

ПРОБЛЕМЫ СОЛЬВАТАЦИИ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ В РАСТВОРАХ

УДК 544.47+546.23+543.421/.423.1

ОБОГАЩЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫМ СЕЛЕНОМ СЫРЬЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ¹

© 2022 г. Н. А. Андреева^{а,*}, В. А. Волчёнкова^{а,**}, Е. К. Казенас^а, Т. Н. Пенкина^а, А. А. Фомина^а,
О. Н. Фомина^а, А. А. Алпатов^а, Г. Э. Фолманис^а, М. А. Федотов^а

^аИнститут металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

*e-mail: andreeva150388@mail.ru

**e-mail: volch.v.a@mail.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Исследованы диспергационные процессы получения коллоидных растворов селена с использованием лазерной абляции, ультразвуковой ванны, ультразвуковой стержневой колебательной системы и механического воздействия с целью оценки эффективности применения коллоидных растворов наноразмерного селена. Разработаны методики количественного определения концентраций селена и неорганических компонентов растительного сырья с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) и атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Найдены аналитические параметры определения элементов, оптимизированы операционные условия спектрометров. Выбран способ пробоподготовки с использованием ступенчатого микроволнового нагрева в автоклавной системе Марс 5. Выявлены матричные помехи и способы их учета. Установлено, что использование АЭС-ИСП- и ААС-методов анализа с взаимодополняющими аналитическими возможностями обеспечивает проведение контроля содержания Se и минерального состава сырья функциональных продуктов питания: матричных элементов (Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe), сопутствующих микроэлементов (Ag, B, Ba, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Sr, Zn) и токсичных элементов (As, Be, Bi, Cd, Cr, Li, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W) в широком диапазоне концентраций от 1×10^{-6} до $n \times 10\%$ без отделения матрицы и использования сертифицированных твердых стандартных образцов. Показано, что благодаря предложенным методикам аналитического контроля возможны исследования по созданию принципиально нового способа обогащения сырья функциональных продуктов питания наноразмерным селеном.

Ключевые слова: наноразмерный селен, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционная спектроскопия, растительное сырье

DOI: 10.31857/S0044453722060048

Формула пищи XXI века предусматривает использование в рационе питания функциональных пищевых продуктов, обогащенных необходимыми микронутриентами, к числу которых относится селен. Для получения обогащенных селеном функциональных продуктов питания представляется перспективным насыщать им растительное сырье. Актуален поиск новых форм селена, отличающихся пониженной токсичностью. Одно из перспективных направлений – разработка препаратов наноразмерных форм селена. Показано [1], что элементарный наноразмерный селен предпочтителен в использовании вследствие низкого уровня токсичности по сравнению с традиционно используемыми солями селена, а его коллоидные

растворы – перспективный материал для получения сырья функциональных продуктов питания, обогащенных селеном, с выраженным антиканцерогенным действием. Элементарный селен в воде не растворяется, что затрудняет приготовление его водных растворов.

Диспергирование – процесс дробления (уменьшения размеров) твердого тела под воздействием внешних сил с использованием физико-химических или механических методов. Значительный интерес представляет исследование диспергирования веществ с помощью ультразвука в жидких средах при создании зон развитой кавитации, с получением высокодисперсных частиц без посторонних примесей, в том числе не содержащих примесей тяжелых металлов. Это важно для приготовления в дальнейшем медицинских препаратов и сырья функциональных продуктов питания.

¹ XIV Международная научная конференция, Иваново, 20–24 сентября 2021 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Растворы наноразмерного селена получали на базе Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН [2–4]. Коллоидный раствор селена получали лазерной абляцией [2, 3], ультразвуковым [4] и механическим диспергированием селена. Мишенью служил элементарный селен марки “ос.ч.”. В качестве среды распыления использовали бидистиллированную воду, причем жидкость не перемешивали. Для процесса лазерной абляции использовали твердотельный лазер с длиной волны излучения 1064 нм, энергией в импульсе 2.50 Дж при длительности импульса 12 нс. Частота следования импульсов – 2 Гц.

Механическую диспергацию селена проводили при помощи вибрационно-полировального станка Metapolan-2 с частотой вибраций 100 Гц.

Ультразвуковое диспергирование селена осуществляли путем создания в жидкостях интенсивной кавитационной зоны за счет использования ультразвуковой ванны и генератора со стержневой пьезокерамической колебательной системой. В первом случае источником ультразвука служила ультразвуковая ванна УЗВ-1.3 (“Сапфир”, Россия), рабочая частота которой составляет 35 кГц при мощности генератора 50 Вт, во втором – диспергатор ЛУЗД-0,5К (“Криамид”, Россия), рабочая частота – 22.4 кГц при мощности 0.3 кВт.

