октября 2007 г.

Ученый секретарь Регионального
диссертационного совета
кандидат биологических наук, доцент



Р.В. Уразгильдин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Возрастание нагрузки биосферы тяжелыми металлами неизбежно вследствие нарастания антропогенного воздействия на среду, в особенности, в процессе трансформации энергии не возобновляемых энергоносителей. Кадмий – один из наиболее токсичных тяжелых металлов и представляет реальную опасность для здоровья населения. Очень близок по химическим свойствам к кадмию цинк, но, как известно, эти элементы кардинально отличаются по биологической значимости и уровням токсичности. До 40% населения планеты испытывает недостаток цинка в рационе питания, который вызван дефицитом содержания его фитодоступных форм в сельскохозяйственных почвах многих регионов (Graham et al., 1992). Другое последствие Zn-дефицитных почв – значительное накопление кадмия в растениях, даже при небольших его содержаниях в почвах (Сакмак, Браун, 2001). Такое положение вызывает пристальный интерес исследователей во всем мире к проблеме взаимодействия цинка и кадмия в системе почва – растения.

Значительное химическое сходство обуславливает сходство транспорта цинка и кадмия в растениях, что, по мнению одних авторов, должно приводить к положительной корреляции их накопления (Grant et al., 1998; Алексеенко, 2000), а, по мнению других, – к отрицательной (Aravind, Prasad, 2005). Однако во множестве исследований отмечены как положительная, так и отрицательная корреляция поглощения и транслокации кадмия и цинка, а также отсутствие какой-либо связи (Carillo-Gonsales y set., 2003). Противоречивость данных, по всей вероятности, обусловлена влиянием на характер взаимодействия сочетания различных факторов: внешних (среда) и внутренних (генотип).

подавляющее число работ по всему комплексу проблем, связанных с тяжелыми металлами, в том числе, с кадмием и цинком, проводится с сельскохозяйственными культурами. Исследования в естественных фитоценозах немногочисленны, к тому же значительная их часть ограничивается поиском видов, пригодных для фиторемедиации. О видовой специфике накопления и взаимодействия тяжелых металлов у дикорастущих видов известно немного, хотя такие сведения важны для характеристики естественных пищевых цепей и выявления меры влияния тяжелых металлов на состояние биологического разнообразия естественных фитоценозов.

Таким образом, исследование взаимодействующей транслокации цинка и кадмия в растениях актуально с точки зрения изучения закономерностей формирования биоты окружающей среды и в целях разработки способов управления минеральным составом продукции растениеводства.

При этом, очевидно, следует сосредоточиться на выявлении факторов обуславливающих тот или иной характер сопряжения накопления и транслокации в растениях кадмия и цинка.

В связи с этим **цель** данной работы — выявление условий, определяющих характер взаимовлияния кадмия и цинка на их накопление в растениях; оценка меры воздействия на это взаимовлияние отдельных факторов среды и видовых различий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. В увязке с оценкой факторов среды исследовать видовую специфику накопления кадмия и цинка на примерах растений различных экосистем.
2. Исследовать накопление кадмия и цинка в растениях в модельных опытах с варьированием ряда эдафических факторов.

Научная новизна. Получены новые сведения о характере взаимовлияния кадмия и цинка на их накопление и влияния на него ряда факторов среды и видовых особенностей растений, произрастающих в различных фитоценозах и агрокультуре.

Практическая значимость. Обнаруженные закономерности накопления кадмия и цинка в растениях и влияния на него внешних факторов и видовой специфики являются основой разработки агрохимических способов снижения содержания кадмия в продукции растениеводства.

Положение, выносимое на защиту: характер сопряжения и уровни накопления кадмия и цинка в растениях естественных фитоценозов и агрокультуры определяются сочетанием экологических и видоспецифических факторов.

Личный вклад автора. Организация и проведение лабораторных экспериментов. Отбор и подготовка для анализа образцов субстрата и растений из естественных и искусственных экосистем. Определение содержания в образцах кадмия и цинка атомно-абсорбционным методом; анализ растений на содержание углеводов. Определение видов в естественных фитоценозах выполнено сотрудницей факультета географии и экологии Казанского государственного университета Коротковой Г.Г.

Публикации. Результаты исследований изложены в двух статьях в журнале «Агрохимия», рекомендованном ВАК РФ. Всего по материалам диссертации опубликовано 9 работ.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на: V, VI республиканских научных конференциях «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан» (Казань, 2002; 2004); конференции, посвященной 125-летию Казанского государственного педагогического университета (Казань, 2002); всероссийской конференции «Современные аспекты экологии и экологического образования» (Казань, 2005).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 152 страницах, включает 18 рисунков, 12 таблиц. Состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, 3 приложений. Список цитированной литературы включает 233 источника, из них 180 на иностранных языках.

Автор выражает сердечную благодарность своему научному руководителю профессору Зялалову А.А. за постоянную помощь на всех этапах выполнения работы. Сотруднице факультета географии и экологии КГУ Коротковой Г. Г. за определение видов растений и помощь в отборе образцов. Особую признательность коллективу агрохимической лаборатории агрокомбината «Майский» за всестороннюю поддержку и помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние проблемы (обзор литературы)

В обзоре литературы сделано краткое сопоставление химических и геохимических свойств кадмия и цинка, изложены сведения о содержании обоих металлов в почвенно-растительном комплексе, рассмотрено влияние на поглощение этих элементов ряда почвенных факторов, а также видовой и сортовой специфичности растений. Обобщены сведения о транспорте кадмия и цинка на клеточном и организменном уровнях. Также кратко обобщены данные о влиянии цинка и кадмия на организм человека.

Глава 2. Объекты и методы проведения исследований

Объектом исследований были: 1) травы, произраставшие в пяти естественных фитоценозах на границе г. Казань и пригородного лесничества, в каждом фитоценозе была заложена одна пробная площадка 10 м^2 , отбирались образцы всех видов растений, которые разделялись на корни, стебли, листья; 2) растения, выращенные в лабораторно-вегетационных опытах, образцы растений делились на корни и надземную часть; 3) плоды томата, выращенные в защищенном грунте в ООО «Майский». В естественных фитоценозах отбирались образцы почвы методом конверта. В лабораторно-вегетационных опытах и в защищенном грунте отбирались образцы субстрата во всех вариантах. В лабораторно-вегетационных опытах растения выращивались гидропонным методом, твердым субстратом служил керамзит. Питательный раствор Кнопа полной (1К) и половинной (0,5 К) концентрации с рН 4,5 и 5,5 – интервал рН, при котором активность цинка и кадмия в растворе наивысшая (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) – служил также и поливным раствором. В защищенном грунте проводились опыты по изучению влияния возрастающих доз микроудобрения цинка (от 0,06 до 0,18 мг/л в питательном растворе) и двух субстратов (цеолита и торфоопилы) на рост и развитие растений томата. Всего проанализировано 818 образцов растений и 152 образца субстрата. Кадмий и цинк в образцах определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии. В почве определялись подвижные формы металлов с аммонийно-ацетатным буфером с рН 4,8 (Ермаченко, 1997). В искусственных твердых субстратах кислоторастворимые формы извлекались 1н HCl (Сборник методик ..., 1998). В растительных образцах после сухого озоления тяжелые металлы экстрагировались из золы HCl (Сборник методик ..., 1998). Углеводы в растениях озимой пшеницы, выращенных в лабораторных опытах, определялись методом фотоэлектроколориметрии с антроном (Методы ..., 1972). Для характеристики накопления кадмия и цинка в растениях подсчитывались следующие коэффициенты: коэффициент концентрирования (K_k) – отношение содержания элемента в сухой массе растений к содержанию в почве его подвижных форм; коэффициент корневого барьера ($K_{кб}$) – отношение содержания элемента в корне растения к его содержанию в надземной части

(сухая масса); коэффициент ОСВР – относительное содержание элемента в видах, растущих в сопоставимых условиях: отношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в золе эталонного вида (Ковалевский, 1991). Виды, попавшие в диапазон значений ОСВР от 0,40 до 2,40, у Ковалевского никак не обозначенный, мы назвали индикаторами по Baker (Baker, 1981). Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Microsoft Excel.

