

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 544.032.65

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ МЕТОДОМ МАТРИЧНО- И ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДЕСОРБЦИИ/ИОНИЗАЦИИ В ОБРАЗЦАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТВОРОВ СТАННАТА НАТРИЯ И ХЛОРИДА ОЛОВА(II)

© 2023 г. Д. О. Сухоруков^{а, *}, И. С. Пыцкий^а, А. К. Буряк^а, А. И. Ревельский^б, И. А. Ревельский^б

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии
и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
Ленинский проспект, 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет,
Ленинские горы, 1, стр. 3, Москва, 119992 Россия

*e-mail: suhorukov1010@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 10.05.2023 г.

Целью работы являлось исследование состава кластерных ионов в образцах, содержащих станнат натрия и хлорид олова(II). Показано, что на состав масс-спектров влияют такие параметры как энергия лазерного излучения и содержание вещества в изучаемой пробе. Проведена оптимизация условий приготовления образцов и регистрации масс-спектров по этим параметрам. Проведена предположительная идентификация пиков в зарегистрированных масс-спектрах. Показано, что многие из наблюдаемых в масс-спектрах пиков ионов могут соответствовать кластерам, содержащим в своем составе олово. В масс-спектрах станната натрия обнаружены ионы общего состава $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{Na}_z\text{H}_m$, в которых число атомов олова достигает 8, а максимальное отношение массы иона к заряду (m/z) – 1100. В масс-спектрах хлорида олова(II) присутствуют ионы общего состава $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{H}_m\text{Cl}_p$ и Sn_xCl_p , где число атомов олова достигает 4, а наибольшее значение m/z – 1000.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация, олово, станнат натрия, хлорид олова(II), раствор, кластер, кластерный ион, матрица, лазер

DOI: 10.31857/S0044185623700766, EDN: GHYFAZ

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию кластеров сильно возрос в связи с бурным развитием нанотехнологий [1–4]. Развитие науки о кластерах привело к возникновению ряда важных для практического приложения направлений исследований, таких как изучение влияния кластеров на свойства поверхности, инициирование химических реакций, получение новых материалов [3, 5, 6]. Особый интерес к кластерам связан с размерными эффектами, поскольку кластеры представляют собой промежуточное звено между отдельными элементарными частицами (атомами и молекулами) и объемной жидкостью или твердым телом. Свойства кластеров отличаются как от свойств отдельных составляющих их частиц, так и от свойств объемного вещества. Можно ожидать, что изучение структуры позволит установить верхнюю границу числа атомов в кластере, при котором начинают проявляться физические свойства объемного вещества. Однако в большинстве случаев значе-

ние граничного числа атомов является весьма условным, поскольку различные свойства жидкости или твердого тела начинают проявляться при разном их числе в кластере. Методы исследования кластеров и полученные результаты подробно освещены в ряде монографий и обзорной литературе [1, 5–7]. Среди таких методов на первом месте находятся спектроскопические методы, в первую очередь инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния [8]. Далее следует масс-спектрометрия [9–12]. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и оже-электронная спектроскопия используются для исследования кластеров на поверхности [13]. Для изучения тонких пленок, образованных наночастицами, применяют дифракционные методы [14].

Развитие десорбционных методов ионизации в масс-спектрометрии началось около 40 лет назад [15]. Одной из разновидностей такого рода ионизации стал метод MALDI. Также возможен

метод активирования ионизации поверхностью, который носит название поверхностно-активированной лазерной десорбции/ионизации (SALDI). Впервые возможность применения матрицы для подавления фрагментации при анализе нелетучих органических соединений была показана в 1987 г. [16], метод получил название матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации (MALDI). В настоящее время идет активное развитие метода для использования его при анализе пептидов, белков, нуклеиновых кислот, фуллеренов. Идет исследование механизмов процесса, создание модельных представлений об ионизации в методе MALDI и SALDI [17].