Исследовали диспергационные процессы получения коллоидных растворов селена с использованием лазерной абляции, ультразвуковой ванны, ультразвуковой стержневой колебательной системы и механического воздействия с целью оценки эффективности применения коллоидных растворов наноразмерного селена. В работе [5] показано, что наночастицы, полученные лазерной абляцией и ультразвуковой стержневой колебательной системой, имеют аморфную структуру. Отличительная визуальная черта коллоидного раствора таких частиц – окрашивание его в красный цвет. Ультразвуковой ванной и механическим диспергированием получают наночастицы с кристаллической структурой [5], а коллоидный раствор окрашивается в серый цвет.

Для установления оптимальных физических параметров получения стабильных водных растворов наноразмерного селена, для изучения устойчивости получаемых растворов, для разработки эффективных методов введения получаемых растворов наноселена в растительное сырье необходимо аналитическое обеспечение: количественное определение концентрации селена и неорганических компонентов в различных частях растений, в комбикормах, воде, кормовых ингредиентах, в продукции птицеводства.

Требованиям аналитического контроля объектов растительного и животного происхождения для определения содержания селена, тяжелых

металлов и сопутствующих минеральных элементов наилучшим образом удовлетворяют атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) и атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС). В настоящей работе указанные методы использовали для разработки методики определения Se и сопутствующих минеральных элементов: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sr, Si, Sn, Ti, V, W, Zn в различных продуктах животного и растительного происхождения. При разработке методик анализа объектов учитывали их специфику: необходимость определения малых количеств селена, вредных металлов и присутствие в преобладающих и переменных количествах элементов, составляющих основу растительного сырья (Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe).

Исследования проводили на последовательном атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой фирмы “HORIBA JOBIN YVON” – модель “ULTIMA 2” (Франция-Япония) и на атомно-абсорбционном спектрометре фирмы Thermo Fisher Scientific (США) – модель iCE 3000.

Использовали реактивы марки “ос.ч.”, дважды перегнанную воду. Стандартные растворы селена готовили из металла высокой степени чистоты (99.9%) [6]. Стандартные растворы элементов готовили из фиксаля фирмы “Merk”.

Пробоподготовка. АЭС-ИСП и ААС – разрушающие методы анализа. Исследуемый материал необходимо растворить. Предложены схемы переведения проб в раствор разнообразными смесями кислот, как с применением открытых сосудов, так и в закрытых автоклавных системах: микроволновая печь Марс 5 (фирма SEM Coporation, США), микроволновая система “Минотавр-2” при различных режимах (давлении, температуры) [7]. Оптимизированы условия микроволнового воздействия и температурно-временные режимы разложения проб. Для сравнения произведено сплавление проб с Na_2O_2 . Результаты анализа после пробоподготовки различными методами хорошо согласуются между собой. Проведено сравнение различных способов переведения образцов в раствор. Автоклавное растворение с использованием модуля MARS 5 (растворение в смеси HNO_3 и HCl с добавлением H_2O_2 с использованием ступенчатого микроволнового нагрева при температуре 210°C, давлении 2400 кПа) оказалось наиболее эффективным, так как позволило сократить время пробоподготовки, снизить расход реактивов и значение фоновой эмиссии по сравнению с методикой пробоподготовки сплавлением, а главное – улучшить метрологические характеристики определения элементов: чувствительность и точность.

Оптимизация условий анализа. Найдены аналитические параметры определения элементов, оптимизированы операционные условия спектрометров. Подобраны аналитические линии определяемых элементов, свободные от спектральных помех. Характеристики оптимальных аналитических длин волн представлены в табл. 1.

Пределы обнаружения элементов, оцененные с учетом контрольного опыта, составили 1×10^{-5} – 2×10^{-6} мас. %, за исключением распространенных элементов: Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe (1×10^{-3} – $2 \times 10^{-4}\%$). Для определения селена методом АЭС-ИСП выбрали наиболее чувствительную аналитическую линию 196.026 нм с пределом обнаружения 1.5 ppb.

В табл. 1 представлены рассчитанные пределы обнаружения элементов. Видно, что пределы обнаружения селена и примесных элементов на фоне 500 ppb матрицы (смесь: Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe) значительно отличаются от таковых в чистых растворах и не в лучшую сторону.