Глава 3. Результаты и их обсуждение

3.1. Закономерности накопления кадмия и цинка в растениях естественных фитоценозов

Как известно, ведущими факторами формирования элементного состава растений являются видовая специфика и среда, и долевое участие каждого меняется в зависимости от изменений экологических условий (Панин, 1999).

Для определения соотношения влияния видовой спецификации и ряда факторов среды в накоплении цинка и кадмия мы исследовали пять площадок в естественных фитоценозах. Тип почвы – серая лесная. Всего на этих площадках произрастали 70 видов трав, принадлежащих к 26 семействам. Данные по среднему содержанию кадмия и цинка в почве и растениях на каждой пробной площадке представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Среднее содержание кадмия в почве и растениях (мг/кг сухой массы) и значения коэффициента концентрирования (K_k)

№ площадки	Название сообществ растений по доминирующим видам	почва	растения	K_k
1	<i>Geranium pratense</i> + <i>Dactylis glomerata</i> + <i>Festuca pratensis</i>	0,16±0,01	0,36±0,09	2,3
2	<i>Quercus robur</i> + <i>Tilia cordata</i> – <i>Aegopodium podagraria</i>	0,22±0,01	0,43±0,22	2,0
3	<i>Glechoma hederaceae</i> + <i>Lysimachia nummularia</i> + <i>Ranunculus repens</i>	0,23±0,009	0,47±0,23	2,0
4	<i>Artemisia absinthium</i> + <i>Elytrigia repens</i> + <i>Calamagrostis epigeios</i>	0,33±0,02	0,65±0,38	2,0
5	<i>Calamagrostis epigeios</i> + <i>Dactylis glomerata</i> + <i>Glechoma hederaceae</i>	0,36±0,02	0,62±0,36	1,7

Примечание: сообщества растений расположены в порядке возрастания содержания кадмия в почве.

Содержание подвижных форм кадмия в почве характеризуется как высокое, а содержание подвижных форм цинка – низкое (Обухов, 1992). Содержание кадмия по видам растений изменялось в пределах от 0,10 до 1,76 мг/кг сухой массы, содержание цинка – от 2,38 до 65,75 мг/кг сухой массы. Содержание кадмия и цинка в исследуемых растениях сравнивали с фоновым содержанием обоих металлов, которое для кадмия находится в интервале 0,05-0,60 мг/кг сухой массы, для цинка 12,0 – 60,0 мг/кг сухой массы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Сравнение концентраций кадмия в почве и в растениях обнаружило почти прямую зависимость содержания кадмия в растениях от содержания его подвижных форм в почве (табл. 1), что отражают и сравнительно близкие величины коэффициента концентрирования.

Таблица 2

Среднее содержание цинка в почве и растениях (мг/кг сухой массы) и значения коэффициента концентрирования (K_k)

№ площадки	Название сообществ растений по доминирующим видам	почва	растения	K_k
4	<i>Artemisia absinthium</i> + <i>Elytrigia repens</i> + <i>Calamagrostis epigeios</i>	0,50±0,26	21,77±9,19	43,5
3	<i>Glechoma hederaceae</i> + <i>Lysimachia nummularia</i> + <i>Ranunculus repens</i>	1,12±0,04	19,32±9,14	17,3
2	<i>Quercus robur</i> + <i>Tilia cordata</i> – <i>Aegopodium podagraria</i>	1,22±0,07	35,36±18,75	29,0
1	<i>Geranium pratense</i> + <i>Dactylis glomerata</i> + <i>Festuca pratensis</i>	1,41±0,13	20,67±5,43	14,7
5	<i>Calamagrostis epigeios</i> + <i>Dactylis glomerata</i> + <i>Glechoma hederaceae</i>	1,87±0,65	25,07±8,69	13,4

Примечание: сообщества растений расположены в порядке возрастания содержания цинка в почве.

Зависимость накопления цинка в растениях от содержания его подвижных форм в почве была не столь однозначной, как для кадмия (табл. 2). Можно предположить, что на это повлияла неоднородность условий произрастания растений в различных фитоценозах. На площадках № 4 и № 2 условия среды для растений были хуже, чем в других фитоценозах. На площадке № 4 было очень низкое содержание подвижного цинка в почве, тем не менее, растения накопили достаточные для жизнедеятельности количества этого элемента. На площадке № 2 растения росли при постоянной затененности, при невысоком содержании подвижного цинка в почве они накопили наибольшее количество этого металла. Это свидетельствует о том, что теневыносливые растения в

условиях недостаточной освещенности имеют бóльшую потребность в цинке. Следовательно, разнородные экологические условия привели к одинаковому результату – повышенному поглощению растениями цинка в менее благоприятных для жизнедеятельности фитоценозах.

Несмотря на зависимость накопления растениями обоих металлов от содержания их подвижных форм в почве, вариации содержания кадмия и цинка между видами в одном фитоценозе были значительные (до 10 раз для кадмия и до 19 раз для цинка). Следовательно, в накоплении обоих элементов играла роль и видовая специфика растений, которую отражает подсчет коэффициентов ОСВР (рис. 1). Как видно из рисунка 1, количественное распределение видов растений по группам накопления обоих элементов было почти одинаковое.

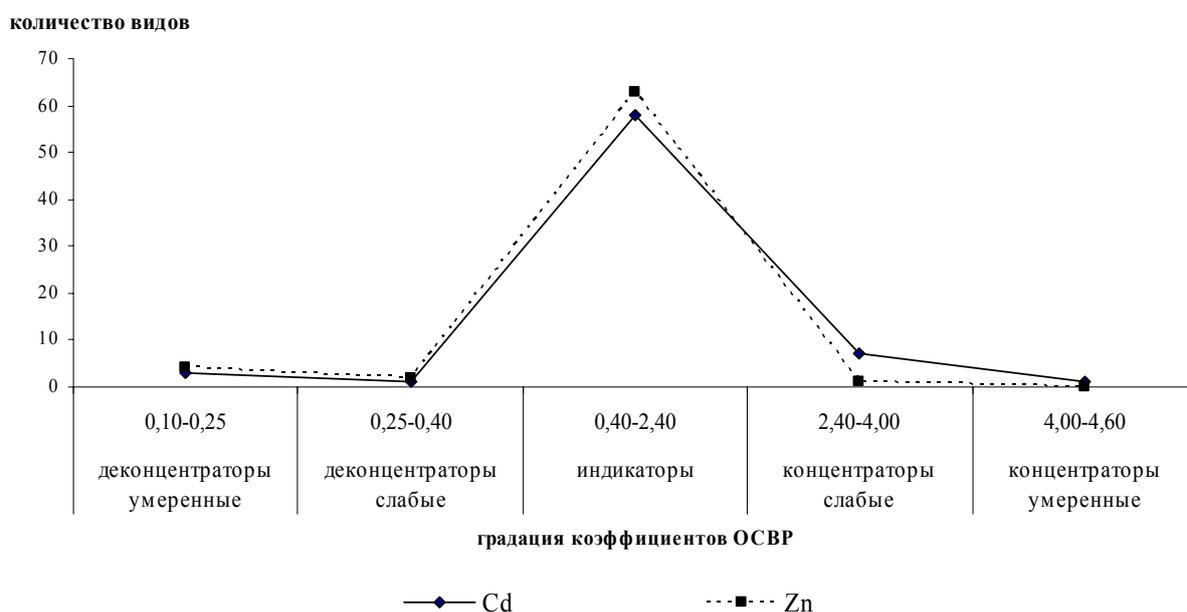


Рис. 1. Количество видов, входящих в группы по коэффициентам ОСВР, которые характеризуют накопление кадмия и цинка в растениях

В качестве вида-эталона была выбрана будра плющевидная (*Glechoma hederaceae* L.) по следующим критериям: вид встречался в трех фитоценозах, на площадках № 3 и № 5 доминировал, содержание цинка и кадмия в золе было близким к среднему среди 70 видов. Коэффициенты ОСВР показали, что подавляющее количество видов (83% по кадмию и 90% по цинку) являлись индикаторами почвенного содержания кадмия и цинка, причем индикаторами были и все доминантные виды. Такой характер распределения видов по группам накопления обоих элементов наблюдался в каждом исследованном фитоценозе. Необходимо отметить, что коэффициент ОСВР, введенный Ковалевским для биогеохимического поиска и оценки накопления металлов в растениях, произрастающих над рудными месторождениями (Ковалевский, 1991), оказался информативным показателем, отражающим распределение цинка и кадмия в фитоценозе и позволяющим оценить устойчивость сообщества растений к накоплению кадмия.

