

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ ОБОГАЩЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ЙОДОМ И СЕЛЕНОМ (ОБЗОР)

Н.А. Голубкина, Е.Г. Кекина, С.М. Надежкин*

Агрехимический испытательный центр Всероссийского института селекции и семеноводства овощных культур, Московская область, Россия

РЕЗЮМЕ: Широкое распространение дефицита йода и селена в мире определяет необходимость разработки эффективных путей коррекции обеспеченности организма этими микроэлементами. В обзоре рассматриваются условия сочетанной биофортификации, как наиболее перспективного метода решения проблемы, основные достижения раздельного и сочетанного обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном. Обсуждаются вопросы влияния биофортификации на биохимические показатели растений, накопление биологически активных соединений, нитратов, антиоксидантную и антиканцерогенную активность обогащенных растений, а также проблемы сочетанной биофортификации. Приводятся данные устойчивости основных химических форм селена в желудочно-кишечном тракте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: селен, йод, микроэлементозы, биофортификация.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение микроэлементозов и их значительное влияние на здоровье населения мира определяют необходимость разработки эффективных мер оптимизации обеспеченности человека микроэлементами. Йод (I) и селен (Se) относятся к группе из семи элементов (Fe, Ca, Mg, I, Se, Zn, Cu), дефицит которых наиболее широко распространен среди жителей планеты (White, Broadley, 2009). Оба элемента являются мощными иммуномодуляторами, природными антиоксидантами, эффективно защищающими организм от различного рода стрессов. Они необходимы для роста, нормальной работы мозга и репродуктивной системы организма. Эссенциальность Se для нормального метаболизма щитовидной железы хорошо известна (Zimmermann, Köhrle, 2002). Установлено, что сочетанный дефицит I и Se является причиной миксодермального идиотизма. В норме щитовидная железа способна поддерживать высокие концентрации Se даже в условиях дефицита последнего и экспрессирует большое количество белков, содержащих селеноцистеин. К таким Se-содержащим белкам относятся, в частности, глутатионпероксидаза и тиоредоксинсуктаза. Адекватное потребление Se способствует эффективному синтезу и метаболизму тиреоидных гормонов и защищает щитовидную железу от поражений, вызываемых избытком йодида. В районах сочетанного дефицита I и Se нормализация уровня потребления I является обязательным

условием, предшествующим введению добавок Se для предотвращения гипотирозидизма. Дефицит Se и нарушение гормонального статуса щитовидной железы могут развиваться при использовании специальных диет, как, например, при длительном парентеральном питании, фенилкетонурии, муковисцидозе, вегетарианстве, или могут быть результатом несбалансированного питания у детей, людей пожилого возраста или пациентов клиник.

Среди возможных путей решения проблемы микроэлементозов: расширение ассортимента применяемых продуктов питания, обогащение готовых пищевых продуктов микроэлементами, использование биологически активных добавок и биофортификация сельскохозяйственных растений. Последний путь представляется наиболее перспективным и экономически выгодным, способным охватить большую часть населения независимо от места проживания и социального статуса.

Хотя I и Se не являются эссенциальными элементами для растений, их использование в процессах биофортификации может обеспечить значительные преимущества. Прежде всего, следует учитывать, что растения обладают уникальной способностью переводить неорганические соединения I и Se в органические хорошо усваиваемые формы.

ОБОГАЩЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ СЕЛЕНОМ

Дефицит Se характерен для многих стран (Oldfield, 1999), включая значительную часть территории России (рис. 1). Известно, что от 0,5 до

* Адрес для переписки:

Голубкина Надежда Александровна
E-mail: segolubkina@rambler.ru

1 млрд человек на земле страдают от дефицита Se, и еще большая часть населения мира потребляет пониженные уровни микроэлемента, не достаточные для эффективной защиты организма от сердечнососудистых, раковых и инфекционных заболеваний, включая СПИД.

Растения представляют собой первое звено в пищевой цепи переноса микроэлемента, являясь, таким образом, основным источником Se для животных и человека. Обладая способностью замещать серу в природных соединениях, Se в растениях образует Se-содержащие аминокислоты (селеноцистеин SeCys и селенометионин SeMet) и соответствующие белки, сахара и низкомолекулярные соединения – аналоги производных серы.