Преимуществом масс-спектрометрии является возможность определять массу кластера и изотопное распределение в нем. Одним из ограничений, характерным для масс-спектрометрического метода при изучении кластеров, является низкая летучесть для кластеров больших размеров. Некоторые кластеры обладают невысокой устойчивостью и легко могут быть подвергнуты деструкции, например, при нагреве в процессе пробоподготовки. Метод матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации (MALDI) имеет ряд существенных преимуществ, благодаря которым возрастает возможность регистрации кластерных ионов. Среди них возможность “мягкой” ионизации, высокая чувствительность, широкий диапазон масс ионов, возможность работать с труднолетучими и термолабильными соединениями. Данный метод успешно применяется для изучения высокомолекулярных веществ [18–22]. Модификацией метода MALDI является метод SALDI, в котором используется активная поверхность, с которой происходит десорбция изучаемого соединения [22].

Имеются многочисленные данные об изучении металлических кластеров. Среди них есть сведения о формировании кластерных частиц в растворах, содержащих олово [23, 24]. Многие металлические кластеры обладают необычными физическими, химическими и электронными свойствами, отличными от свойств объемного материала. Одним из методов получения кластеров является воздействие лазерного излучения на соли металлов, поэтому интересными с точки зрения образования кластеров являются системы, образованные солями металлов.

Целью настоящей работы являлось изучение состава кластерных ионов в образцах, полученных из растворов станната натрия и хлорида олова(II), с использованием метода матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Работу проводили при использовании масс-спектрометра фирмы “Bruker” модели Daltonics Ultraflex MALDI-TOF. Матрично-активированная и поверхностно-активированная лазерная десорбционная ионизация исследуемых образцов производилась при помощи лазерного пучка с частотой импульса 50.0 Гц и размером фокуса 20 мкм (при этом размер пятна на мишени, на которое нанесен образец, около 3 мм в диаметре), полученного при помощи азотного УФ-лазера (рабочая длина волны $\lambda = 337$ нм). Максимальная энергия при одном выстреле указанного лазера — 110 мкДж, количество выстрелов — 50, частота — 20 Гц. Система позволяет варьировать энергию лазерного излучения в интервале 70–100% от максимального значения. Управление прибором осуществлялось при помощи программного обеспечения “FlexControl”.

В качестве объекта исследования были выбраны станнат натрия и хлорид олова(II). Выбор оловосодержащих солей определялся тем, что олово как металл в составе кластера делает возможным идентификацию кластерной частицы в масс-спектре по изотопному распределению.

При проведении эксперимента были использованы следующие реактивы: станнат натрия трехводный (х. ч.), хлорид олова(II) (х. ч.), 2-пропанол (о. с. ч.), матрицы для анализа методом MALDI (2,5-дигидроксibenзойная кислота и α -циано-4-гидроксикоричная кислота) марки “Peptide/protein matrix kit for MALDI-TOF MS”.

Нанесение изучаемых образцов производили на специальную мишень из алюминия с никелевым напылением, которую затем помещали в источник ионизации. Размер пятна на мишени, на которое нанесен образец, около 3 мм в диаметре. Образцы наносили в виде водных растворов станната натрия или хлорида олова(II) при помощи микрошприца на 10 мкл производства фирмы “Hamilton” (США). Объем пробы 2 мкл. Затем сразу наносили матрицу в виде раствора в 2-пропанол так, чтобы молярное соотношение аналит:матрица составляло 1 : 100. Образцы высушивали на воздухе в течение 10 мин.

Регистрировали масс-спектры как положительных, так и отрицательных ионов. Обработку полученных масс-спектров и идентификацию пиков в масс-спектрах проводили при помощи программного обеспечения FlexAnalysis, а также компьютерных программ, позволяющих по брутто-формуле рассчитать изотопное распределение для иона определенного состава. Затем сравнивали расчетное изотопное распределение с экспериментальным, наблюдаемым в изучаемом масс-спектре. В случае совпадения можно утверждать, что данная группа изотопных пиков соответствует иону такого состава (рис. 1). Насколько экспе-