По мнению ряда исследователей, сходство транспортных путей кадмия и цинка в растении обусловлено их близкими химическими свойствами, и это сходство должно обуславливать положительную корреляцию накопления обоих металлов (Grant et al., 1998; Алексеенко, 2000). Наши исследования подтвердили это предположение: каждый вид накапливал цинк и кадмий с положительной корреляцией, величины коэффициента корреляции располагались в диапазоне от 0,61 до 0,99.

Для ряда других микроэлементов установлена высокая положительная корреляция (до $r = 1$) их накопления растениями в естественных фитоценозах (Проблемы экологии... Южного Урала, 2003).

Каждый член множества определяет свойства этого множества, поэтому мы предположили, что и в сообществе растений возможна высокая положительная корреляция по накоплению кадмия и цинка между видами. Коэффициенты корреляции по накоплению цинка и кадмия между видами, произраставшими на одной площадке, представлены в таблице 3. Выявлено, что между доминирующими видами взаимосвязь накопления обоих металлов была выражена сильнее, чем у всего сообщества растений в целом, что может объясняться отсутствием селективности транспорта обоих металлов в благоприятных условиях произрастания этих видов. По нашему мнению, в данных условиях значительные различия в коэффициентах корреляции (от 0,59 до 0,98) по разным площадкам могут объясняться степенью вариативности содержания цинка в точечных образцах почвы на каждой площадке, тогда как содержание кадмия в точечных образцах почвы было почти одинаковым, о чем свидетельствуют значения коэффициента вариации (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции (r) среднего содержания цинка и кадмия в растениях различных площадок в сопоставлении с коэффициентами вариации ($V, \%$) содержания цинка и кадмия в почве

№ площадки	Кол-во видов	r по всем видам	r по доминантам	$V, \%$	
				Zn	Cd
4	28	0,59	0,82	52,0	6,1
5	29	0,67	0,84	34,8	5,6
1	12	0,82	0,95	9,2	6,3
2	7	0,93	*	5,7	4,5
3	13	0,98	0,99	3,6	3,9

Примечание: * - на площадке один доминирующий вид.

Таким образом, мы выяснили, что в исследованных фитоценозах наблюдалась положительная корреляция между накоплением кадмия и цинка в растениях, как по распределению в организме растения, так и между видами, произраставшими на одной площадке. Это предполагает пассивный (без

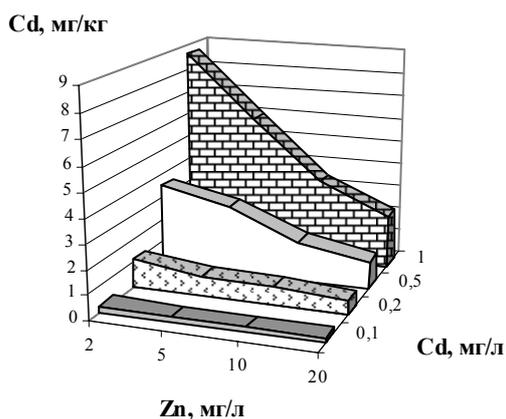
затраты метаболической энергии) транспорт обоих элементов, который, вероятно, является приоритетным при толерантных содержаниях кадмия и цинка в почве.

3.2. Закономерности накопления и транслокации кадмия и цинка в растениях на уровне организма

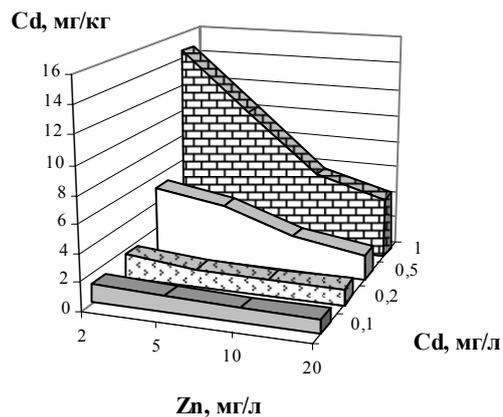
Намеченные целью работы исследования по накоплению и транслокации кадмия и цинка на уровне организма проведены на примере растений, выращенных в контролируемых условиях среды (в лабораторных опытах и в условиях защищенного грунта).

В лабораторных опытах изучалось влияние изменения содержания цинка и кадмия в субстрате на накопление этих металлов растениями озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорт Мироновская 808, на двух уровнях минерального питания и двух уровнях кислотности питательного раствора. На рисунках 2 и 3 приведены средние значения зависимостей содержания кадмия и цинка в растениях от содержания (16 вариантов) этих элементов в питательном растворе. Содержание цинка в питательном растворе: 2,0; 5,0; 10,0; 20,0 мг/л. Содержание кадмия: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 мг/л. Как и следовало ожидать, содержание обоих металлов в растениях линейно повышалось с увеличением их концентраций в субстрате (рис.2 и 3).

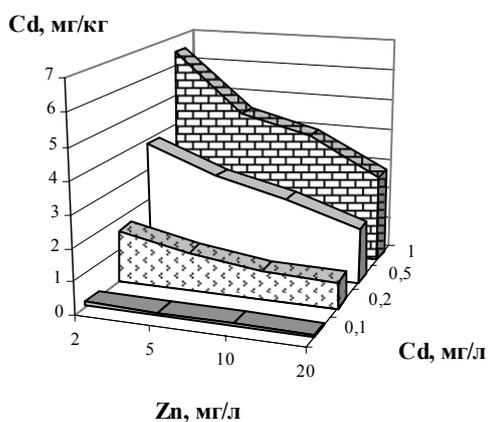
Рассмотрение данных о взаимовлиянии кадмия и цинка выявило следующую картину: повышение содержания цинка в питательном растворе понизило общее содержание кадмия в растениях (рис. 2). Причем, на возрастающих уровнях содержания кадмия в питательном растворе цинк всё более активно тормозил поглощение кадмия. Коэффициент корреляции (r) по накоплению растениями цинка и кадмия изменялся от -0,71 до -0,97. Значения r повышались при повышении содержания цинка в питательном растворе. Вероятно, возрастание содержания цинка в ризосфере могло привести к усилению конкуренции между ним и кадмием за сайты поглощения на эпидеме корня. Возрастание содержания кадмия в субстрате слабо влияло на поглощение цинка, за исключением наиболее высокого в данных опытах содержания цинка в питательном растворе (рис. 3). Тем не менее, возрастание содержания кадмия в субстрате привело к положительной корреляции накопления цинка и кадмия (r изменялся от 0,72 до 0,99). Корреляция накопления цинка и кадмия повышалась при повышении содержания кадмия в питательном растворе. Следует отметить, что во всех опытах наблюдались одинаковые закономерности накопления цинка и кадмия в растениях (рис. 2 и 3), несмотря на изменения содержания макроэлементов и кислотности питательного раствора. Изменение этих параметров влияло на количество поглощенных металлов: оно несколько снижалось при повышении содержания макроэлементов и существенно (до 2 раз для кадмия и до 3 раз для цинка) повышалось при увеличении кислотности питательного раствора.