Влияние матрицы на определение селена и сопутствующих элементов. С использованием модельных растворов выявлены потенциальные спектральные влияния, а также учтены влияния не спектрального характера. Изучено изменение величин аналитических сигналов селена и сопутствующих микроэлементов (особенно, токсичных: As, Be, Bi, Cd, Cr, Li, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W) в зависимости от изменения концентраций матричных элементов (Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe). Калибровочные графики для определения Se, As, Be, Bi, Cd, Cr, Li, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W одинаковы для чистых растворов и содержащих не более 100 ppb Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe. Для значительного числа исследуемых проб содержания матричных элементов в получаемых после минерализации растворах не превышали указанного предельного значения. Для устранения помех, обусловленных изменяющейся концентрацией больших содержаний элементов (более 100 ppb), составляющих основу природных объектов растительного происхождения (Ca, K, Mg, Na, Al, Si, Fe), использовали метод интерактивного согласования матрицы [8].

Изучение устойчивости растворов селена, полученных способом лазерной абляции. Экспериментально полученные способом лазерной абляции [3] растворы селена изучались в течение нескольких лет. Средний размер частиц селена в коллоидном растворе (по результатам метода динамического светорассеяния) составляет 50 нм. Зета-потенциал частиц в растворе достигает -13.6 мВ. Коллоидный раствор имеет pH 4.9 [9]. Методом АЭС с ИСП в растворах определяли концентрацию селена [7]. На рис. 1 показана зависимость изменения концентрации селена в растворе от времени. В течение длительного времени (более

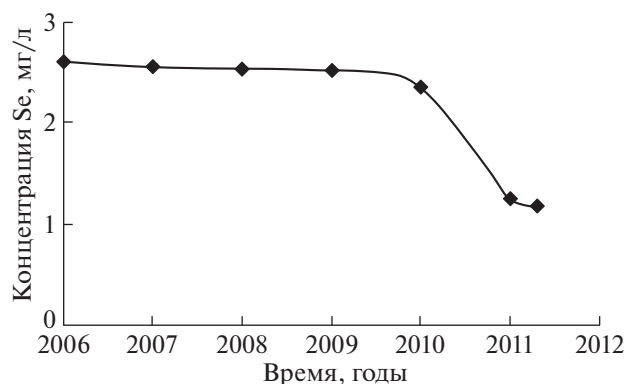


Рис. 1. Зависимость устойчивости растворов селена от времени.

четырёх лет) концентрация растворов не менялась. Из этого следует, что метод лазерной абляции подходит для изготовления устойчивых во времени водных растворов наноразмерного селена.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ценным сырьем для приготовления компонентов функциональных пищевых продуктов питания является топинамбур, поскольку имеет в своем составе большой спектр микроэлементов. Топинамбур – природный аккумулятор селена, способствует усвоению этого элемента из пищи [10]. В табл. 2 представлены результаты определения матричных (Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe), сопутствующих (Ag, B, Ba, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Sr, Zn) и токсичных элементов (As, Be, Bi, Cd, Cr, Li, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W и Se) в растительном сырье на основе топинамбура, полученные различными методами. Обнаружены значительные количества кальция, калия, натрия, магния, алюминия и железа. Из-за отсутствия стандартных образцов состава для подтверждения правильности полученных результатов определения элементов проводили их сравнение с данными, полученными разными методами анализа: АЭС-ИСП, ААС и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) (табл. 2). Получена хорошая сходимость результатов определения разными методами. В табл. 3 показаны результаты проверки правильности АЭС-ИСП-определения селена в различных частях растений без обработки селеном и после обработки с использованием метода “введено–найдено”. Обработка растений топинамбура коллоидным раствором, содержащим селен, позволяет повысить содержание данного элемента в различных частях растения. Больше всего селена накапливается в листьях. Следует отметить, что различные сорта растений на основе топинамбура отличаются степенью поглощения селена (табл. 3). Проведено сравнение возможно-

Таблица 1. Характеристики аналитических линий элементов, определяемых методами АЭС-ИСП и ААС