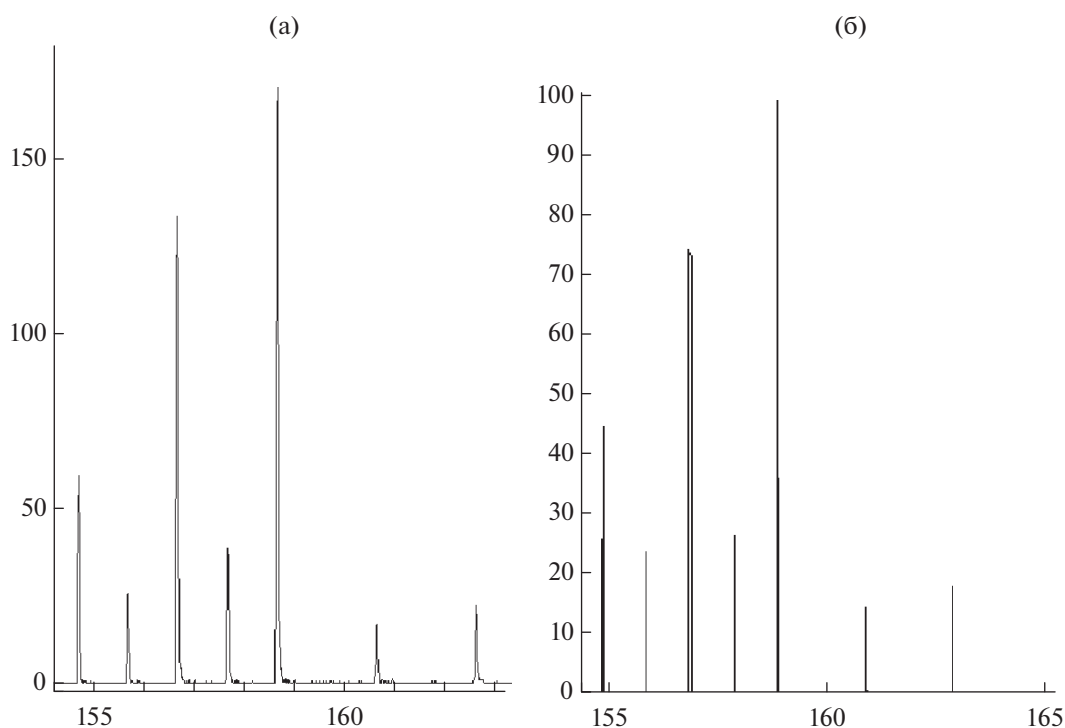


Рис. 1. Определение состава кластерного иона путем сравнения экспериментального изотопного распределения (а) с теоретическим (б) на примере кластерного иона предположительного состава NaSnO.

риментальное изотопное распределение соответствует теоретическому, оценивали, рассчитывая доверительный интервал для каждого пика в изотопном распределении и сравнивая его со значением, полученным при расчете на компьютере (табл. 1).

На интенсивность пика конкретного иона влияет участок в области распределения пробы на мишени, в которую направлен лазерный импульс. Для удовлетворительного результата (сходности масс-спектров одного и того же образца) необходимо производить несколько выстрелов на один и тот же образец.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При варьировании энергии лазерного излучения (рис. 2, табл. 2) было обнаружено, что вплоть до значения 95.2 мкДж (86.5% от максимальной) пики ионов в масс-спектрах образцов, полученных из насыщенного раствора станната натрия и смешанных с 2,5-дигидроксibenзойной кислотой, не появляются. При повышении энергии до 96.8 мкДж (88% от максимальной) появляются малоинтенсивные пики, соответствующие кластерным ионам, содержащим в своем составе олово. Интенсивность этих пиков не превышает 500 в относительных единицах (отн. ед.). Дальнейшее повышение энергии лазера приводит к

Таблица 1. Результаты расчета доверительных интервалов для пиков в изотопном распределении иона с $m/z = 158$

№ пика	Эксперимент (%)			Расчет по компьютерной программе (%)	$x_{\text{средн}} \pm \sigma$ (%)
1	46	32	39	45	39 ± 17
2	19	15	19	24	18 ± 9
3	74	79	64	74	72 ± 16
4	25	23	21	26	23 ± 5
5	100	100	100	100	—
6	10	8	10	14	9 ± 4
7	13	13	19	18	15 ± 9

