

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА»

В.А. Вихрева, А.А. Блинохватов, Т.В. Клейменова

# **СЕЛЕН В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ**

Монография

Пенза 2012

УДК 546.23+581  
БПК 24.126+28.5  
В 55

Печатается по решению научно-технического совета ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА» от 15 мая 2012 г., протокол № 6.

Рецензенты: доктор биол. наук, профессор кафедры биотехнологии и техносферной безопасности ФГБОУ ВПО «Пензенская ГСХА» С.Ю. Ефремова; доктор биол. наук, профессор зав. кафедрой биологии и экологии Пензенской ГСХА А.И. Иванов.

Вихрева, Валерия Александровна  
В 55 Селен в жизни растений: монография / В.А. Вихрева, А.А. Блинохватов, Т.В. Клейменова. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – 222 с.

В монографии представлены результаты многолетней работы по изучению влияния селенсодержащих соединений на рост и развитие зерновых и зернобобовых растений. Большое внимание авторы уделяют антистрессовому действию селена и описывают его механизм.

© ФГБОУ ВПО  
Пензенская ГСХА, 2012  
© В.А. Вихрева, А.А. Блинохватов,  
Т.В. Клейменова, 2012  
ISBN 978-5-94338-557-5

ВВЕДЕНИЕ.....	5
БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СЕЛЕНА.....	7
Глава 1 АККУМУЛЯЦИЯ СЕЛЕНА В ПОЧВАХ.....	12
Глава 2 СЕЛЕН В РАСТЕНИЯХ.....	22
Глава 3 ВЛИЯНИЕ СЕЛЕНА НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА РАННИХ ЭТАПАХ ОРГАНОГЕНЕЗА.....	33
Влияние концентраций селената натрия на ростовые процессы козлятника на ранних этапах органогенеза.....	37
Действие обработки семян соединениями селена на ростовые процессы яровой пшеницы.....	45
Действие селената натрия на ростовые процессы ярового ячменя.....	48
Влияние селена и бактериальных препаратов на ростовые процессы на начальных этапах органогенеза сои.....	51
Глава 4 ДЕЙСТВИЕ СОЕДИНЕНИЙ СЕЛЕНА НА АДАПТАЦИЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР К СТРЕССОВЫМ УСЛОВИЯМ .....	55
Действие селеновых солей на адаптацию козлятника к стрессам.....	56
Особенности роста и развития пшеницы в зависимости от кислотности среды и обработки семян соединениями селена.....	69
Особенности роста и развития ячменя в зависимости от обработки семян селеном и фунгицидами.....	76
Действие селената натрия и бактериальных препаратов на азотфиксирующие микроорганизмы.....	84
Глава 5 ВЛИЯНИЕ СЕЛЕНА НА БИОХИМИЧЕСКИЙ СТАТУС РАСТЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ.....	89
Влияние селена на биохимический статус козлятника восточного.....	93
Влияние селена на общую протеиназную активность.....	99
Влияние селена на накопление в растениях козлятника свободного пролина.....	102
Влияние селена и уровня рН на активность антиоксидантных ферментов каталазы и пероксидазы в растениях яровой пшеницы.....	105
Влияние селена на антиоксидантные ферменты при фунгицидной обработке семян.....	109

Действие селена на активность ферментов и низкомолекулярных антиоксидантов в условиях гербицидного воздействия на растения ячменя.....	113
<b>Глава 6 ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА АГРОЦЕНОЗОВ В ОПТИМАЛЬНЫХ И СТРЕССОВЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>	<b>118</b>
Влияние селена на ростовые процессы и фотосинтетическую активность козлятника восточного и лекарственного.....	118
Влияние селената натрия на рост козлятника восточного сорта Гале в условиях длительной гипотермии.....	126
Фотосинтетическая деятельность агроценоза яровой пшеницы в оптимальных и экстремальных условиях и ее изменение под влиянием селена.....	132
Фотосинтетическая деятельность посевов ячменя в зависимости от применения гербицидов и антистрессовых препаратов.....	140
Изменение фотосинтетических параметров агроценоза сои под влиянием селената натрия и биологических препаратов.....	148
<b>Глава 7 ВЛИЯНИЕ СЕЛЕНА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ КУЛЬТУР И КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ.....</b>	<b>152</b>
Роль селена в формировании продуктивности козлятника.....	152
Формирование урожайности и качества зерна яровой пшеницы в зависимости от использования селена и условий выращивания.....	156
Формирование урожайности зерна сортов ярового ячменя под влиянием селената натрия и Гуми-90.....	175
Действие селената натрия и ризоторфина на урожайность различных сортов сои.....	179
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>186</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>189</b>

*Светлой памяти  
доктора химических наук, профессора  
Александра Федоровича Блинохватова,  
отдавшего много лет жизни  
изучению селена, посвящается*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В ряду экологических факторов, оказывающих влияние на состояние и здоровье человека, микроэлементы, среди которых селен, занимают особое место. За последние 20–30 лет появилось много данных в России и за рубежом (Ермаков, Ковальский, 1974; Ермаков, 2004; Егоров, Ивахнин, 2009; Перепелкина, 2009; Шацких, 2009; Mansurova et al, 2009; Salman, Yildiz, 2009), свидетельствующих о необходимости селена для нормальной жизнедеятельности организма человека и животных. Показано, что прогрессирующий дефицит данного элемента в растительных кормах и пище человека во многих странах мира и отдельных регионах Российской Федерации является одной из причин нескольких десятков тяжелых заболеваний, включая сердечно-сосудистые: инфаркт миокарда, инсульт; онкологические, тяжелые поражения печени и расстройства половой системы, иммунодефицит, болезнь Кашина-Бека и т.д. (Сучков с соавт., 1978; Авцын с соавт., 1991; Решетник, Парфенова, 2000; Тутельян с соав., 2002; Beck et al, 1995; Neve, 1996; Koehrlle et al, 1997).