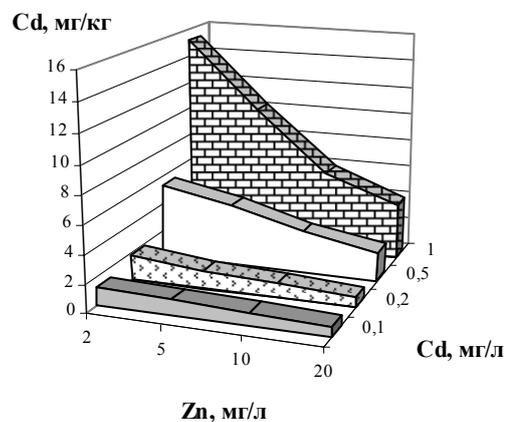
a (0,5 К; pH 5,5)



b (0,5 К; pH 4,5)



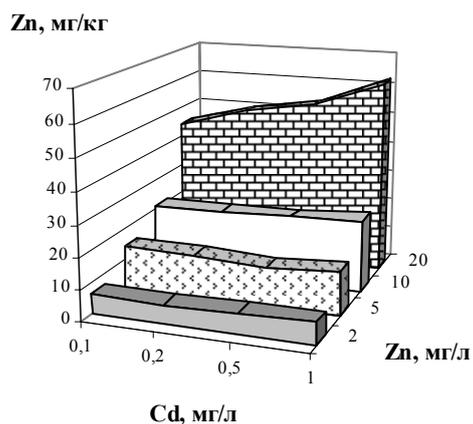
c (1,0 К; pH 5,5)



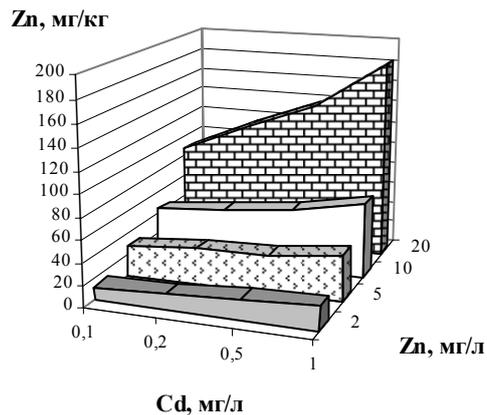
d (1,0 К; pH 4,5)

Рис. 2. Зависимости содержания кадмия (мг/кг сухой массы) в целом растении от содержания цинка и кадмия (мг/л) в питательном растворе: а) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 5,5; б) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 4,5; в) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 5,5; д) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 4,5; на осях абсцисс – содержание цинка и кадмия в питательном растворе, на осях ординат – содержание кадмия в растениях.

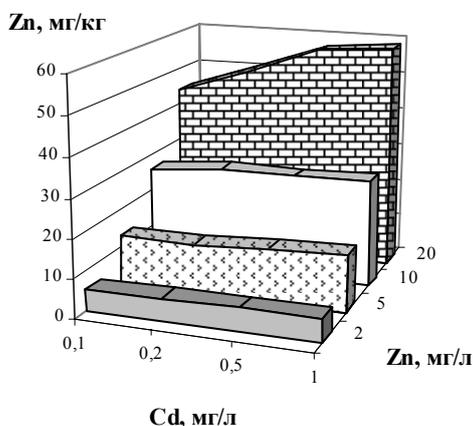
Как известно, в слабокислой среде кадмий подвижнее, чем цинк (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Поэтому, он должен был бы сильнее, чем цинк, поглощаться растениями. Однако в наших опытах при подкислении субстрата цинк накапливался больше, чем кадмий. Эти результаты также свидетельствуют, что при ухудшении условий среды растения предпочитают поглощать цинк, вероятно, за счет механизмов активного транспорта.



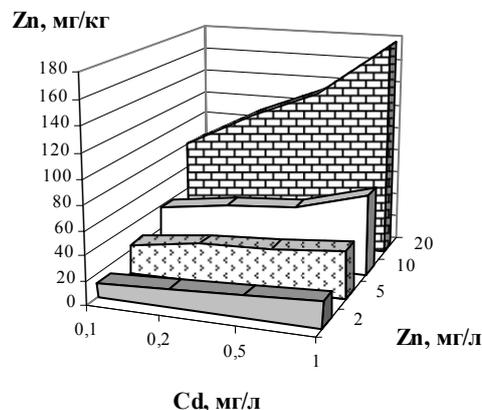
а (0,5 К; рН 5,5)



б (0,5 К; рН 4,5)



с (1,0 К; рН 5,5)



д (1,0 К; рН 4,5)

Рис. 3. Зависимость содержания цинка (мг/кг сухой массы) в целом растении от содержания цинка и кадмия (мг/л) в питательном растворе: а) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, рН 5,5; б) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, рН 4,5; с) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, рН 5,5; д) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, рН 4,5; на осях абсцисс – содержание кадмия и цинка в питательном растворе, на осях ординат – содержание цинка в растениях.

В гидропонной культуре томата съедобного (*Lycopersicon esculentum* Mill.) сорт Красная стрела, также наблюдалась отрицательная корреляция содержания цинка и кадмия в плодах при повышении содержания кислоторастворимых форм цинка в субстрате (r изменялся от $-0,38$ на цеолите до $-0,93$ на торфоопиле). Вероятно, величина коэффициента корреляции зависела от меры связанности цинка субстратом – значительно бóльшей на цеолите, чем на торфоопиле. Различия между вариантами опыта после завершения

эксперимента по содержанию цинка в цеолите составили 1,13 раза, а в торфоопиле – 2,67 раза. Такие же различия по содержанию кадмия составили 1,49 и 2,51 раза, соответственно. Наиболее вероятно, что бóльшая подвижность обоих металлов в торфоопиле, чем в цеолите, связана с различием в уровне реакции субстрата: $pH_{\text{вод}}$ цеолита был равен 7,43, а торфоопилы – 6,14. Содержание цинка и кадмия, соответственно, в плодах было значительно ниже ПДК (указаны в скобках): $2,17 \pm 0,33$ (10,0) и $0,003 \pm 0,0002$ (0,03) мг/кг сырой массы (СанПиН 2.3.2.1078-01, 2001).

Повышение уровня минерального питания было благоприятным для развития растений пшеницы в наших опытах: сухая масса увеличилась примерно в 1,5 раза. Напротив, на пяти дикорастущих видах повышение уровня минерального питания сказалось негативно (рис. 4).

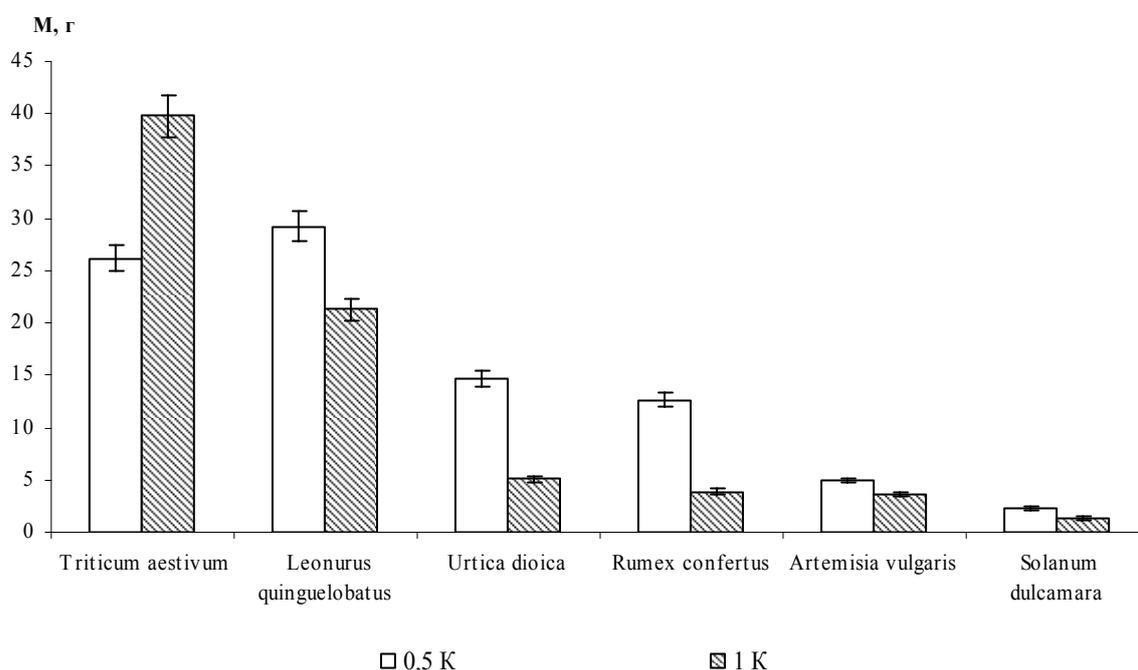


Рис. 4. Зависимость величины сухой массы шести видов растений (М, г) от уровня минерального питания (0,5 К и 1,0 К); содержание в питательном растворе Zn – 20 мг/л, Cd – 1 мг/л

Как известно, рост и развитие многих видов дикорастущих растений ингибируются в условиях повышенного минерального питания, которые благоприятны для культурных растений (Трапезников и др., 1999).