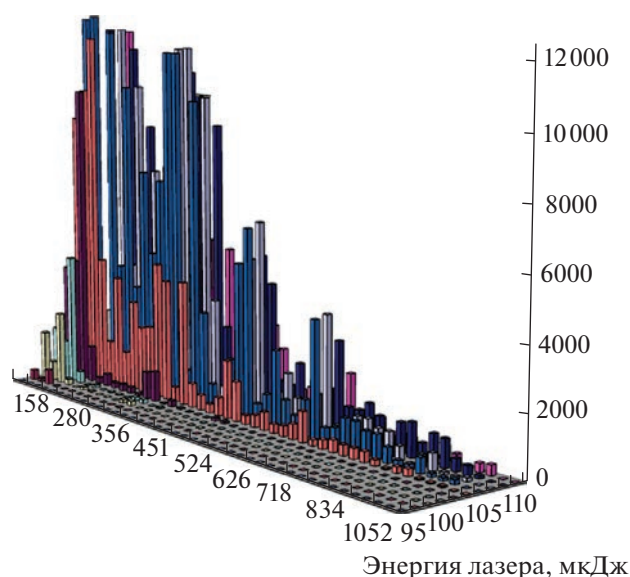


Рис. 2. Зависимость интенсивности пиков различных ионов в масс-спектрах от энергии лазера на примере масс-спектров станната натрия.

появлению новых пиков в масс-спектре станната натрия, а также к увеличению интенсивности уже зарегистрированных пиков. Так, при энергии лазера 98.5 мкДж (89.5% от максимальной) интенсивность пиков достигает 2000 отн. ед., при 100.1 мкДж (91% от максимальной) – 4000 отн. ед., при 101.8 мкДж (92.5% от максимальной) – 10000 отн. ед., при 103.4 мкДж (94% от максимальной) – 11500 отн. ед. (рис. 2, табл. 2). С ростом энергии лазера относительная интенсив-

ность пиков с одними и теми же m/z сохраняется, а абсолютная интенсивность пиков возрастает.

При дальнейшем увеличении энергии лазера до 105.1 мкДж (95.5% от максимальной) интенсивность некоторых пиков возрастает настолько, что выходит за линейный диапазон прибора, поэтому такие масс-спектры не пригодны для идентификации пиков предполагаемых кластерных ионов. Таким образом, при изучении масс-спектров матричной лазерной десорбционной ионизации станната натрия, как показало наше исследование, оптимальное значение энергии лазера (рис. 2, 3; табл. 2), при котором необходимо проводить регистрацию масс-спектров, находится около значения 103 мкДж (94% от максимальной возможной энергии лазера).

Изучены образцы, полученные из насыщенного раствора станната натрия с концентрацией 0.25 г л^{-1} , а также из растворов, полученных разбавлением насыщенного раствора в десять и в сто раз. Таким образом, содержание вещества в анализируемой пробе составило 5×10^{-7} , 5×10^{-8} и $5 \times 10^{-9} \text{ г}$ соответственно.

При изучении масс-спектров, полученных после нанесения на мишень образцов станната натрия с различным содержанием вещества, обнаружено, что при содержании станната натрия в ячейке мишени 5×10^{-9} и $5 \times 10^{-8} \text{ г}$, в масс-спектрах присутствуют всего несколько малоинтенсивных пиков ионов (при $m/z = 158, 198, 220$). При увеличении содержания станната натрия в образце до $5 \times 10^{-7} \text{ г}$ происходит резкое возрастание уже существующих пиков и появление боль-

Таблица 2. Влияние энергии лазера на интенсивность и количество пиков в масс-спектрах