Кроме того, исследователи отмечают, что микроэлемент селен поддерживает нормальное состояние не только антиоксидантной, но и детоксицирующей и иммунной систем организма (Никитина, Иванов, 1995; Блинохватов с соавт., 2000; Решетник, Парфенова, 2001; Combs, Combs, 1984, 1985; Hill, Burk, 2008). К настоящему времени известно, что он входит в структуру активного центра глутатионпероксидазы – одного из ключевых антиоксидантных ферментов. Глутатионпероксидаза предотвращает накопление в тканях человека и животных свободных радикалов, инициирующих перекисное окисление липидов, белков, нуклеиновых кислот и других соединений (Племенков, 2007; Foster, Sumar, 1997; Arthur, 2000; Flohe et al, 2000; Salman, Yildiz, 2009).

Вместе с тем, данных об особенностях влияния селена на растения не так уж много. В основном они касаются адсорбирования микроэлемента различными растениями (Ермаков, Ковальский, 1974;

Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Торшин с соавт., 1996; Дудецкий, 1998; Голубкина, 1999; Кузнецов, 2004). Сведения об общих и частных функциях селена в растительном организме малочисленны и неоднозначны (Ягодин с соавт., 1992; Серегина, 2008; Terry et al, 2000; Cartes et al, 2005). Сведений по пространственному распределению его в природных компонентах территорий, в первую очередь, по содержанию в почвах крайне мало. Противоречивы данные и о действии селеносодержащих солей на формирование урожайности сельскохозяйственных культур, на устойчивость растений в условиях нагрузок, вызванных биотическими и абиотическими факторами: засухой, кислотностью и засолением почв, средствами химизации и защиты растений.

Это и определило направление нашей работы, которая проводилась в течение двенадцати лет путем маршрутных обследований почв и растений на содержание селена, а также лабораторных, вегетационных и полевых опытов по использованию селеновых солей под ранние зерновые, зернобобовые культуры – сою и кормовую бобовую культуру – козлятник.

Выяснялось: содержание селена в различных подтипах черноземов в зависимости от их использования, количества гумуса в них и реакции среды; накопление микроэлемента в основные фазы роста и развития растениями семейств: бобовых, астровых, гречишных, мятливых, произрастающих в естественных условиях и агроценозах.

Изучалось воздействие низких концентраций селена на адаптационный и продуктационный потенциал, стресс-резистентность сельскохозяйственных культур.

Исследования проводились на черноземных почвах Пензенской области, территория которой расположена в правобережной лесостепи Среднего Поволжья и отражает все почвенно-климатические особенности этой зоны.

Результаты наших исследований, а также анализ данных, полученных отечественными и зарубежными учеными, легли в основу данной монографии.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СЕЛЕНА

В настоящее время нет каких-либо сомнений в том, что селен – жизненно важный микроэлемент с уникальными биологическими функциями и широким спектром биологического действия его соединений на живые организмы (Ермаков, Ковальский, 1974; Авцын с соавт., 1991; Голубкина, 1999; Блинохватов с соавт., 2000; Schwarz, Folz, 1957; Diplak, 1970; Wendel, 1989). Селен является физиологически важным микроэлементом, незаменимым для питания человека и животных (Голубкина с соавт., 1992; 1994; 1995; 1996; 1997; 1998; Ciapellano et al, 1990; Van der Torre et al, 1991; Meltzer et al, 1992;).

Эссенциальность селена обусловлена его вхождением в состав активных центров ряда ферментов, из которых наиболее изученными являются несколько глутатионпероксидаз (Behne et al, 1988): две йодтирониндейодиназы (Berry et al, 1991; Ursini, 1996), тиоредуктаза (Behne et al, 1988). В настоящее время сформировалось представление о том, что важной биохимической функцией селена является участие в построении глутатионпероксидазы – одного из ключевых антиоксидантных ферментов, который предотвращает накопление в тканях свободных радикалов, инициирующих перекисное окисление липидов, белков, нуклеиновых кислот и других соединений (Foster, Sumer, 1997; Решетник, Парфенова, 2001).

Во всех известных Se-содержащих ферментах селен присутствует в форме селеноцистеина (Риш, 2003; Барабанов, 2004; Waschulewski, Sunde, 1988 (a); Waschulewski, Sunde, 1988 (б); Whanger, Butler, 1988; Sunde, 1990; Aaseth, 1993; Patching, Gardiner, 1999; Scharauser, 2003). Селенсодержащие глутатионпероксидазы имеют различия в первичной структуре, субстратной специфичности и локализации в организме.

Классическая клеточная тетрамерная cGPx в основном защищает клетки от окислительного стресса путем восстановления образующихся при окислении гидропероксидов любого характера. Она же влияет на метаболизм простагландинов в тромбоцитах и других тканях (Chambers et al, 1986; Janghorbani et al, 1990 (a); Janghorbani et al, 1990 (б); Janghorbani et al, 1991).

Желудочно-кишечная GPx, вероятно, обезвреживает пероксиды липидов, поступившие с пищей в желудочно-кишечный тракт (Beilstein, Whanger, 1986; Chu et al, 1993; Amberg et al, 1996; Brigelius-Flohe et al, 1994, 1997). По строению глутатионпероксидаза сходна с клеточной cGPx.

Третий тип глутатионпероксидазы локализуется в плазме крови (pGPx). Она имеет ограниченную специфичность по отношению к восстановленному глутатиону и активна по отношению к тиоредоксину. Это предполагает участие данного фермента в восстановлении циркулирующих пероксидов (Takahashi et al, 1987).

Четвертый тип глутатионпероксидазы фосфолипидгидропероксид – глутатионпероксидаза (PHGPx) отличается от предшествующих тем, что она не тетрамерна, а мономерна и содержит не четыре, а один атом селена (Ursini et al, 1985; Butler et al, 1989). Она участвует в ингибировании перекисного окисления липидов, расширении антиоксидантного эффекта витамина Е (за счет восстановления гидропероксидов, образовавшихся при переносе электрона с хроманольной части витамина на перекисные радикалы), а также модулирует активность липоксигеназ. PHGPx отличается от cGPx субстратной специфичностью. Если последняя восстанавливает почти любые гидропероксиды, то PHGPx проявляет активность только по отношению к липофильным субстратам. Тем не менее физиологическое значение этого фермента до конца не выяснено.