Рассмотрим, как повышение уровня минерального питания повлияло на поглощение растениями различных видов цинка и кадмия (рис. 5 и 6). Как видно из рисунков 5 и 6, при повышении уровня питания содержание в мягкой пшенице (*T. aestivum* L.) и цинка, и кадмия немного понизилось, в то время как в дикорастущих видах их содержание заметно повысилось. Повышение поглощения цинка было более значительное, чем повышение поглощения кадмия, особенно у наиболее угнетенного в условиях опыта паслена сладко-горького (*Solanum dulcamara*). Следовательно, и в этом случае при ухудшении условий среды растения предпочтительнее, чем кадмий, поглощали цинк.

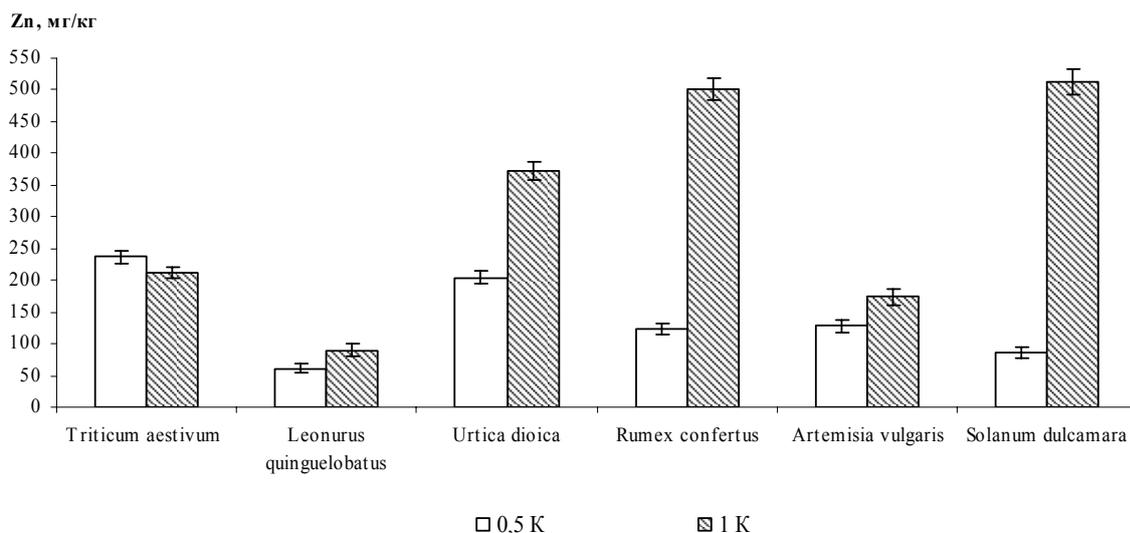


Рис. 5. Зависимость содержания цинка в растениях от уровня минерального питания (0,5 К и 1,0 К – питательный раствор Кнопа половинной и полной концентрации); содержание в питательном растворе Zn – 20 мг/л, Cd – 1 мг/л

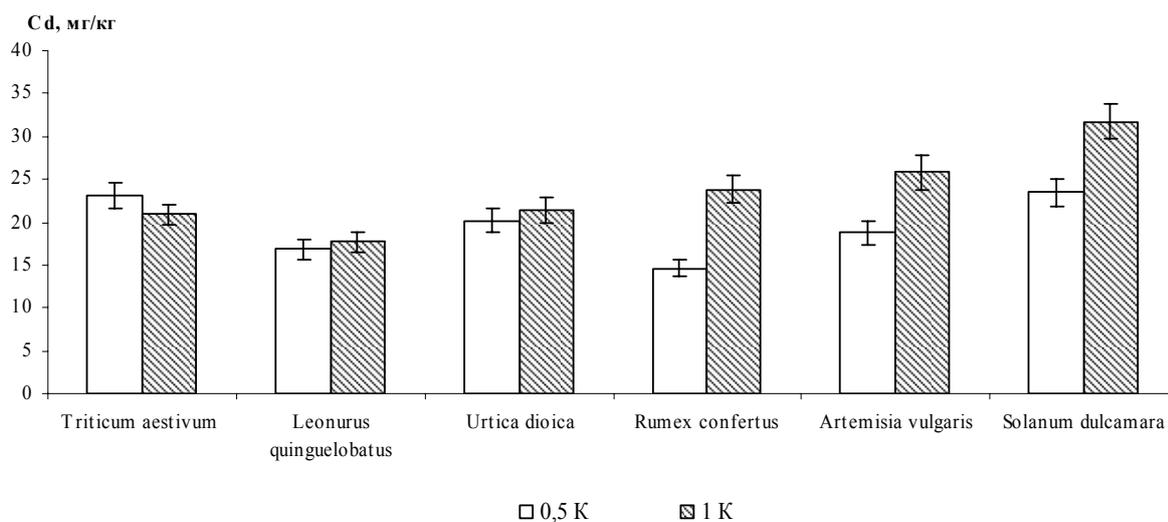


Рис. 6. Зависимость содержания кадмия в растениях от уровня минерального питания (0,5 К и 1,0 К – питательный раствор Кнопа половинной и полной концентрации); содержание в питательном растворе Zn – 20 мг/л, Cd – 1 мг/л

3.3. Влияние цинка и кадмия на барьерную функцию корня

Известно, что в растительной клетке излишки кадмия негативно влияют на механизмы активного транспорта (Fodor et al., 1995; Ouariti et al., 1997; Aravind, Prasad, 2005), но если эти изменения обратимы, цинк восстанавливает нарушенные функции (Aravind, Prasad, 2005). Поэтому мы предположили, что

эти элементы могут влиять на акропетальный транспорт друг друга, который можно отразить и с помощью подсчета коэффициентов барьерной функции корня ($K_{кб}$).

В вышеописанных опытах с растениями пшеницы мы обнаружили, что изменение концентраций одного элемента влияет на величины $K_{кб}$ другого. Содержание обоих металлов в корне было выше, чем в надземных органах. С повышением содержания в субстрате цинка повышались величины коэффициента корневого барьера для кадмия, а повышение содержания кадмия в субстрате ослабляло барьерную функцию корня для цинка (рис. 7 и 8).