Элемент	Метод анализа	λ , нм	Предел обнаружения, ppb (3σ)			Оптимальный диапазон, ppm
			в чистом растворе (1 М HCl)	на фоне 200 ppm Ca	на фоне 500 ppm Ca, K, Mg	
Al	АЭС-ИСП	396.152	2.8	5.7	9.5	0.2–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	309.3	4.5	7.0	12	0.5–50
Ag	АЭС-ИСП	328.068	1.0	2.1	5.8	0.1–15
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	328.1	1.0	2.5	5.1	0.02–2
As	АЭС-ИСП	193.695	1.2	8.2	10.0	0.1–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	193.7	100	150	280	3–100
B	АЭС-ИСП	208.959	2.6	4.0	7.9	0.2–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	249.8	200	300	450	5–500
Ba	АЭС-ИСП	433.527	1.2	2.1	5.6	0.01–10
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	553.6	20	30	50	0.2–45
Be	АЭС-ИСП	313.042	1.1	1.8	2.6	0.01–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	234.9	1.5	2.9	4.1	0.01–4
Bi	АЭС-ИСП	206.170	2.5	4.6	9.9	0.1–15
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	223.1	50	70	90	0.5–10
Ca	АЭС-ИСП	317.933	1.2			0.1–10
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	422.7	1.8			0.1–3
Cd	АЭС-ИСП	226.502	1.1	2.9	4.1	0.01–15
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	228.8	1.0	2.1	3.9	0.02–2
Co	АЭС-ИСП	228.616	1.2	3.0	6.5	0.05–20
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	240.7	1.9	3.3	5.9	0.05–5
Cr	АЭС-ИСП	267.716	2.1	4.0	5.9	0.01–20
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	357.9	4.5	6.2	9.1	0.05–10
Cu	АЭС-ИСП	324.754	1.8	2.9	6.5	0.05–20
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	324.8	1.0	2.2	4.3	0.05–5
Fe	АЭС-ИСП	259.940	1.9	2.9	5.6	0.01–20
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	248.3	1.8	3.1	5.9	0.05–5
K	АЭС-ИСП	766.490	1.5	2.9	7.3	0.05–50
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	766.5	3.1	5.4	7.8	0.05–5
Li	АЭС-ИСП	670.784	1.0	2.9	5.1	0.02–15
	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂	670.8	2.1	3.3	4.8	0.02–5
Mg	АЭС-ИСП	279.553	0.1	1.9	5.1	0.01–15
	ААС пламя: C ₂ H ₂ -N ₂ O	285.2	1.1	1.9	5.8	0.01–1

Таблица 1. Окончание

Элемент	Метод анализа	λ , нм	Предел обнаружения, ppb (3σ)			Оптимальный диапазон, ppb
			в чистом растворе (1 М HCl)	на фоне 200 ppb Ca	на фоне 500 ppb Ca, K, Mg	
Mn	АЭС–ИСП	257.610	0.9	2.1	3.6	0.02–15
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	279.5	1.1	2.5	3.9	0.02–4
Mo	АЭС–ИСП	203.844	1.8	5.9	4.7	0.02–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	313.3	8.0	12	15	0.2–25
Na	АЭС–ИСП	589.592	1.6	2.5	6.8	0.02–15
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	589.0	2.1	3.9	7.3	0.01–1
Ni	АЭС–ИСП	231.604	1.8	3.5	6.1	0.2–20
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	232.0	1.2	3.4	5.5	0.1–8
Pb	АЭС–ИСП	220.353	1.8	3.2	7.5	0.1–50
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	217.0	2.1	3.5	7.1	0.1–10
Sb	АЭС–ИСП	217.581	2.9	4.7	6.3	0.1–30
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	217.6	3.8	5.2	6.8	0.4–20
Se	АЭС–ИСП	196.026	1.5	3.1	5.5	0.1–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	196.0	25	35	50	2–20
Si	АЭС–ИСП	251.611	2.3	9.0	12.5	0.2–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	251.6	200	300	550	3–200
Sr	АЭС–ИСП	405.783	0.9	3.5	3.9	0.01–20
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	460.7	1.9	4	4.2	0.02–4
Sn	АЭС–ИСП	189.989	3.0	5.9	8.7	0.2–50
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	235.5	25	34	48	1–100
Ti	АЭС–ИСП	334.941	0.9	2.5	4.7	0.1–15
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	364.3	20	28	39	1–250
V	АЭС–ИСП	292.402	1.9	3.4	4.8	0.1–15
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	318.5	15	20	26	0.9–100
W	АЭС–ИСП	207.911	2.4	4.8	6.2	0.05–100
	ААС пламя: C ₂ H ₂ –N ₂ O	255.1	300	400	500	10–500
Zn	АЭС–ИСП	213.856	0.9	1.9	3.8	0.02–20
	ААС пламя: воздух–C ₂ H ₂	213.9	1.1	1.8	3.2	0.02–2