Особую группу Se-содержащих органических соединений составляют метилированные формы Se-содержащих аминокислот: селенометил селеноцистеин (SeMe-SeCys) и дипептид гамма-глутамил селенометил селеноцистеин (γ -Glu-SeMe-SeCys). Данные соединения привлекают особое внимание благодаря выраженному антиканцерогенному действию (Голубкина, Папазян, 2006). Образование этих соединений типично не только для специфических видов растений (например, чеснок, лук), но и для самых разнообразных сельскохозяйственных культур при обогащении Se.

Существует определенный парадокс: селенат натрия (Se+6) чрезвычайно эффективно усваивается растениями по сульфатному пути, однако, очень часто метилированные формы не образует. Селенит натрия (Se+4), напротив, усваивается

сравнительно мало из-за легкости образования в почве неактивных комплексов с окислами/гидроокислами Fe и Al (особенно мощно такие комплексы образуются в кислых почвах). В то же время отличительной особенностью использования селенитов является преимущественное накопление в растениях метилированных форм Se-содержащих аминокислот – важнейших природных антиканцерогенов.

Видовые различия в аккумуляции различных химических форм Se хорошо видны при сравнении компонентного состава соединений Se в чесноке, шнитт-луке и редисе (табл. 1).



Рис. 1. «Селеновый пояс» России: указаны регионы, где у населения зарегистрированы уровни селена в сыворотке крови менее 75 мкг/л при норме 115–120 мкг/л (Голубкина, Соколов, 2012)

Таблица 1. Компонентный состав Se-содержащих соединений в сельскохозяйственных растениях, % (Pyrzinska, 2008)

Наименование	Se	Se+6	SeMet	SeCys	MetSeCys	γ -GluMetSeCys
Чеснок	+6	9	2	–	5	63
	+4	0	15,5	6	28,8	49,7
Шнитт лук	+6	81	0	5	8	0
	+4	21	5	41	21	0
Редис	+6	56,7	16,7	15,8	5,8	0
	+4	0,9	16,1	5,3	71,1	0

Из трех сельскохозяйственных культур только чеснок способен синтезировать γ -Glu-SeMe-SeCys. Однако селенат (Se+6) при аккумуляции в растениях часто не претерпевает химических изменений. Так, при обогащении чеснока Se шестивалентная форма микроэлемента составляет около 9% всего количества адсорбированного элемента, около 81% – в шнитт-луке, 56,7% – в редисе, а в пшенице селенат практически полностью переходит в Se-Met!

Крупномасштабные эпидемиологические исследования по применению Se в защите от рака до настоящего времени не использовали Se-обогащенные растения (за исключением, пожалуй, ис-

пользования Se-обогащенного чеснока), а основными формами Se были селенит (Se+4) и Se-обогащенные дрожжи, где Se представлен преимущественно SeMet. Но даже на таких препаратах был показан защитный эффект от возникновения и развития разных форм рака (простаты, прямой кишки, легких, печени) (Finley, 2005).

Видоспецифичность в аккумуляции Se проявляется и в особенностях распределения элемента между наземной и подземной частями растений. Так, если селенат (Se+6) в наибольшей степени аккумулируется в листьях лука, то использование селенита (Se+4) обеспечивает более равномерное распределение элемента (рис. 2).

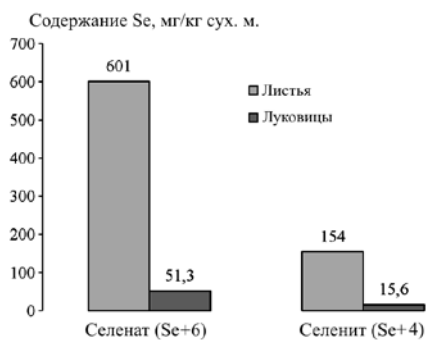


Рис. 2. Влияние формы Se на распределение между подземной и наземной частями лука репчатого (Wrobel et al., 2004)



Рис. 3. Изменение компонентного состава Se-содержащих соединений чеснока в условиях желудочно-кишечного тракта (Pyrzynska, 2008)