Энергия лазера (в % от максимальной)	Энергия лазера (мкДж)	Максимальная интенсивность пика в масс-спектре (отн. ед.)					Наибольшее значение m/z , для которого наблюдаются различные пики (соотношение сигнал/шум $> 2/1$)
		158	198	220	356	642	
86.5	95.2	—	—	—	—	—	—
88	96.8	320	110	500	10	—	370
89.5	98.5	1600	650	2400	120	—	504
91	100.1	1700	2300	4300	130	—	524
92.5	101.8	3800	4100	10000	900	—	642
94	103.4	9000	10000	11800	4500	1000	1200
95.5	105.1	12400	12500	> 12500 (выходит за линейный диапазон прибора)	11500	3800	986
97	106.7	> 12500	> 12500	> 12500	11600	3900	986
98.5	108.4	12000	> 12500	> 12500	10800	3000	986
100	110	7400	11950	> 12500	7000	1900	986

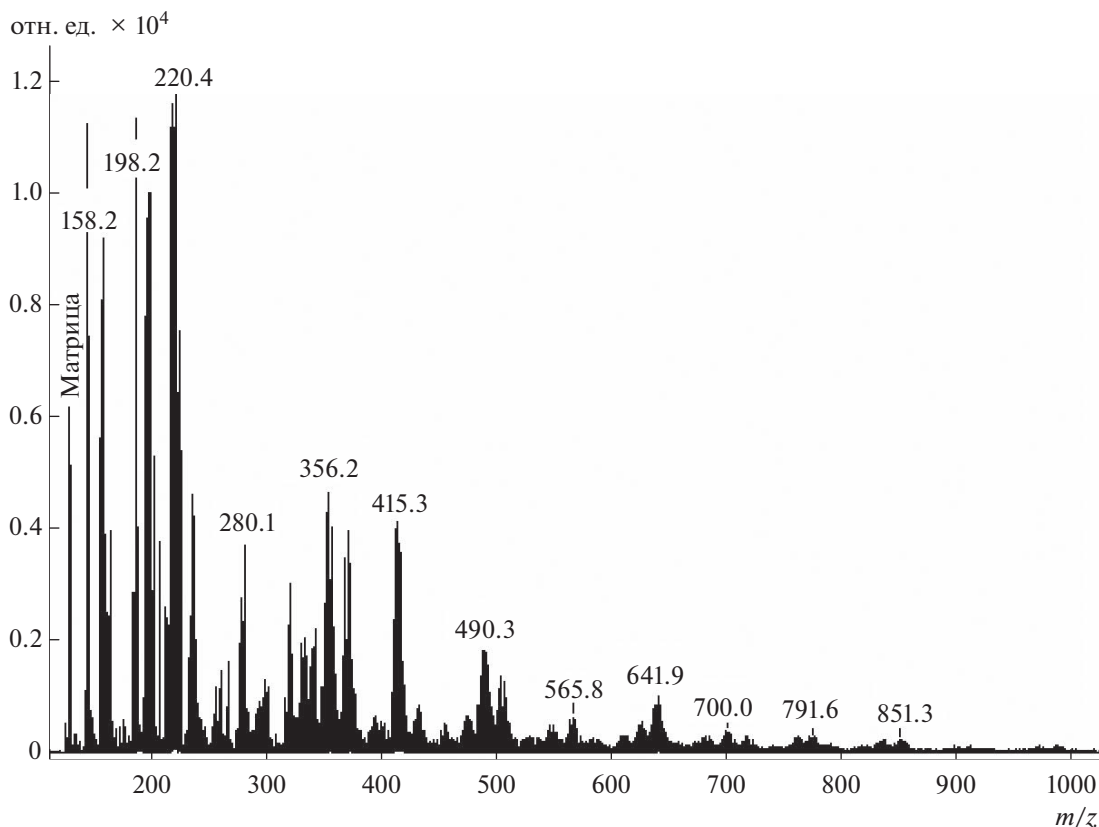


Рис. 3. Масс-спектр положительных ионов станната натрия, полученный при смешении насыщенного раствора станната натрия с 2,5-дигидроксibenзойной кислотой и последующем упаривании. Энергия лазера 103.4 мкДж (94% от максимальной).

шого количества новых, вплоть до m/z 1000. Поэтому в дальнейшем мы работали только с насыщенным раствором станната натрия, который дает содержание станната натрия на мишени 5×10^{-7} г. При этом на каждый кластер приходится примерно 3×10^{-9} г, т.е. чувствительность достигает приблизительно 10^{-12} моль.