Активные центры всех глутатионпероксидаз включают селеноцистеин, глутамин и триптофан. Обеспечивая восстановление пероксидов и окисление тиолов до дисульфидов, глутатионпероксидазы в конечном итоге участвуют в защите клеточных стенок от перекисного окисления. В отличие от них, йодтирониндейодиназа катализирует дейодирование тироксина (Т4) в биологически более активный тиреоидный гормон трийодтиронин (Т3) и, таким образом, играет ключевую роль в метаболизме тиреоидных гормонов.

Выделены, но не вполне охарактеризованы по структуре и функциям, еще около 30 селенопротеинов (Bedwal et al, 1993; Daher, Vanlente, 1992, 1994). Общим для всех этих белков является то, что микроэлемент входит в их состав в виде селеноцистеина. Установлен и специфический кодон, ответственный за включение селеносодержащей аминокислоты в белки (Behne, Wolters, 1983; Chambers et al, 1986; Burk, 1989; Vamsal, Medina, 1991; Takahashi, 1995). Наличие генетического контроля за образованием селенопротеинов является свидетельством природной значимости микроэлемента селена для представителей животного мира.

Среди селенопротеинов с неизученными функциями можно выделить селенопротеин Р плазмы крови. Полагают, что он участвует в транспорте селена и защите уязвимых мест клеток от активных моле-

кул и свободных радикалов (Read et al, 1990; Deagen et al, 1987, 1993; Eberle, Haase, 1993).

Уже сегодня стало понятным, что хотя бы часть из этих тридцати белков может играть в организме (особенно в мозге, органах воспроизводства и эндокринных железах) важную роль. Так, в сперме был зафиксирован, а потом выделен селеносодержащий белок, физиологическая функция которого предположительно связана со стабилизацией наружной мембраны митохондрий спермы (Calvin et al, 1981). Из эпителия простаты и головки сперматозоидов выделены два селенопротеина, также предположительно имеющие защитную функцию (Behne et al, 1988).

Входя в состав перечисленных белков, селен участвует в поддержании структурной стабильности и функциональной активности как самой мембраны, так и комплекса мембраносвязанных ферментов, обеспечивающих нормальную интенсивность обменных процессов. Таким образом, регулируя перекисное окисление липидов и поддерживая тем самым концентрационный оптимум свободнорадикальных частиц, селен влияет не только на целостность клеточных мембран, но и участвует в регуляции белкового, углеводного и жирового обмена.

Помимо этого пути воздействия на жизнедеятельность организма, микроэлемент способен иными способами модулировать ход множества биохимических процессов, воздействуя косвенным образом на активность большого ассортимента ферментов (Ермаков, Ковальский, 1974; Владимиров, Арчков, 1982; Лапшин с соавт., 1989; Авцын с соавт., 1991; Кокорев с соавт., 1997).

Следует обратить внимание на биохимическую мимикрию селена в его влиянии на окислительно-восстановительные ферменты. В ряде случаев селен ингибирует энзимы, катализирующие дегидратирование и дегидрирование, а в других случаях он же активирует ферменты окислительно-восстановительного цикла.

Достоверно установлено, что введение в организм селена в форме селенита натрия приводит к увеличению синтеза глутатиона с одновременным увеличением активности АТФ-1-метионин-S-аденозилтрансферазы (Штутман, 1976). Не исключено, что ростостимулирующий эффект соединений селена опосредован именно через его влияние на синтез глутатиона, участвующего, помимо разложения перекиси водорода и гидроперекисей липидов, в регулировании синтеза белков, аденозинтрифосфата, в восстановлении метгемоглобина в гемоглобин, в активировании протеиназ.

По данным ряда авторов (Ермаков, Ковальский, 1974; Касумов, 1979; Кудрявцев, 1979), селен участвует в синтезе коэнзимов Q и A, включается в цитохром C.

Дефицит селена влияет на дестабилизацию клеточных мембран за счет их окислительной деструкции. При этом нарушается согласованная работа мембраносвязанных ферментов, что приводит к срыву процессов клеточного дыхания, синтеза макроэргических соединений, нарушению всех обменных процессов. Нарушается микроциркуляция и увеличивается проницаемость капиллярных и клеточных мембран, что проявляется в явлениях отечности и разнообразных кровоизлияниях. Нарушаются функции клеток, наступает их некроз (Ермаков, Ковальский, 1974).

Все это приводит к более чем 40 тяжело протекающим заболеваниям человека и животных, начиная с инфаркта миокарда и диабета, заканчивая повышенной ломкостью капилляров, неподвижностью сперматозоидов и нарушениями иммунитета. Чрезвычайно важным является связь недостатка микроэлемента с этиологией вирусных заболеваний (СПИД, гепатит B, рак, грипп). Речь идет о трансформации невирулентного РНК-ового вируса типа В3 (CVB3/0) в вирулентный (Beck et al, 1995).

Этот комплекс заболеваний легко профилактируется, а иногда и лечится обогащением организма селеносодержащими соединениями. Опытным путем установлено, что максимально безопасная доза Se для человека –  $819 \pm 129$  мкг/сутки (Осипова с соавт., 1990; Whanger, Butler, 1988). Потребность в селене зависит от возраста, пола, состояния здоровья, региона. Минимальное количество потребляемого элемента в селенодефицитных провинциях, которое предотвращает возникновение эндемических заболеваний (болезнь Кешана и болезнь Кашина-Бека) – 21 мкг/день для мужчины и 16 мкг/день для женщины, в селеноадекватных регионах – 40 и 30 мкг/день соответственно (Levander, 1987). При слабовыраженном селенодефиците бывает достаточно скорректировать диету продуктами питания, содержащими повышенное количество микроэлемента.