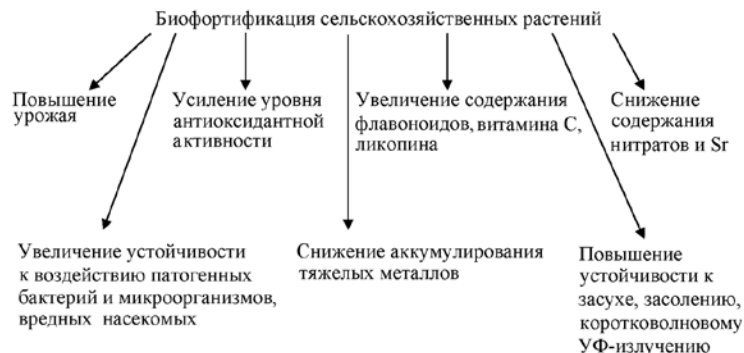


Рис. 4. Преимущества осуществления биофортификации Se сельскохозяйственных растений

Таблица 2. Биохимические показатели томатов, выращенных на АПИОНах, содержащих селенат натрия

Показатель	Контроль	Se-АПИОНы
Se, мкг/кг сухой массы	77 ± 2	4260 ± 4
АК	$20,5 \pm 1,0$	$22,9 \pm 1,0$
Флавоноиды, мг/100 г сырой массы	$6,7 \pm 0,6$	$7,8 \pm 0,6$
Сумма каротиноидов:	$11,1 \pm 1,0$	$12,9 \pm 0,9$
в том числе ликопин	$7,7 \pm 0,8$	$9,3 \pm 0,7$
в том числе γ -каротин	$1,4 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$
Антиоксидантная активность в пересчете на мг АК/г сыр. м.	$1,1 \pm 0,1$	$1,7 \pm 0,1$
Нитраты, мг/кг сырой массы	117 ± 10	69 ± 6
Sr, мг/кг сухой массы	$12,89 \pm 1,29$	$5,55 \pm 0,67$

Аналогичную закономерность наблюдали и на брокколи (Pedrero et al., 2007). С другой стороны, у редиса распределение Se между листьями и корнеплодами поразительно равномерно независимо от используемой формы Se (Pedrero et al., 2006).

Чрезвычайно важными представляются исследования метаболизма соединений Se в организме человека. Действительно, для максимального проявления антиканцерогенного эффекта необходимо, чтобы метилированные формы Se-содержащих аминокислот растений не разрушались в желудочно-кишечном тракте. На Se-обогащенном чесноке было показано, что SeMet, Se-(Cys)₂ и SeMe-SeCys устойчивы к воздействию желудочного сока, в то время как γ -glu-SeMe-SeCys при переваривании теряет глутаминовый остаток. При этом экстракционная способность различна для разных пищевых источников Se (Dumont et al., 2006) (рис. 3).

С позиции агрохимии и нутрициологии биофортификация сельскохозяйственных растений Se может обеспечить и другие преимущества: снизить уровень аккумуляции тяжелых металлов, Sr и нитратов, повысить содержание природных антиоксидантов, а также урожай и устойчивость растений к различного рода стрессам (рис. 4).

В качестве примера ниже приводятся биохимическая характеристика томатов, выращенных с применением удобрений пролонгированного действия (АПИОНах), содержащих селенат натрия (табл. 2).

В настоящее время в промышленном масштабе выпускаются обогащенные Se чеснок (США), томаты (Великобритания) и чай (Китай). В Финляндии с 1985 г. повсеместно применяют NPK-удобрений, обогащенные селенатом натрия (Ekholm et al., 2007). В России разработана технология получения обогащенной Se паприки (Голубкина и др., 2010) и осуществлена успешная апробация препарата на больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями в Хабаровском медицинском университете.

Однако существуют серьезные проблемы осуществления технологии обогащения растений Se. Прежде всего, это малая устойчивость большинства сельскохозяйственных растений к высоким концентрациям микроэлемента. Кроме того, оптимальные концентрации Se, используемые для биофортификации, могут значительно различаться для разных видов растений. Существуют и сортовые различия, хотя и менее выраженные. Серьезной проблемой биофортификации является возможность загрязнения окружающей среды Se. В настоящее время в разных странах мира используют минеральные удобрения, содержащие селенат натрия (Финляндия, Новая Зеландия), осуществляют опрыскивание растений растворами солей Se (Словения), используют удобрения пролонгированного

действия, содержащие селенат натрия (Россия), и обогащают растения в условиях гидропоники (Китай, Польша). На практике наименьшее загрязнение окружающей среды характерно только для двух последних методов.

ОБОГАЩЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ЙОДОМ

По данным ВОЗ, около 35% населения мира страдают от дефицита I, а доля населения, находящаяся в группе риска составляет более 1 млрд человек (Winger, 2008). К 2003 г. дефицит йода отмечался в 54 странах мира (рис. 5).

Согласно рекомендациям ВОЗ, потребление поваренной соли должно быть снижено, по крайней мере, наполовину для снижения уровня заболеваемости и смертности от сердечно-сосудистых заболеваний (WHO, 2007). Таким образом, это может привести к развитию значительного дефицита I. Наиболее реальный и дешевый выход из этой ситуации – обогащение сельскохозяйственных растений I (White, Broadley, 2009). Известно, что биодоступность I в продуктах питания достигает 99% (Weng et al., 2009).

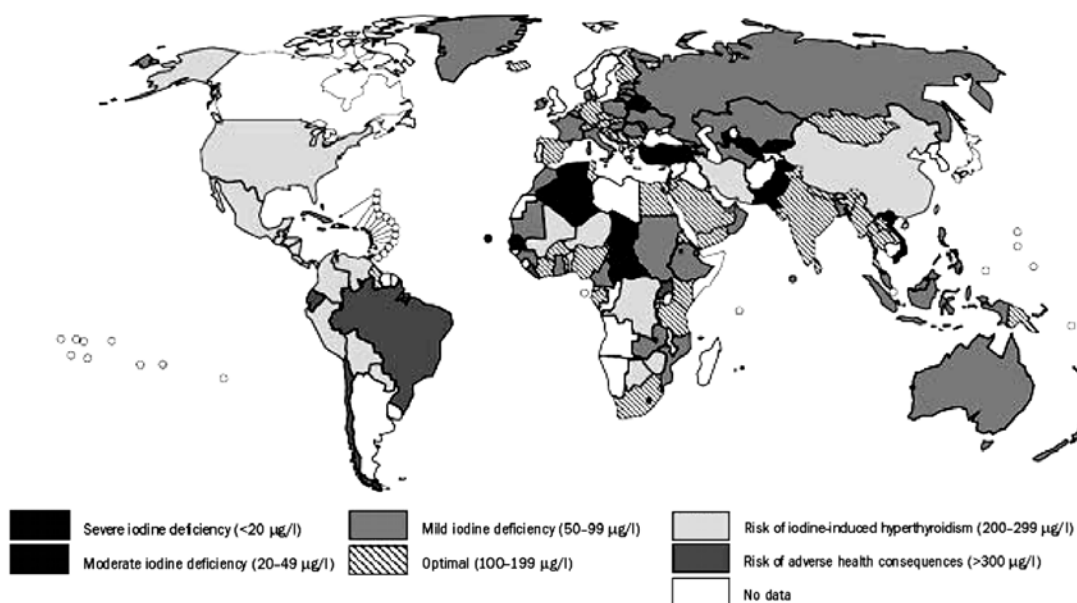


Рис. 5. Доля семей, имеющих доступ к йодированной соли (Международный совет по борьбе с I-дефицитными заболеваниями ICCID, 2011).
Map provided by the World Health Organization

Обогащение I сельскохозяйственных растений может быть осуществлено с применением стандартных агрохимических технологий: внесение в почву вместе с минеральными удобрениями или опрыскиванием растений раствором соли I (Hong et al., 2008; Ledwozyw et al., 2009). Такие пути получения функциональных продуктов питания,

обогащенных I, могут иметь ряд трудностей, связанных с тем, что I не является эссенциальным для сельскохозяйственных культур (Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007). С одной стороны, в малых дозах I стимулирует рост и развитие растений (Borst-Pauwels, 1961), с другой – избыток внесенного I может приводить к токсикозам (Maskowiak et al.,

2005). Трудности в этом плане связаны также с тем, что существует крайне мало информации о метаболизме I в растениях. (Kabata-Pendias, Mukherjee,



Рис. 6. Влияние обогащения редиса I на накопление нитратов: (* – внекорневое внесение элемента; ** – внесение в почву) (Strzetelski et al., 2010)



Рис. 7. Содержание нитратов в листьях (1) и черешках (2) пекинской капусты при внекорневом внесении йодида калия (50 мг/л)