стей применения АЭС-ИСП- и ААС-методов для анализа растительного сырья (табл. 1, 2). Метод ААС – одноэлементный, имеет небольшой динамический диапазон (два порядка) и не позволяет из одного раствора определять большой концен-

трационный интервал элементов и по этим причинам не является экспрессным, но доступен и вполне конкурентоспособен с АЭС-ИСП по метрологическим характеристикам. В пламенном варианте определение Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca,

Таблица 2. Результаты определения элементов (мас. %) в растительном сырье на основе топинамбура различными методами ($n = 10$, $P = 0.95$)

Элемент	АЭС–ИСП		МС–ИСП		ААС	
	Содержание	S_r	Содержание	S_r	Содержание	S_r
Al	2.98×10^{-2}	0.07	2.88×10^{-2}	0.05	2.98×10^{-2}	0.08
B	1.06×10^{-3}	0.10	1.16×10^{-3}	0.08		
Ba	5.1×10^{-4}	0.12	5.3×10^{-4}	0.10	4.9×10^{-4}	0.10
Be	$<1 \times 10^{-6}$	0.20	$<1 \times 10^{-7}$	0.15	$<1 \times 10^{-5}$	0.20
Bi	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	$<1 \times 10^{-7}$	0.20	$<1 \times 10^{-5}$	0.20
Ca	0.780	0.02	0.775	0.02	0.789	0.02
Cd	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	$<1 \times 10^{-7}$	0.20	$<1 \times 10^{-5}$	0.20
Co	5×10^{-5}	0.17	5.8×10^{-5}	0.10	5×10^{-5}	0.18
Cr	2.7×10^{-4}	0.12	2.5×10^{-4}	0.06	2.9×10^{-4}	0.15
Cu	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	4×10^{-6}	0.20	5×10^{-6}	0.18
Fe	3.69×10^{-2}	0.06	3.60×10^{-2}	0.06	3.52×10^{-2}	0.06
K	0.198	0.02	0.202	0.02	0.19	0.05
Mg	7.65×10^{-2}	0.05	7.48×10^{-2}	0.04	7.75×10^{-2}	0.07
Mn	9.35×10^{-3}	0.08	9.25×10^{-3}	0.07	9.39×10^{-3}	0.08
Mo	3.2×10^{-4}	0.12	3.6×10^{-4}	0.09	3.0×10^{-4}	0.15
Na	1.70×10^{-2}	0.05	1.60×10^{-2}	0.04	1.77×10^{-2}	0.08
Ni	1.6×10^{-4}	0.12	1.5×10^{-4}	0.09	2.0×10^{-4}	0.13
Pb	7.4×10^{-5}	0.18	7.0×10^{-5}	0.09	6.5×10^{-5}	0.18
Sb	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	$<1 \times 10^{-6}$	0.20	$<1 \times 10^{-4}$	0.20
Se	2.41×10^{-4}	0.10	2.49×10^{-4}	0.05	2.3×10^{-4}	0.10
Si	3.5×10^{-4}	0.20	3.3×10^{-4}	0.12		
Sn	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	$<1 \times 10^{-6}$	0.20	$<1 \times 10^{-4}$	0.20
Sr	1.42×10^{-2}	0.10	1.32×10^{-2}	0.06	1.40×10^{-2}	0.10
Ti	9.4×10^{-3}	0.09	9.2×10^{-3}	0.06	9.4×10^{-3}	0.09
V	$<1 \times 10^{-5}$	0.20	$<1 \times 10^{-6}$	0.20	$<1 \times 10^{-2}$	0.20
W	5.5×10^{-4}	0.20	5.5×10^{-4}	0.12		
Zn	2.6×10^{-2}	0.10	2.8×10^{-2}	0.06	2.9×10^{-2}	0.10
Zr	1.72×10^{-3}	0.10	1.63×10^{-3}	0.08	1.79×10^{-3}	0.15

Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Zn можно выполнять от 10^{-5} до $n\%$, но имеются ограничения в чувствительности определения Ti, V, W (от 10^{-2} до $n\%$). Метод АЭС–ИСП оптимален и доминирует при определении содержаний указанных элементов от 10^{-5} до $n \times 10\%$. Разрабо-

танные новые методики определения элементов выгодно отличаются от ранее предложенных экспрессностью, возможностью одновременно определять большой набор элементов в широком интервале концентраций от 1×10^{-6} до $n \times 10\%$ в различных продуктах растительного происхожде-

Таблица 3. Результаты проверки правильности АЭС–ИСП–определения селена в различных частях растений с использованием метода “введено–найдено” ($n = 10$, $P = 0.95$)