При глубоком селенодефиците применяют пищевые добавки (содержание селена более 100 мкг/сут.) В настоящее время приоритетную позицию занимают препараты, в которых селен содержится в виде комплекса с природными носителями микроэлементов: селен на дрожжах, на водорослях, гуминовых кислотах (Мазо с соавт., 1997; Голубкина, 1999; Решетник, Парфенова, 2001). Однако чаще всего используют добавки, в которых селен присутствует в виде синтетиче-

ских комплексов селенита натрия и селен-метионина (Блинохватов, 1995). Селен этих препаратов усваивается неполноценно, а носители не физиологичны и могут вызывать побочные эффекты, как при длительном потреблении, так и передозировке (Kauf et al, 1990). Такие препараты показаны лишь для профилактики и лечения онкологических заболеваний. Чаще всего применяют неорганические селеновые добавки типа селенита и селената натрия. Существенно более редко, но зачастую более успешно применяют органические соединения селена (Блинохватов, 1995).

Даже этот сверхкраткий анализ биологической роли селена в животных организмах свидетельствует о том, что данный микроэлемент является, бесспорно, эссенциальным для животного мира, участвуя в многочисленных биохимических процессах как непосредственно (находясь при этом в составе белков – ферментов), так и косвенно (влияя на деятельность ферментов и других биомолекул, не содержащих селена).

Для представителей животного мира функции селена наиболее отчетливо проявляются в обеспечении нормальной деятельности трех защитных систем: антиоксидантной, детоксицирующей и иммунной.

Экстраполируя перечисленные биохимические функции селена на растительный мир, можно предположить, что данный микроэлемент способен участвовать в усилении адаптивного потенциала растений. Теоретически это может быть реализовано за счет следующих факторов:

- способности селена уменьшать уровень негативных последствий окислительных стрессов, спровоцированных неблагоприятными внешними воздействиями на растения (косвенное участие в актах перехвата инициаторов цепных реакций – свободных радикалов и прямое участие в безопасной утилизации перекисей и гидроперекисей липидов биомембран);

- способности селена участвовать в организации ответной реакции растений на стрессовое воздействие – резком уменьшении уровня обмена веществ и переходе в состояние глубокого покоя (дезактивирующее действие на группу ферментов, регулирующих обмен веществ; активирующее влияние на процессы выработки веществ, связывающих воду и увеличивающих вязкость цитоплазмы);

- способности микроэлемента содействовать успешному выходу из состояния с резко пониженным обменом веществ в состояние с нормальным и повышенным уровнем последнего.

## АККУМУЛЯЦИЯ СЕЛЕНА В ПОЧВАХ

В последние годы наблюдается возрастающее внимание исследователей к проблеме сбалансированности пищевых продуктов по микроэлементному составу. Важным является установление таких концентраций эссенциальных элементов, при которых химический баланс растения не нарушается, а продукции придаются диетические свойства, то есть сбалансированное соотношение неорганических и органических веществ при сохранении нативных усвояемых форм.

Селен в этом отношении представляет особый интерес, что объясняется не только существованием обширных регионов с недостатком селена в среде обитания (Ермаков, 1978; Конова, 1993), отрицательно влияющим на здоровье человека (Новиков, Плитман, 1984; Авцын с соавт., 1991; Лужен, 1995; Тутельян с соавт, 2002), но и усугублением проявлений недостатка селена в результате антропогенных нарушений организованности биосферы в целом, которые вызываются разного вида загрязняющими веществами.

Биогеохимическое обследование, проведенное в различных странах, выявило дефицит селена в почвах Балтии, Белоруссии, северо-запада Украины, Югославии (Гореликова с соавт., 1997; Голубкина с соавт., 1998; Bedwal et al, 1993; Jakovljevic et al, 1995; Golubkina, Alfthan, 1999).

Дефицит селена для человека наблюдается на территории Российской Федерации в Удмуртии, Башкирии, Якутии, в Забайкалье, Приморском крае и Карелии, в Ленинградской, Псковской, Вологодской, Ярославской, Кировской, Рязанской, Пермской, Свердловской, Курганской, Иркутской, Читинской областях (Сучков, 1981; Осипова с соавт., 1990; Кондрахин с соавт., 1991; Флоринский, Седова, 1992, Ермаков, 1999).

В зоне Нечерноземья, простирающейся от северо-восточных границ США, через Европу – север Германии, Голландию, Данию, Польшу, через Балтийские страны, Центральную Россию – на Урал, далее через всю Сибирь до восточных границ России (участки распространения подзолистых, дерново-подзолистых и некоторых подтипов болотных почв) наиболее часто встречаются биогеохимические провинции с недостатком селена (Ермаков, 1999).

Существует тенденция приуроченности Se-дефицитных провинций к зонам выхода кислых изверженных горных пород (Ермаков, 2004).

Иногда дефицит Se наблюдается в районах с нормальным его содержанием в породах и почвах. Это явление отнесено к слабой ассимиляции его растениями, произрастающими на этих почвах.

Вместе с тем были выделены зоны оптимального содержания микроэлемента: юг Западной Сибири, Ростовская область, Молдова (Кособрюхов, 1957; Ермаков, 1978).

Поступление селена в растения зависит от многих факторов и, в первую очередь, от почвенных условий: происхождения и химизма почвообразующих пород, генезиса почв, количества органического вещества в них, кислотности свойств, содержания макро- и микроэлементов и других факторов.

Кларк селена в земной коре составляет, по А.П. Виноградову, – 50 мкг/кг, по другим источникам он в 10 раз выше (Виноградов, 1957; Сидельникова, 1990; Голубкина, 1994; Longnecker et al, 1991).

Вместе с тем присутствующий в почвах микроэлемент имеет разное происхождение: литогенный и педогенный (фиксированный органическим веществом), фитогенный (выделяемый при сжигании селеновой растительности, улетающий из растений и почвенных микроорганизмов), антропогенный (вносимый в почву с удобрениями, с осадками сточных вод, путем индустриального переноса золы).