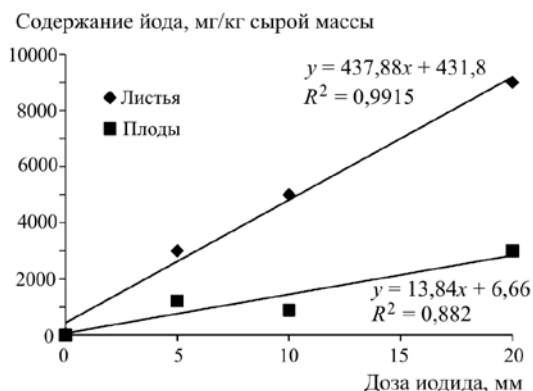


Рис. 8. Уровни накопления I в листьях и плодах томатов при обогащении йодидом в условиях гидропоники (* – для наглядности уровни аккумуляции йода плодами увеличены в 100 раз) (Landini et al., 2011)

2007). До сих пор не установлен диапазон отрицательного воздействия йода на биохимические и физиологические реакции в растениях (Xia et al., 2003). Показана возможность восстановления йодата IO_3^- в растениях до йодида I^- под действием нитратредуктазы, в результате чего в растениях возрастает количество нитратов (рис. 6). Этого не наблюдается при использовании для обогащения йодида, однако эффект снижения уровня нитратов достоверен только для листьев при внекорневом внесении микроэлемента.

Тенденция к возрастанию уровня нитратов при внекорневом внесении элемента наблюдается для черешков пекинской капусты, но не листьев (рис. 7).

Успешное обогащение I было осуществлено на многих сельскохозяйственных культурах: китайской капусте Пак-Чой, сельдерее, перце, редисе (Hong et al., 2008), капусте (Weng et al., 2008), шпинате (Zhu et al., 2003), томатах (Landini et al., 2011) и др. Как правило, содержание I снижается в ряду корни > листья > стебли (Weng et al., 2008). Для томатов йодид лучше усваивался при внесении в почву или питательный раствор, чем при внекорневом внесении (рис. 8).

Показано, что содержание антиоксидантов в салате возрастает при обогащении I (Blasco et al., 2008).

Чрезвычайно заманчивым является использование I в удобрениях, поскольку в этом случае растения, обогащенные I, исключают передозировки микроэлемента у населения. В условиях гидропоники и в вегетационных опытах показано, что I хорошо аккумулируется в очень узком концентрационном интервале концентраций. Основные исследования в этой области направлены на изучение эффективности биофортификации, влияния дозы, формы и способа обогащения (Mackowiak, Grossl, 1999; Zhu et al., 2003; Dai et al., 2004) (рис. 9). Установлено, что растения предпочитают аккумулировать I корнями в форме йодида (по сравнению с йодатами), хотя избыточное аккумулирование I может снизить биомассу (Mackowiak, Grossl, 1999; Zhu et al., 2003). На интенсивность аккумулирования в значительной степени влияет способ обогащения. Для люцерны показано более высокое обогащение при опрыскивании растений йодистым калием по сравнению с внесением йодида в почву (Altinok et al., 2003).

На шпинате установлено, что внесение йодата в почву в 10 раз увеличивает аккумулирование I по сравнению с йодидом (Dai et al., 2006). С другой стороны, другие работы показывают, что йодид, внесенный в почву, или питательный раствор обеспечивает более высокое обогащение. На салате установлено, что при внекорневом внесении элемента и высоких дозах йодат давал лучшие результаты, чем йодид. При этом внесение йодида в почву не обеспечивало биофортификацию салата I. Установлено, что содержание I в почве не коррелирует с уровнями накопления I растением (Smolen et al., 2011).

Новым способом обогащения растений I является использование в качестве удобрений – морских водорослей, содержащих органическую форму микроэлемента (Weng et al., 2013).

К настоящему времени установлено, что:

при определенных концентрациях йодид может увеличить биомассу как зеленных, так и плодовых растений;

аккумуляцию I растениями осуществляется преимущественно через корни (соотношение I корни/I наземная часть находится в интервале от 1 до 2), т.е. уровень I снижается в ряду: корни > листья > плоды;

склонность к обогащению I возрастает в ряду: Пак-Чой > баклажан > острый перец, иными словами зеленные легче аккумулируют I, чем плодовые культуры. При этом коэффициент концентрирования тем ниже, чем выше концентрация I, т.е. существует определенный механизм защиты растений от токсического воздействия I;

уровень обогащения I растений снижается в ряду:

для листовых культур (зеленные) органический I > IO_3^- > I^- ,

для плодовых культур I^- > органический I > IO_3^- .