Сорт растения	Способ выращивания	Часть растения	Содержание Se, мг/кг (сухой образец)			
			исходное растение	введено Se, мг/кг	исходное растение + добавка	S_r
Топинсолнечник “Малыш”	без обработки селеном	стебли	<0.1	0.10	0.12	0.18
		листья	<0.1	0.10	0.15	0.18
		плоды	<0.1	0.10	0.14	0.18
		корни	<0.1	0.10	0.11	0.18
	после обработки селеном	стебли	0.40	0.50	0.95	0.10
		листья	1.45	1.50	3.01	0.06
		плоды	0.50	0.50	0.92	0.07
		корни	<0.1	0.10	0.11	0.18
Топинамбур “скороспелка”	без обработки селеном	стебли	0.12	0.10	0.21	0.16
		листья	0.75	0.75	1.46	0.09
		плоды	0.56	0.50	1.08	0.10
		корни	0.10	0.10	0.22	0.17
	после обработки селеном	стебли	0.90	0.90	1.95	0.08
		листья	3.60	3.50	7.06	0.05
		плоды	0.98	0.95	1.90	0.07
		корни	0.62	0.60	1.25	0.10

ния с хорошими метрологическими характеристиками. Относительное стандартное отклонение составляет 0.05–0.005 при содержании элементов от 1 до 20% и не превышает 0.10 при содержании элементов от 0.001 до 0.1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод лазерной абляции подходит для изготовления устойчивых во времени водных растворов наноразмерного селена. Данный материал пригоден для изготовления биологически активных препаратов и может быть использован для обогащения наноселеном сырья функциональных продуктов питания.

Использование АЭС–ИСП– и ААС–методов анализа с взаимодополняющими аналитическими возможностями и математическими моделями учета матричного влияния, в сочетании с оптимизированными способами пробоподготовки в автоклавах с микроволновым воздействием, обеспечило проведение контроля содержания селена и минерального состава сырья функцио-

нальных продуктов питания: матричных элементов (Ca, K, Na, Mg, Al, Si, Fe), сопутствующих микроэлементов (Ag, B, Ba, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Sr, Zn) и токсичных элементов (As, Be, Bi, Cd, Cr, Li, Pb, Sb, Sn, Ti, V, W) в широком интервале концентраций от 1×10^{-6} до $n \times 10\%$ без отделения матрицы и без использования сертифицированных твердых стандартных образцов. Новые методики аналитического контроля обеспечили исследования по получению и изучению стабильных водных растворов наноразмерного селена, разработке эффективных методов введения получаемых растворов наноселена в растительное сырье; по созданию принципиально нового способа обогащения сырья функциональных продуктов питания наноразмерным селеном.

Данная работа выполнена по государственному заданию № 075-00746-21-00”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фолманис Г.Э., Федотов М.А. Диспергационные методы получения коллоидного селена для сель-

- ского хозяйства / Под редакцией С.Г. Бочвара. М.: Юстицинформ, 2020. 96 с.
2. *Тананаев И.Г., Ролдугин В.И., Фолманис Г.Э. и др.* // Докл. АН. 2015. Т. 463. № 3. С. 304.
 3. *Казилин Е.Е., Ролдугин В.И., Фолманис Г.Э. и др.* // Перспективные материалы. 2016. № 8. С. 31.
 4. *Фолманис Г.Э., Коваленко Л.В., Федотов М.А.* // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции “Перспективы и технологии развития в области технических наук”, г. Нижний Новгород, 2017. С. 30–32.
 5. *Roldugin V.I., Fedotov M.A., Folmanis G.E. et al.* // Doklady Physical Chemistry. 2015. V. 463. I. 1. P. 161.
 6. *Лазарев А.И., Харламов И.П., Яковлев П.Я.* Справочник химика аналитика. М.: Metallurgiya, 1976. С. 121–125.
 7. *Андреева Н.А., Волченкова В.А., Казенас Е.К. и др.* // Сборник трудов Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет. 2018.
 8. *Thompson M.P. and Walsh J.N.* Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry. New York: Blackie, 1989. 316 p.
 9. *Folmanis G.E., Fedotov M.A., Golubkina N.A., Soldatenko A.V.* // Nanotechnologies in Russia. 2019. V. 13. № 9–10. P. 516.
 10. *Ковалёв В.Н., Коваленко Л.В., Иванов Л.И. и др.* // Перспективные материалы. 2008. № 2. С. 54–56.