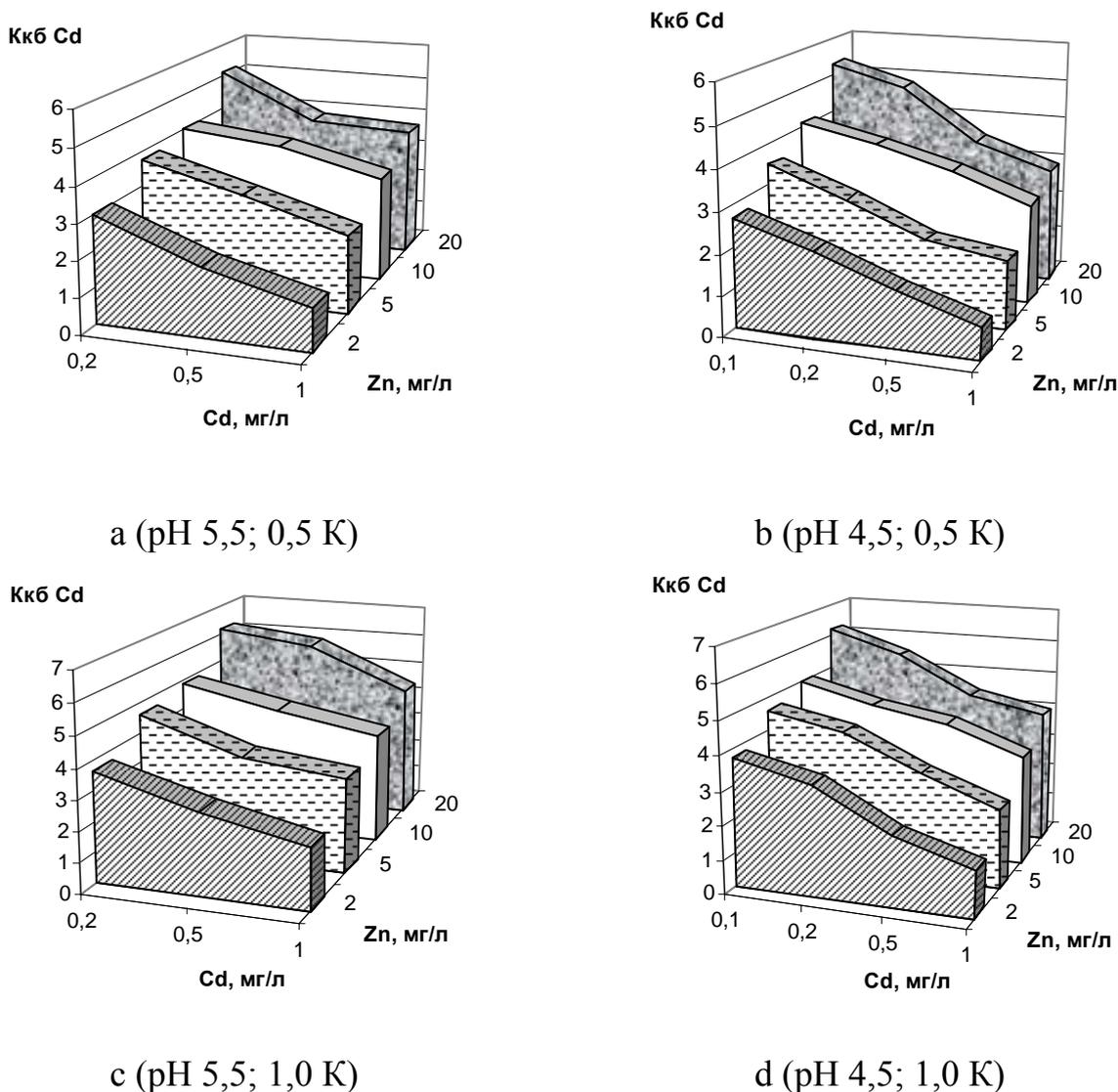


Рис. 7. Зависимости величин коэффициента барьерной функции корня ($K_{кб}$) для кадмия от содержания цинка и кадмия (мг/л) в питательном растворе: а) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 5,5; б) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 4,5; в) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 5,5; д) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 4,5. По осям абсцисс отложены концентрации кадмия и цинка в питательном растворе, по осям ординат величины $K_{кб}$ для кадмия.

Необходимо отметить, что в опытах, где pH питательного раствора был равен 5,5, на обоих уровнях минерального питания в вариантах с содержанием кадмия 0,1 мг/л в питательном растворе, в надземной части растений кадмий не был обнаружен (рис. 7а и 7с), поэтому $K_{кб}$ там не подсчитывались. По-видимому, поглощение кадмия на этом уровне его содержания в питательном растворе могло тормозиться известными механизмами барьерной функции корня, как-то: реактивными центрами апопласта корней, клеточной стенкой и его компартментацией в вакуолях клеток (Pence et al., 2000), что остановило акропетальное передвижение элемента.

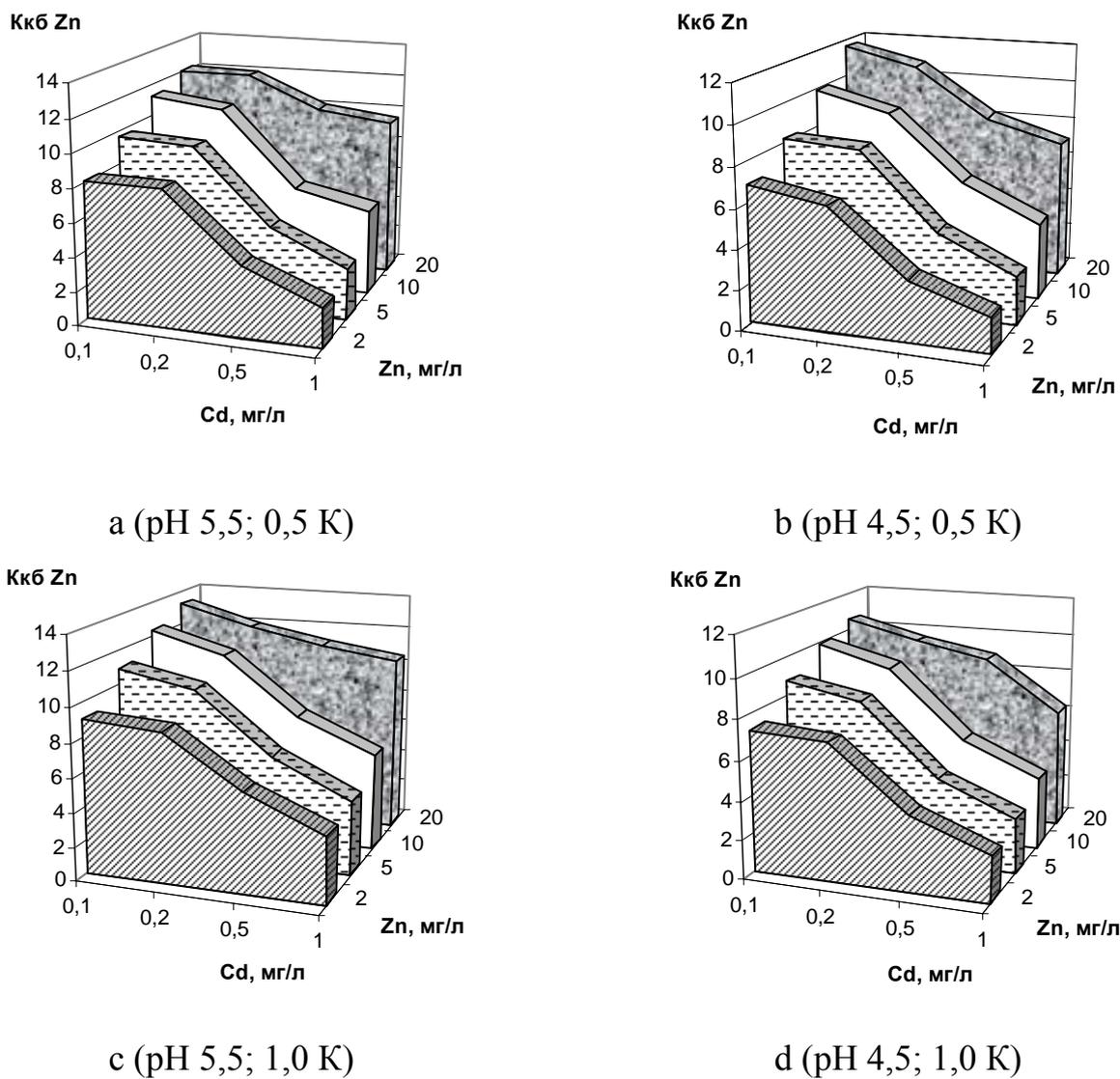


Рис. 8. Зависимости величин коэффициента барьерной функции корня ($K_{кб}$) для цинка от содержания цинка и кадмия (мг/л) в питательном растворе: а) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 5,5; б) уровень минерального питания 0,5 Кнопа, pH 4,5; в) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 5,5; д) уровень минерального питания 1,0 Кнопа, pH 4,5. По осям абсцисс отложены концентрации кадмия и цинка в питательном растворе, по осям ординат величины $K_{кб}$ для цинка.

Барьерная функция корня как защитное свойство организма растения от накопления тяжелых металлов в надземной части в наших исследованиях проявилась только в лабораторных опытах при высоких содержаниях кадмия и цинка в питательном растворе (от 10 до 100 раз превышающих фоновые концентрации). В исследованных нами естественных фитоценозах распределение обоих металлов по органам растений имело случайный характер (по-видимому, зависело от конкретного распределения в момент выемки растений и деления на органы). Это подтверждается сравнением величин коэффициентов корневого барьера у видов, встречавшихся в нескольких фитоценозах: значения различались в несколько раз, т.е. в одном случае наибольшее накопление могло быть в листьях или стеблях, в другом – в корне, или накопление было равномерным по всему растению. Известно, что преимущественное накопление в корне излишних количеств тяжелых металлов обеспечивается, в основном, механизмами активного транспорта (Salt, Wagner, 1993; Salt, Rauser, 1995; Ramos et al., 2002; Clemens et al., 2002) и, следовательно, является энергозатратным процессом. Можно предположить, что при толерантных концентрациях тяжелых металлов растение «не тратит» метаболическую энергию на обеспечение корневого барьера.