В настоящее время в супермаркетах мира появились следующие овощи, обогащенные йодом: морковь, картофель и томаты.

СОЧЕТАННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ СЕЛЕНОМ И ЙОДОМ

Из известных способов обогащения сельскохозяйственных растений I и Se сочетанная биофортификация этими микроэлементами представляется наиболее перспективной, однако она и наименее изучена. Единичные работы обогащения I и Se на салате (Smolen et al., 2014) и шпинате в условиях гидропоники (Yong-Guan Zhu et al., 2004) дают важную, но сравнительно ограниченную информацию о биохимических изменениях, происходящих в растениях при обогащении. Крайне ограничены сведения о взаимосвязи I и Se в растениях при одновременном обогащении микроэлементами. Так, Smolen et al. (2011) отмечает синергизм I и Se, проявляющийся в усилении аккумуляции элементов при совместном внесении в питательную среду. В то же время в работе китайских исследователей (Zhu et al., 2003) такая взаимосвязь на шпинате не выявлена. Существующие факты снижения уровня нитратов под действием I и Se предполагают возможность усиления этого эффекта при совместном воздействии. По нашим данным на пекинской капусте такой эффект проявляется в черешках, в то время как в листьях эффект носит противоположный характер (рис. 10).

Ослабление аккумуляции нитратов наблюдалось при совместном обогащении I и Se индийской капусты. Дополнительные преимущества сочетанного обогащения этого растения проявлялись в более чем двукратном возрастании уровня аккумуляции флавоноидов (рис. 11).

Содержание I, % от общего содержания

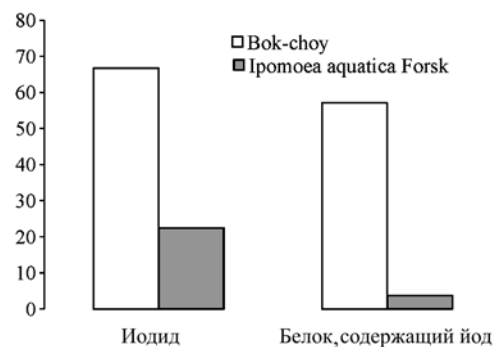


Рис. 9. Основные химические формы I в листовой капусте Пак-Чой и водяном крессе *Ipomoea aquatic Forsk* (Dai et al., 2004)

Содержание нитратов, % от контроля

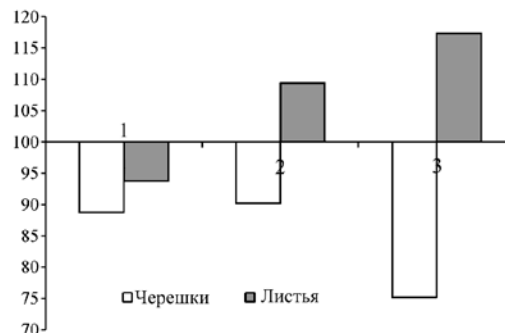


Рис. 10. Накопление нитратов листьями и черешками пекинской капусты при внекорневом внесении: 1 – селената натрия; 2 – иода калия; 3 – $\text{Na}_2\text{SeO}_4 + \text{KI}$

Содержание флавоноидов, % от контроля

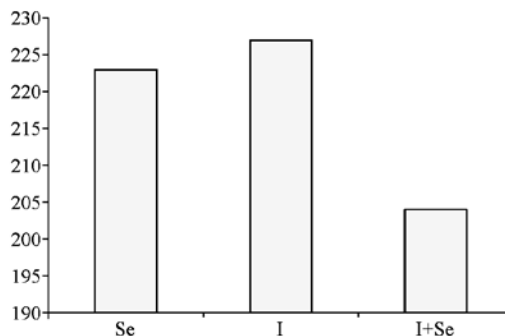


Рис. 11. Содержание флавоноидов в листьях индийской горчицы при обогащении растений Na_2SeO_4 , KI и ($\text{Na}_2\text{SeO}_4 + \text{KI}$)