Как правило, почвы, образованные на выветренных гранитах и метаморфизованных песчаниках, характеризуются невысоким содержанием селена. Валунные пески и супеси отличаются особенно низкими концентрациями этого элемента.

Отмечено, что в почвах, сформировавшихся на вулканических породах, селена больше по сравнению с почвами, образовавшимися на глинах, песчаниках, известняках (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ермаков, 2004). По данным О.Р. Bogolevich et al (2002), в четвертичных лессовых отложениях содержание селена в среднем 56 мкг/кг почвы.

Наиболее часто в литературе встречаются следующие значения по содержанию селена в почвообразующих породах: для магматических пород – 10–50 мкг/кг, для осадочных – 30–600 мкг/кг почвы (Конова, 1993, Cooke, 1985); мезозойские осадочные породы относят к высокоселенистым (Selinus, 1988). Селен – один из летучих компонентов магмы, выделяющихся во время вулканической деятельности (Anderson, 1961).

Существенное влияние на концентрацию селена оказывает генезис почвы (Пузанов, 1999; Руденко, Дмитрук, 1999; Майманова, 2003; Jovic et al, 1995). Во многих работах отмечается, что существует

определенная связь содержания селена с почвенной зональностью. Так, концентрация подвижного селена в нативных почвах лесостепной зоны –  $0,180 \pm 0,021$  мг/кг почвы, предгорной –  $0,296 \pm 0,029$  мг/кг, горной –  $0,417 \pm 0,061$  мг/кг, то есть в почвах горной зоны в 2,3 раза, а предгорной – в 1,6 раза больше подвижного селена по сравнению с зоной лесостепи (Сучков, 1981).

Концентрации его в почвах различных генетических типов обычно варьируют в пределах от 10 до 1200 мкг/кг почвы (Виноградов, 1957; Конова с соавт., 1990; Сидельникова, 1990; Кондрахин с соавт., 1991; Cooke, 1985; Selinus, 1988).

В монографии В.В. Ермакова и В.В. Ковальского (1974) показано, что концентрация селена в почвах разных стран находится в широком интервале – от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}\%$ . В России среднее содержание селена в почвах составляет около  $1,6 \cdot 10^{-5}\%$ , варьируя от 0,1 до  $4,9 \cdot 10^{-5}\%$ .

Высокое содержание селена характерно для дерново-глеевой почвы на глинистых отложениях (524 мкг/кг почвы), торфяно-глеевой (624), дерново-глеевой на карбонатных суглинках (727) (Торшин с соавт., 1996; Машкова, 1998); в черноземах – 330–350 мкг/кг (Капитальчук, 2006).

Определение содержания селена в черноземах Пензенской области показало, что его количество в верхних горизонтах варьирует в пределах от 59 до 501 мкг/кг почвы в зависимости от характера использования почв, их генезиса, содержания гумуса, реакции среды и других факторов.

В исследованиях выявлена зависимость аккумуляции микроэлемента от подтиповых особенностей этих почв.

В рамках имеющейся выборки почвы основных подтипов чернозема можно расположить в следующей последовательности по мере уменьшения содержания в них селена: чернозем типичный ( $335 \pm 15$  мкг/кг почвы) > выщелоченный ( $153 \pm 16$ ) > оподзоленный ( $92 \pm 8$ ).

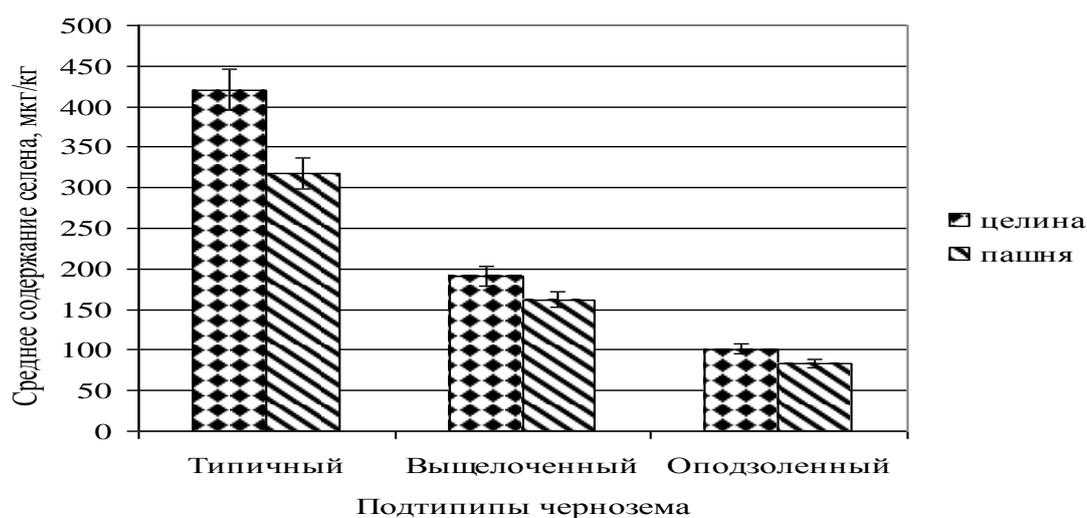
Для оценки уровня обеспеченности почв селеном J. Tan et al (2002) предлагают принять следующие пороговые концентрации микроэлемента: менее 125 мкг/кг – область селенодефицита; 125–175 мкг/кг – маргинальная недостаточность; 175–3000 мкг/кг – область оптимума; более 3000 мкг/кг почвы – область избытка. В соответствии с этой шкалой, пахотные почвы области можно охарактеризовать следующим образом: чернозем типичный содержит оптимальное количество микроэлемента, чернозем выщелоченный имеет недостаточное его содержание, а чернозем оподзоленный находится в зоне селенодефицита (таблица 1).