3.4. Влияние цинка и кадмия на содержание углеводов в растениях озимой пшеницы

Установлено, что избыточное содержание ряда металлов в окружающей среде оказывает негативное влияние на анатомические и физиологические параметры ассимиляционных органов (Кулагин, 2003а; 2003б; Кулагин, Кужлева, 2005; Кулагин, 2007). Как известно, кадмий и цинк значительно влияют на фотосинтетическую активность (Aravind, Prasad, 2005) и движутся по флоэме вместе с потоком фотоассимилятов (Saharan et al., 2000; Dunbar et al., 2003; Greger, Lufstedt 2004). Одними из важнейших показателей эффективности фотосинтеза являются содержание фотоассимилятов в органах донорах и органах акцепторах и соотношение их транспортной (растворимые сахара) и запасной (крахмал) форм. Мы обнаружили, что цинк и кадмий влияют на транспортную функцию друг друга и предположили, что они могут совместно влиять на транспорт фотоассимилятов.

На рисунке 9 показаны данные по содержанию суммы растворимых сахаров и крахмала в надземных частях и в корнях растений озимой мягкой пшеницы (*T. aestivum*) в зависимости от содержания цинка и кадмия в субстрате. Как видно из рисунка 9, содержание и растворимых сахаров, и крахмала в надземной части растений повышалось с повышением содержания кадмия в субстрате и, следовательно, в растениях, а повышение содержания цинка в субстрате и в растениях снижало содержание этих углеводов. В корнях растений зависимости были обратные. Следовательно, повышение содержания кадмия задерживало отток фотоассимилятов из надземной части в корень, а повышение содержания цинка усиливало этот процесс.

Соотношение содержания цинка и кадмия влияло и на соотношение содержания растворимых сахаров к содержанию крахмала: повышенное соотношение этих металлов соответствовало повышенному соотношению транспортных форм углеводов к запасным и, наоборот, пониженное соотношение металлов соответствовало пониженному соотношению обеих форм углеводов (рис. 10 и 11). Обнаруженные зависимости повторялись при обоих уровнях рН и при обоих уровнях минерального питания в субстрате.

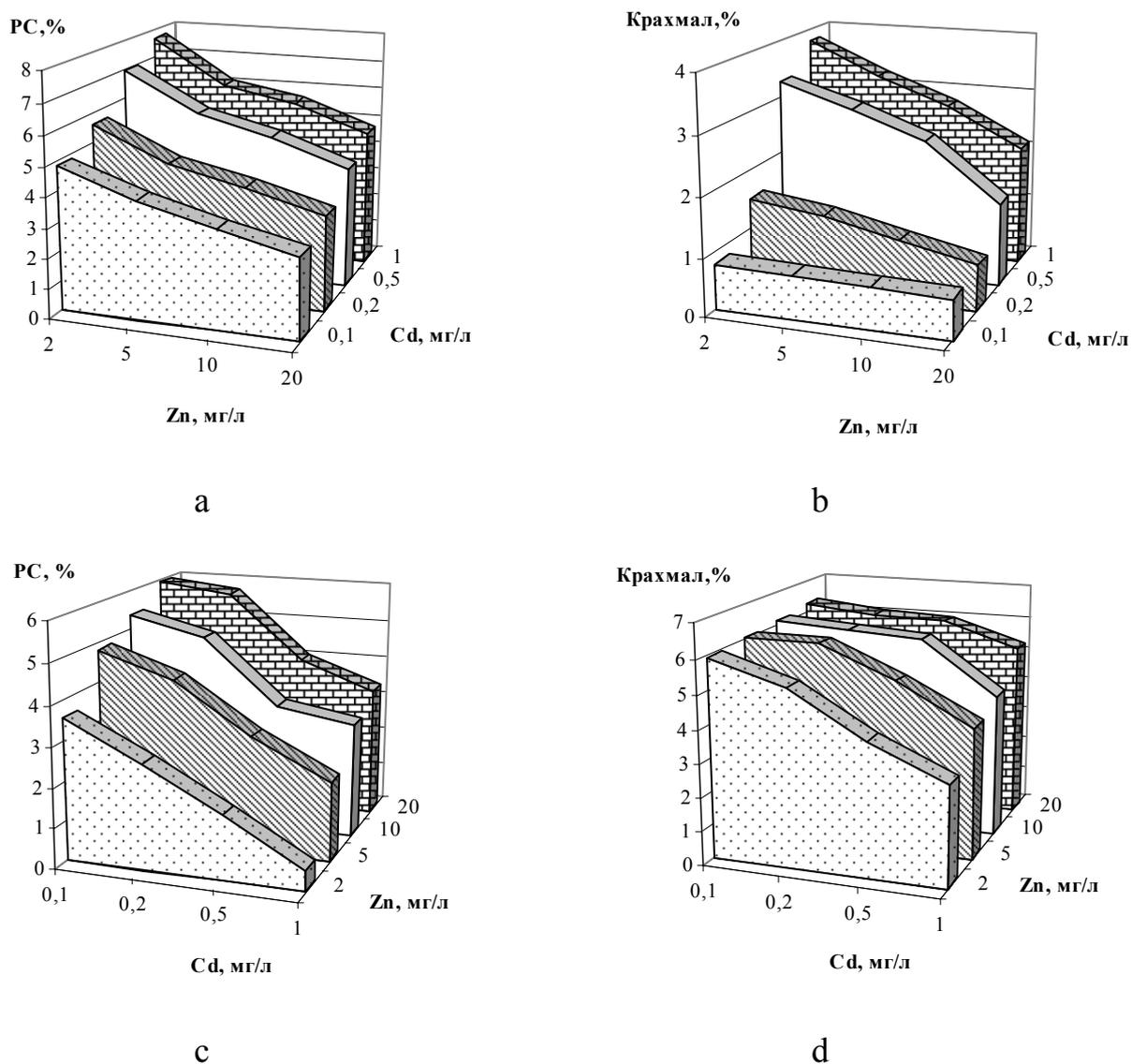


Рис. 9. Зависимости содержания (% на сухую массу) в растениях озимой пшеницы суммы растворимых сахаров (РС) и крахмала от содержания цинка и кадмия в питательном растворе с уровнем питания 0,5 Кнопа при рН 5,5: а) содержание растворимых сахаров в надземной части растений; б) содержание крахмала в надземной части растений; в) содержание растворимых сахаров в корнях растений; д) содержание крахмала в корнях растений; по осям абсцисс – концентрация Zn и Cd в питательном растворе, по осям ординат – концентрация углеводов в растениях.

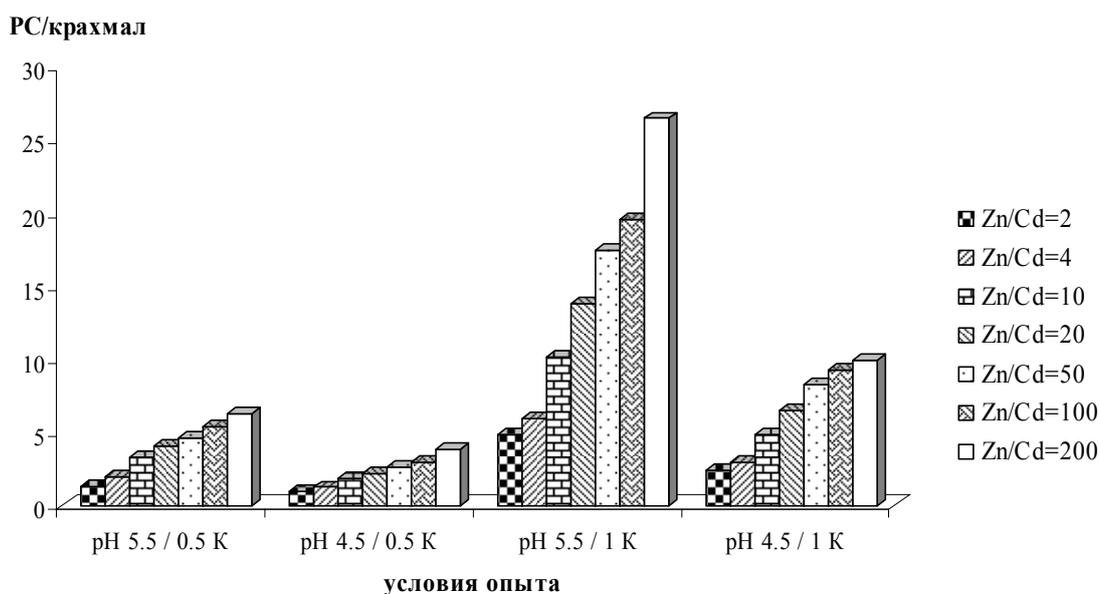


Рис. 10. Зависимость величины отношения содержания растворимых сахаров (РС) к крахмалу в надземной части растений озимой пшеницы от величины отношения содержания цинка и кадмия в питательном растворе и состава питательной среды