Острая потребность различных стран мира в ликвидации полимикрозлементозов делает исследования возможностей сочетанной биофортификации сельскохозяйственных растений I и Se приоритетными, поскольку именно такой подход может обеспечить недорогой и высокоэффективный способ улучшения I и Se статуса и улучшение здоровья населения.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Голубкина Н.А., Пышная О.Н., Бондарева Н.Л., Дерягина В.П., Григорьянц И.К. О производстве порошка сладкого перца, обогащенного селеном, как функционального продукта питания с высокой антиоксидантной активностью. Вестник овощевода. 2010. № 1. С. 30–31.
- (Golubkina N.A., Pyshnaya O.N., Bondareva N.L., Deriagina V.P., Grigor'janc I.K. [About production of selenium-fortified paprika powder as a functional food with high antioxidant activity]. Vestnik ovoshchevoda. 2010, 1:30–31 [in Russ]).
- Голубкина Н.А., Соколов Я.А. Биоритмы селена. М.: ВНИИССОК, 2012.
- (Golubkina N.A., Sokolov Ya.A. [Biorhythms of selenium]. Moscow, 2012 [in Russ]).
- Голубкина Н.А., Папазян Т.Т. Селен в питании. Растения, животные, человек. М.: Печатный город, 2006.
- (Golubkina N.A., Papazian T.T. [Selenium in nutrition. Plants, animals, humans]. Moscow. 2006 [in Russ]).
- Altinok S., Sozudogru-Ok S., Halilova H. Effect of iodine treatment on forage yields of alfalfa. Commun Soil Plant Anal. 2003, 1–2:55–64.
- Blasco B., Rios J.J., Cervilla L.M., Sanchez-Rodriguez E., Ruiz L.M., Romero L. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health. Ann Appl Biol. 2008, 152:289–299.
- Dai J.L., Zhu Y.G., Zhang M., Huang Y.-Z. Selecting iodine enriched vegetables and the residual effect of iodine application to soil. Biol Trace Elem Res. 2004, 101:265–276.
- Dai J.L., Zhu Y.G., Zhang M., Huang Y.-Z., Song J.L. Availability of iodide and iodate to spinach (*Spinacia oleacea* L.) in relation to total iodine in soil solution. Plant Soil. 2006, 289:301–308.
- Dumont E., Vanhaecke F., Cornelis R. Selenium speciation from food source to metabolites: a critical review. Anal Bioanal Chem. 2006, 385:1304–1423.
- Ekhholm P., Reinivuo H., Mattila P., Pakkala H., Koponen J., Happonen A., Hellstrom J., Pvasikainen M.-L. Changes in the mineral and trace element contents of cereal, fruits and vegetables in Finland. J Food Comp Anal. 2007, 20:487–495.
- Finley J.W. Selenium accumulation in plant foods. Nutr Rev. 2005, 63(6):196–202.
- Hong Chun-Lai, Weng Huan-Xin, Qin Ya-Chao, Yan Ai-Lan, Xie Ling-Li Transfer of iodine from soil in vegetables by applying exogenous iodine. Ahron Sustain Dev. 2008, 28(4):575–583.
- Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. Trace elements from soil to human. Springer, 2007.
- Landini M., Gonzali S., Perata P. Iodine biofortification in tomato. J Plant Nutr Soil Sci. 2011, 174:480–486.
- Ledwozyw I., Kolton A., Smolen S., Strzetelski P. Wplyw dolistnego dokarmiania jodem salaty gruntowej na aktywnose reduktazy azotanowej i azotynowej w lisciach. Uniw. Poland, Krarowie, 2010.
- Mackowiak C.L., Grossl P.R. Iodate and iodide effect on iodine uptake and partitioning (*Oryza sativa* L) grown in solution culture. Plant Soil. 1999, 212(2):135–143.
- Mackowiak C.L., Grossl P.R., Cook K.L. Iodine toxicity in a plant-solution system with and without humic acid. Plant Soil. 2005, 269:141–150.
- Oldfield J.E. Selenium world atlas. UK, 1999.
- Pedrero Z., Elvira D., Camara C., Madrid Y. Selenium transformation studies during Broccoli (*Brassica oleracea*) growing process by liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry. Anal Chim Acta. 2007, 596:251–256.
- Pedrero Z., Madrid Y., Camara C. Selenium species bioaccessibility in enriched radish (*Raphanus sativus*): A potential dietary source of selenium. J Agr Food Chem. 2006, 54:2412–2417.
- Pyrzynska K. Selenium speciation in enriched vegetables. Food Chem. 2008, 114:1183–1191.
- Smolen S., Rozek S., Ledwozyw-Smolen I., Strzetelski P. Preliminary evaluation of the influence of soil fertilization and foliar nutrition with iodine on the efficiency of iodine biofortification and chemical composition of lettuce. J Elem. 2011. DOI:10.5601/jelem.2011.16.4.10. P. 613–622.
- Strzetelski P., Smoleń S., Rożek S., Sady W. The effect of diverse iodine fertilization on nitrate accumulation and content of selected compounds in radish plants (*Raphanus sativus* L.). Acta Sci Pol, Hortorum Cultus. 2010, 9(2):65–73.
- Weng H.X., Hong C.L., Yan A.L., Pan L.H., Qin Y.C., Bao L.T., Xie L.L. Mechanism of iodine uptake by cabbage: effects of iodine species and where it is stored. Biol Trace Elem Res. 2008, 125:59–71.
- Weng H.X., Yan A.L., Hong G.L., Qin Y.C., Pan L., Xie L.L. Biogeochemical transfer and dynamics of iodine