Высокое содержание селена также отмечено в типичных черноземах лесостепной части Молдавии (Тома, Капитальчук, 2006; Капитальчук с соавт., 2007). Авторами установлено существенное снижение количества селена в верхних горизонтах обыкновенных и выщелоченных черноземов по сравнению с типичными черноземами.

*Таблица 1 – Среднее содержание селена в пахотных черноземах области*

Подтип чернозема	Глубина взятия образца, см	Содержание селена, мкг/кг почвы			
		min	max	среднее	отклонение от среднего
Типичный	0-30	230	303	268	17,9
Выщелоченный	0-25	63	167	104	16,1
Оподзоленный	0-25	68	130	93	7,2

В наших исследованиях выявлено изменение содержания селена от характера использования черноземных почв (рисунок 1; таблица 2).



*Рисунок 1 – Содержание селена в верхних горизонтах целинных и пахотных черноземов*

Таблица 2 – Содержание селена в парных разрезах черноземов

Место взятия образцов	Характер использования	Глубина взятия образца, см	Среднее содержание селена, мкг/кг
Чернозем выщелоченный			
Учхоз «Рамзай», опытное поле	залежь более 40 лет пашня	5-25 0-25	162±15 98±3
Б. Ендова	целина пашня	10-30 0-30	157±12 124±17
Еланская степь	целина пашня	6-25 0-25	182±17 151±56
Попереченская степь	целина пашня	10-25 0-25	268±14 182±6
Ольшанские склоны	целина пашня	6-20 0-20	159±18 113±5
ЗАО «АПК Нечаевский»	залежь более 20 лет пашня	7-25 0-25	301±19 223±16
Чернозем типичный			
ООО «Башма- ковский хлеб», отделение Шереметьево	залежь более 40 лет пашня	9-25 0-25	352±15 203±13
отделение Ширяево	залежь более 20 лет пашня	5-30 0-30	501±21 396±11
«Петровский хлеб» отделе- ние Кучки	залежь более 40 лет пашня	10-30 0-30	356±12 300±6,5
отделение «Серп и Молот»	залежь более 20 лет пашня	6-30 0-30	475±18 369±6,6
Чернозем оподзоленный			
Пензенский теп- личный комбинат	залежь более 50 лет пашня	10-25 0-25	116±12 95±1,0
отделение Ардым (1)	залежь более 20 лет пашня	6-22 0-22	103±6,8 82±6,5
отделение Ардым (2)	залежь более 20 лет пашня	6-25 0-25	84±12 72±8

Длительное антропогенное воздействие привело к снижению количества микроэлемента в пахотных почвах одного и того же подтипа на 18–27% по сравнению с целинными или длительно залежными аналогами. Возможно, это обусловлено потерей гумуса и кальция из пахотных почв.

Статистическая обработка полученных данных позволила выявить экспоненциальную зависимость содержания общего селена в черноземах (независимо от подтипов и использования) от количества гумуса (x) в верхних горизонтах и уровня  $pH_{KCl}$  почвы (рисунок 2).

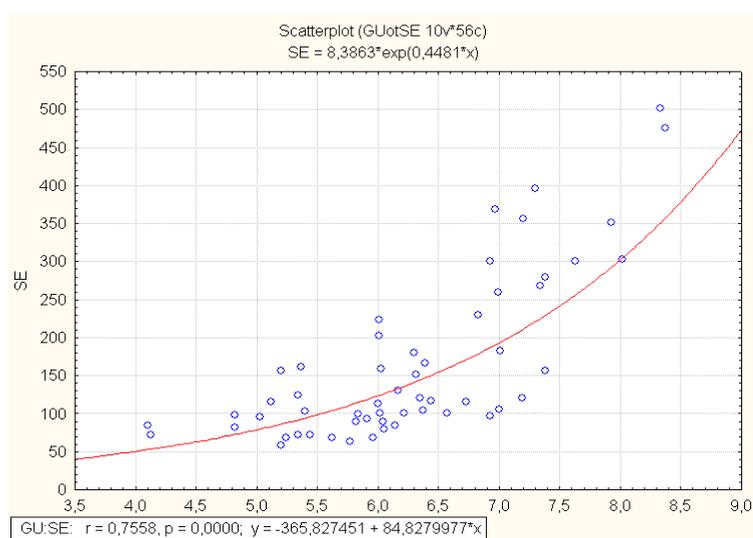
Эта зависимость выражалась следующими уравнениями:

$$\text{от гумуса} - y = 8,3863e^{0,481x}$$

$$\text{от pH} - y = 2,6866e^{0,727z}$$

Количество общего селена в черноземах малогумусных (с 4,5 до 5,5 %) увеличением содержания гумуса на 1 % повышалось в среднем на 35,6 мкг/кг, в среднегумусных (с 6,0 до 9,0 %) – на 116,6 мкг/кг почвы. При изменении количества гумуса на 1 % содержание общего селена в пахотном слое чернозема увеличивалось: в оподзоленном на 39,5 мкг/кг, в выщелоченном – на 44,6 мкг/кг, в типичном – на 55,6 мкг/кг почвы.

При сдвиге pH на 0,1 ед. в интервале pH 4,5–5,5 количество селена в почве возрастало на 75,7 мкг/кг, а в интервале 5,5–6,5 – только на 64,2 мкг/кг почвы. Вместе с тем содержание валового селена в почве дает лишь ориентировочное представление об обеспеченности сельскохозяйственных культур данным микроэлементом.



Зависимость от I – гумуса; II – уровня  $pH_{KCl}$ .

*Рисунок 2 – Содержание селена в верхнем слое черноземов в зависимости от гумуса и pH*

Растения способны использовать только ту часть селена, которая находится в подвижных водорастворимых формах.

Это – селенаты и обменно-поглощенные селениты и некоторые органические соединения. Исследователи считают, что содержание селенатов в почвах составляет 12–38 %, селенитов – 22–78 %, других форм – 10–14% от общего количества валового селена (Постников, Илларионова, 1991; Торшин с соавт., 1994, 1996; Seby et al, 1997).