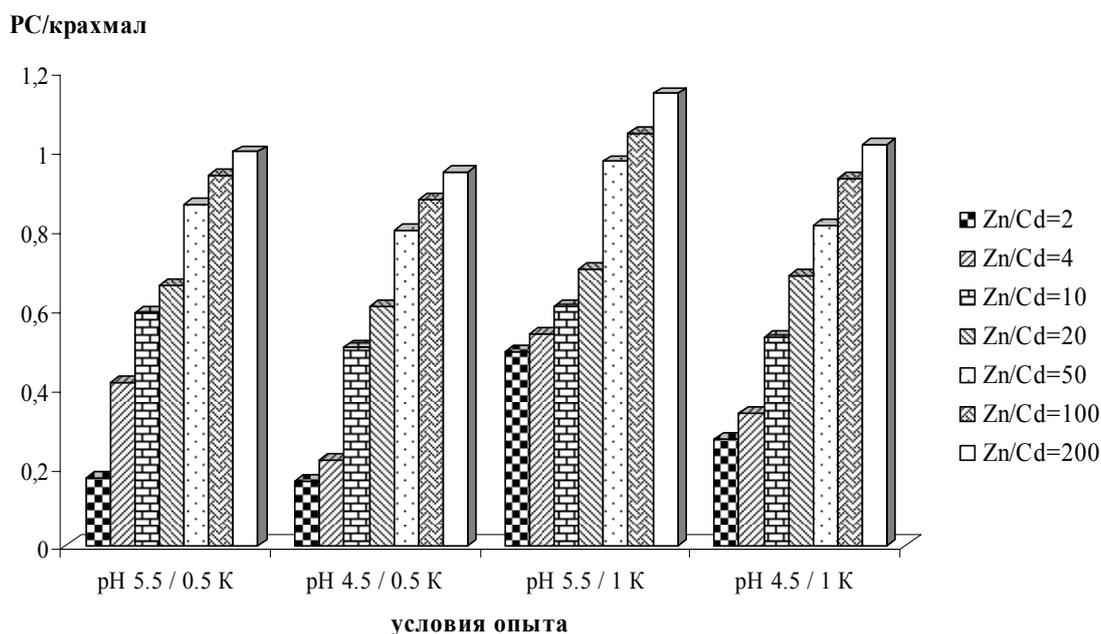


Рис. 11. Зависимость величины отношения содержания растворимых сахаров (РС) к крахмалу в корнях растений озимой пшеницы от величины отношения содержания цинка и кадмия в питательном растворе и состава питательной среды

Указанные параметры влияли на количество растворимых сахаров (РС) и крахмала. Понижение уровня кислотности питательного раствора от рН 4,5 до 5,5 привело: к увеличению содержания РС в надземной части (от 16 до 21% в различных вариантах опытов) и корнях (от 4 до 19%), к уменьшению содержания крахмала в надземной части (от 1,56 до 1,79 раза). При этом содержание крахмала в корне почти не изменилось. Повышение уровня минерального питания от 0,5 К до 1 К привело: к увеличению содержания РС в надземной части (от 10 до 14%) и корнях (от 14 до 30%), к уменьшению содержания крахмала в надземной части (от 2,42 до 2,78 раза), к увеличению содержания крахмала в корне (от 11 до 14%). Такие зависимости свидетельствуют о положительном влиянии понижения кислотности питательного раствора и повышения уровня минерального питания на транспорт фотоассимилятов для данного сорта.

Можно предположить, что обнаруженное нами повышенное накопление растениями цинка при ухудшении условий среды требуется и для восстановления нормального транспорта фотоассимилятов, особенно при высоком содержании кадмия в почве.

Итак, изучение транслокации кадмия и цинка на фитоценоотическом и организменном уровнях свидетельствует о сходном характере выявленных закономерностей на обоих уровнях организации жизни растения. Обнаруженные зависимости сопоставимы с известными закономерностями транспорта обоих металлов на клеточном уровне и их влияния на транспортные функции растения: в растительной клетке кадмий (как индуктор окислительного стресса) негативно влияет на механизмы активного транспорта, а цинк (как антиоксидант) восстанавливает нарушенные функции.

ВЫВОДЫ

1. Содержание кадмия в растении преимущественно определяется содержанием его подвижных форм в почве; на накопление цинка влияет наряду с содержанием его подвижных форм в почве само растение, причем, чем ниже содержание цинка в почве, тем сильнее выражено активное влияние растения.
2. В условиях выравненности распределения в почве и цинка, и кадмия – содержание этих элементов в растениях исследованных фитоценозов коррелировало положительно. Наиболее тесную сопряженность проявляли доминантные виды.
3. Цинк и кадмий влияют на транслокацию друг друга в растение в целом и его отдельные органы. Взаимовлияние имеет сложный характер:
 - а) при варьировании содержания элементов в субстрате увеличение содержания цинка подавляет накопление кадмия, увеличение содержания кадмия мало влияет на накопление цинка.

б) увеличение содержания цинка в субстрате усиливает барьерную функцию корня для кадмия, в то время как увеличение содержания в субстрате кадмия ослабляет барьерную функцию корня для цинка.

4. Повышение содержания кадмия в субстрате приводит к нарушению нормального транспорта фотоассимилятов. Повышение в этих условиях содержания цинка в субстрате приводит к восстановлению транспорта фотоассимилятов.
5. В неблагоприятных условиях среды (затененность, низкое содержание подвижных форм цинка в почве, повышенная кислотность питательного раствора, избыточный уровень минерального питания) растения накапливают больше цинка, чем кадмия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Плеханова В.А. Взаимодействие кадмия и цинка в процессе их транслокации в растения пшеницы / Плеханова В.А. // Биоразнообразие и биоресурсы Среднего Поволжья и сопредельных территорий: Матер. конф., посвященной 125-летию Казанского государственного педагогического университета. – Казань, 2002. – С. 68-70.
2. Плеханова В.А. Поступление тяжелых металлов в томаты в гидропонной культуре / Зялалов А.А., Плеханова В.А., Ганиев И.Г. // Агрехимия. – 2002, № 8. – С. 82-85.
3. Плеханова В.А. Взаимодействующее влияние меди, цинка и кадмия на фотосинтетические параметры пшеницы / Плеханова В.А., Зялалов А.А. // Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Матер. V респ. науч. конф. – Казань: Отечество, 2003. – С. 215- 216.
4. Плеханова В.А. Экотипические особенности транслокации цинка и кадмия в растениях / Плеханова В.А., Зялалов А.А. // Экологические, морфофизиологические особенности и современные методы исследования живых систем: Сб. науч. тр. – Казань, 2003. – С. 49-50.
5. Плеханова В.А. Экскурс в теоретические основы управления конкурентным поступлением кадмия и цинка в растения / Плеханова В.А., Зялалов А.А. // Институт экологии природных систем АН РТ: Сб. науч. тр. – Казань: Отечество, 2004. – С. 89-101.
6. Плеханова В.А. Характер взаимодействующего поглощения цинка и кадмия растениями / Плеханова В.А. // Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Тез. докл. VI респ. науч. конф. – Казань, 2004. – С. 187-188.
7. Плеханова В.А. Тяжелые металлы в продуктах растениеводства как комплексная проблема / Зялалов А.А., Плеханова В.А. // Современные аспекты экологии и экологического образования: Матер. Всеросс. конф. – Казань, 2005. – С. 431-432.

8. Плеханова В.А. Влияние уровня минерального питания и реакции среды ризосферы на взаимодействующее поступление кадмия и цинка в растения / Плеханова В.А. // Современные аспекты экологии и экологического образования: Матер. Всеросс. конф. – Казань, 2005. – С. 470-471.
9. Плеханова В.А. Взаимозависимая транслокация кадмия и цинка в растения озимой пшеницы в гидропонной культуре / Плеханова В.А. // Агрехимия. – 2006, № 4. – С. 72-77.