in a soil-plant system. *Environ Geochim Health*. 2009, 31: 401–411.

Weng Y.X., Hong C.L., Xia T.H., Bao L.T., Liu H.P., Ki D.W. Iodine biofortification of vegetable plants - an innovative method for iodine supplementation. *Chinese Science Bulletin*. 2013, 17:2066–2072.

White P.J., Broadley M.R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets: iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol*. 2009, 182:49–84.

WHO Reducing salt intake in population. Report of a WHO Forum and Technical Meeting Geneva, World Health Organization (http://www.who.int/dietphysicalactivity/Dalt_Report_VC_april07.pdf, assessed on 16th April, 2007.

Wrobel K., Wrobel K., Kannamkumarath S.S., Caroso J.A., Wysocka I.A., Bulska E. HPLC-ICP-MS speciation of selenium in enriched onion leaves. A potential dietary source of Se-methylselenocystein. *Food Chemistry* 2004, 86:617–623.

Xia S.T., Peng K.Q., Xiao L.T., Liu Z.M. Effects of iodine application on growth and content of iodine, amino acid, vitamin C and fiber in radish sprouts. *Acta Hort Sinica*. 2003, 30(2):218–220.

Zhu Y.G., Huang Y.Z., Hu Y., Liu Y.X. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: Effects of iodine species and solution concentrations. *Environ Int*. 2003, 29:33–37.

Zimmermann M.B., Köhrle J. The impact of iron and selenium deficiencies on iodine and thyroid metabolism: biochemistry and relevance to public health. *Thyroid*. 2002, 12(10):867–878.

PROSPECTS OF AGRICULTURAL PLANTS BIOFORTIFICATION WITH IODINE AND SELENIUM (REVIEW)

N.A. Golubkina, H.G. Kekina, S.M. Nadegkin

Agrochemical research center, All-Russian Institute of vegetable breeding and seeds production; Moscow region
143080, Russia; E-mail: segolubkina@rambler.ru

ABSTRACT: Frequency of iodine and selenium deficiency among the population of the world indicates the necessity of the development of effective methods for iodine and selenium status correction. A well-known interaction between selenium and iodine metabolism in organism of animals and human beings indicates great prospects in simultaneous iodine and selenium status optimization. In this respect plants situated at the beginning of food chain: soils-plants-animals-human beings, seem to be the most important object for correction of iodine- selenium deficiency. Extremely low information about the effect of selenium + iodine fortification of agricultural crops on growth, development and biochemical characteristics of plants is a significant obstacle in production of functional food products with elevated levels of the elements. Iodine and selenium are not considered to be essential for plants and their utilization in crop production is limited to a narrow concentration range, excluding toxicity effects that is an additional problem in the development of technology of joint selenium + iodine fortification of plants. The review discusses methods of dual selenium/iodine biofortification as the most prospective way of the problem decision, describes the main results of separate and dual Se/I biofortification of different agricultural crops. Questions on the effect of biofortification on biochemical parameters, content of biologically active compounds, nitrates and antioxidant activity of plants are indicated. Data on the stability of the main selenium chemical forms in gastrointestinal tract are shown. Problems of dual I/Se biofortification of agricultural crops are demonstrated.

KEYWORDS: selenium, iodine, microelementoses, biofortification.