Важную роль имеют и газообразные соединения селена в почве: диметилселенид, диметилдиселенид и диметилселенидсульфид, которые образуются, в первую очередь, за счет деятельности бактерий и грибов, а также из неорганических форм селена в результате процессов восстановления и биометилирования, осуществляемых некоторыми видами растений и фауной почвы (Girling, 1984; Chasteen, Bentley, 2003). От формы нахождения селена в почве сильно зависит величина адсорбции, иммобилизации микроэлемента и обеспеченность им растений. Наиболее полно это изучено для селенат- и селенит-ионов (Ylaranta, 1983; Barrow, Whelan, 1989; Mikkelsen, et al, 1989; Fio et al, 1991; Giessel-Nielsen, 1993; Richter, Bergmann, 1994; Bruss et al, 1997).

Селенат-ион, вследствие высокой мобильности в почве, поглощается растениями в большем количестве, чем селенит (Giessel-Nielsen et al, 1984; Bahnert, 1987; Stuenzi, 1988; Giessel-Nielsen, 1993), но вместе с тем он и в большей степени подвержен процессам вымывания из почвы (Ермаков с соавт., 2004; Fio et al, 1991; Ylaranta, 1993). Большая биодоступность селената для растений объясняется также тем, что селенат-ион, в отличие от селенит-иона, может активно поступать в растения через корневую плазмомембрану (Abrams et al, 1990; Laeuchli, 1993; Terry et al, 2000).

Имеются данные, свидетельствующие о тесной связи между содержанием селена в растениях и содержанием водорастворимого (Nye, Peterson, 1975) и солерастворимого селена в почве (Cary, Away, 1969).

Органические соединения селена с небольшой молекулярной массой, особенно селенометионин, относятся к легкодоступным соединениям для растений (Abrams et al, 1990; Coburn, Mayland, 1992).

Селенид, элементарный селен и комплексные органические соединения селена не могут непосредственно поглощаться растениями (Giessel-Nielsen et al, 1984).

При низких концентрациях селена в почве возможно поступление селена в растения из воздушного пула (10 и более %), особенно в местах с повышенным выбросом в атмосферу диметилселенида (животноводческие комплексы, непроточные водоемы) (Bollard, 1983; Zeive, Peterson, 1985).

Интересно отметить, что некоторые растения, в частности представители семейства капустных, способны выделять в атмосферу летучие соединения селена (Banuelos, Schrale, 1989), которые, в свою очередь, могут поглощаться находящимися поблизости растениями (Albasel et al, 1989). Таким образом, в растениях возможно существование двух потоков селена: от корней в листья и обратно.

Исследователи отмечают, что уровень накопления селена растениями, в первую очередь определяется его аккумуляцией в почве (Голубкина, 1994; Sippola, 1979; Albasel et al., 1989).

Так, В.В. Кузнецовым (2004) в вегетационном опыте с яровой пшеницей установлено увеличение содержания селена в зерне пшеницы при повышении его количества в почве. Обогащение почвы селеном до уровня 0,79 мг/кг (фон 0,26 мкг/кг почвы) приводило к повышению содержания микроэлемента в зерне у сорта пшеницы Приокская до 2,84 мкг/кг. При дополнительном, пятикратном увеличении содержания селена в почве до 3,95 мг/кг происходило дальнейшее, практически пропорциональное обогащение селеном зерна пшеницы сорта Приокская (10,43 мкг/кг) и сорта Саратовская 29 (11,09 мкг/кг).

В вегетационном опыте с яровой пшеницей нами было смоделировано содержание селена в почве путем внесения селената натрия в дозах Se от 0 до 2,0 мг/кг почвы с интервалом 0,5 мг/кг и уровнем рН от 4,85 до 7,25. Результаты эксперимента показали, что содержание селена в растениях яровой пшеницы сорта Кинельская 59 на черноземе выщелоченном на 93,5–94,3 % определяется аккумуляцией его в почве (рисунок 3).

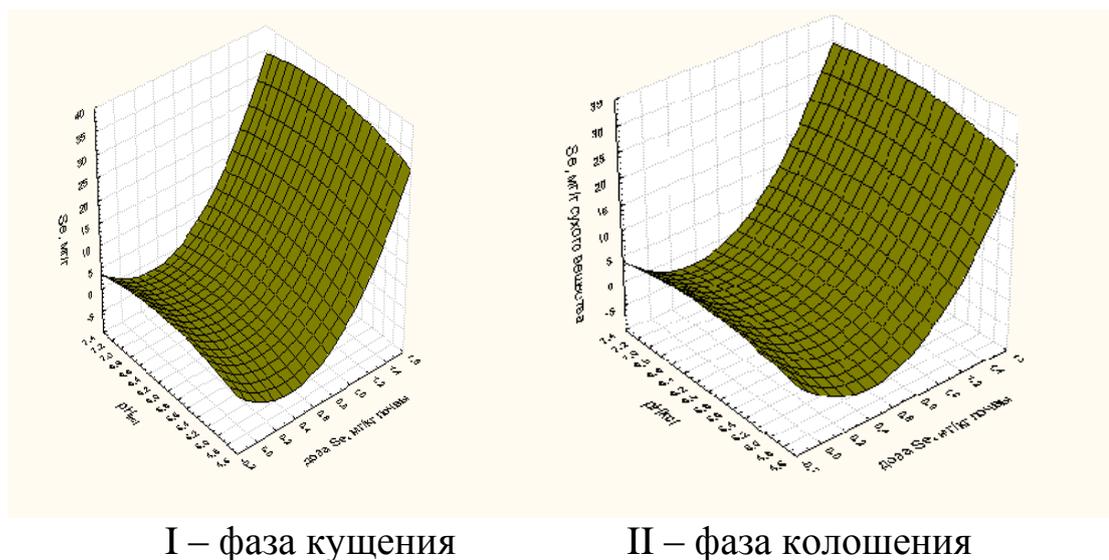


Рисунок 3 – Содержание селена в растениях пшеницы сорта Кинельская 59 в зависимости от количества микроэлемента в почве и уровня рН<sub>KCl</sub>

С увеличением содержания селена в почве концентрация его в растениях пшеницы повышалась.

В опыте с козлятником восточным, где содержание селена в почве было смоделировано также внесением селената натрия, отмечено, что повышение в почве количества микроэлемента на 0,25 мг/кг приводило к увеличению его на 14 % в зеленой массе растений в период стеблевания и ветвления культуры; при последующем повышении содержания в почве на 0,25 мг обеспечивалось увеличение на 28 % в почве и в 3,5 раза растениях.

При увеличении селена в почве на 55,6 мкг/кг количество его в растении возросло в 9,1 раза, а повышение в почве в 2,1–2,7 раза не сказалось на дальнейшем увеличении селена в зеленой массе (таблица 3).

*Таблица 3 – Накопление селена растениями козлятника восточного при обогащении почвы селенатом натрия*

Доза внесения Se, мг/кг	Содержание Se растениями, мг/кг сухого вещества	Доза внесения Se, мг/кг	Содержание Se в растении, мг/кг сухого вещества
0	0,57±0,03	2,0	5,21±0,11
0,25	0,71±0,04	3,0	5,42±0,13
0,50	1,99±0,09	4,0	4,89±0,09
1,00	5,18±0,10	5,0	4,62±0,08

**Примечание.** Исходное валовое содержание селена в почве составило 1,8 мг/кг почвы

Н.В. Lakin (1961), М.П. Капитальчук с соавт. (2007), Л.Н. Скрыпник с соавт. (2008) также отмечают, что количество общего селена в почве не всегда отражает уровень концентрации этого элемента в растениях. Чаще наблюдается криволинейная зависимость между этими показателями. До определенного момента содержание селена в растениях повышается с увеличением его концентрации в почве, а далее остается на одном уровне и даже снижается.

Судить о примерном количестве биодоступных форм селена в почве М.П. Капитальчук (2006) предложила по коэффициенту биологического накопления (КБН), который представляет собой отношение количества селена в растениях к его общему содержанию в почве, выраженный в процентах.

Определение коэффициента биологического накопления в сельскохозяйственных культурах, произрастающих на черноземах учхоза

«Рамзай» ПГСХА, показало, что наибольший КБН отмечен в зеленой массе кукурузы, суданской травы и козлятника восточного (таблица 4).

*Таблица 4 – Накопление селена сельскохозяйственными культурами на черноземе выщелоченном*

Культура	Содержание Se, мкг/кг		КБН, %	Культура	Содержание Se, мкг/кг		КБН, %
	в почве	в растении			в почве	в растении	
Яровая пшеница: зерно солома	130	19	14,6	Ячмень: зерно солома	130	28	15,4
		16	12,3			32	17,8
Просо: зеленая масса	180	32	17,8	Кукуруза: зеленая масса	180	58	32,2
Козлятник восточный: зеленая масса	180	57	31,7	Озимая пшеница: зерно солома	180	33	18,3
						20	11,1
Кострец: зеленая масса	180	45	25,0	Озимая пшеница: зерно солома	117	21 14	18,0 12,0
Суданская трава: зеленая масса	180	52	28,9	Овес: зерно солома	130	29	20,3
						15	17,4

Зерновые культуры меньше использовали селен почвы. КБН колебался в зерне от 14,6 до 20,3 %, в соломе – от 11,1 до 17,8 %.

На основании проведенных исследований можно заключить, что содержание селена в черноземах Пензенской области зависит от многих факторов, в том числе от количества гумуса, уровня рН, доступности форм селена.

## СЕЛЕН В РАСТЕНИЯХ

В многочисленных исследованиях отмечается, что поступление и накопление селена в растениях определяются количеством и формами его в почве, реакцией почвенной среды, содержанием органического вещества, макро- и микроэлементов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Голубкина, 1995; Торшин с соавт., 1995; Торгов, Димидова, 1998; Ермаков, Мухоморов, 2002; Голубкина с соавт., 2004; Кузнецов, 2004; Капитальчук, 2008; Вихрева, Лебедева, 2010).

Несмотря на большое значение доступных форм селена в почве, это не является единственным фактором, обуславливающим то или иное содержание микроэлемента в растительных объектах.

В ряде работ показано, что на доступность селена для растений решающее влияние оказывает реакция почвенной среды (Кабата-Пендиас Пендиас, 1989; Конова, 1993; Скрыпник с соавт., 2008). Исследователи отмечают, что лучше всего поглощение селена растениями из почвы происходит в «щелочном» интервале рН.

Так, обычное среднее содержание этого элемента в растениях, произрастающих на щелочных почвах, составляет от 0,01 до 10 мг/кг сухой массы, а в кислых почвах почти никогда не превышает 0,2 мг/кг (Girling, 1984). При кислой реакции среды биодоступность селена ограничена (Глазовская, 1976).

Вместе с тем, более 50 млн гектаров почв России имеют кислую реакцию. Отмечены не только природно-кислые почвы с избыточной кислотностью, но и черноземы.

Ускоренное подкисление черноземов повсеместно наблюдается со второй половины двадцатого века. Зафиксированы черноземы не только со средней, но и сильной кислотностью (Шильников с соавт., 1998). Так, в Пензенской области площадь черноземов с кислой реакцией (различной степени кислотности) достигла 93 %, а средний показатель рН составил 5,0 ед. (отчет ГЦАС «Пензенский», 2010).

Отсутствие данных о накоплении селена растениями на черноземных почвах с разной реакцией среды обусловило необходимость изучения этого вопроса.

Результаты эксперимента, проведенного в условиях вегетационного опыта (где единственным различием была реакция среды), свидетельствуют о том, что наибольшее количество селена в надземной массе пшеницы накапливалось на почве с рН равным 6,0 (таблица 5).