Характерный масс-спектр положительных ионов образцов, полученных из растворов станната натрия, приведен на рис. 3. На основании данного масс-спектра можно говорить о существовании различных ионов, содержащих в своем составе олово. В результате идентификации пиков на основе изотопного распределения по указанному выше алгоритму сделаны выводы о составе ионов, наблюдаемых в этих масс-спектрах. Показано, что в этих смесях присутствует около 40 различных кластерных ионов общего состава $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{Na}_z\text{H}_m$, в которых число атомов олова достигает 7–8, а максимальное отношение массы иона к заряду (m/z) – 1100. Результаты расшифровки этого и подобных ему масс-спектров приведены в табл. 3.

Масс-спектр отрицательных ионов для аналогичных образцов приведен на рис. 4. Для него также проведена идентификация зарегистрированных пиков, результаты которой представлены в табл. 4.

Масс-спектры образцов, полученных из насыщенного раствора хлорида олова(II), изучали в тех же условиях, что и растворы станната натрия.

В масс-спектре положительных ионов, полученном для образца хлорида олова(II), можно наблюдать около 50 групп изотопных пиков, предположительно соответствующих кластерным ионам, содержащим в своем составе олово (рис. 5). Некоторые из этих пиков были идентифицированы. Предположительно, они могут быть описаны общими формулами $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{H}_m\text{Cl}_p$ и Sn_xCl_p , где число атомов олова в ионах, которым соответствуют наиболее интенсивные пики, составляет от 1 до 4 атомов (табл. 5).

В масс-спектрах отрицательных ионов того же образца обнаружено около 30 пиков ионов, содержащих в своем составе олово, имеющих предположительно кластерную природу. Для них также подобран состав, дающий изотопное распре-

Таблица 3. Положительные ионы в масс-спектре станната натрия и их предполагаемый состав

№ пика	m/z	Предполагаемый состав иона	№ пика	m/z	Предполагаемый состав иона
1	158	NaSnO	21	524	NaSn ₃ O ₉ H ₅
2	198	Na ₂ SnO ₂	22	543	NaSn ₃ O ₁₀ H ₆
3	220	Na ₃ SnO ₂	23	566	Na ₂ Sn ₃ O ₁₀ H ₆
4	236	Na ₃ SnO ₃	24	582	Na ₃ Sn ₃ O ₉ H ₃
5	260	Na ₃ SnO ₄ H	25	612	Na ₂ Sn ₄ O ₅
6	280	Na ₄ SnO ₄	26	626	Sn ₄ O ₉ H ₂
7	298	Na ₄ SnO ₅	27	642	Sn ₄ O ₁₀ H ₄
8	321	Na ₅ SnO ₅	28	660	Sn ₄ O ₁₁ H ₆
9	334	Sn ₂ O ₆ H ₆	29	680	NaSn ₄ O ₁₁ H ₅
10	344	Na ₆ SnO ₅	30	700	NaSn ₄ O ₁₂ H ₇
11	356	Sn ₂ O ₇ H ₆	31	718	Na ₂ Sn ₄ O ₁₂ H ₆
12	370	NaSn ₂ O ₇ H ₅	32	760	Sn ₅ O ₁₀
13	394	Na ₃ Sn ₂ O ₅	33	776	Sn ₅ O ₁₁ H ₂
14	415	Na ₄ Sn ₂ O ₅	34	792	Sn ₅ O ₁₂ H ₄
15	434	Na ₄ Sn ₂ O ₆ H	35	812	Sn ₆ O ₆ H ₂
16	451	Na ₅ Sn ₂ O ₆	36	834	NaSn ₆ O ₆ H
17	464	Sn ₃ O ₆ H ₆	37	851	Na ₂ Sn ₆ O ₆
18	478	Na ₂ Sn ₃ O ₄ H ₆	38	912	Na ₃ Sn ₆ O ₈ H ₃
19	490	Sn ₃ O ₈ H ₄	39	972	Na ₂ Sn ₇ O ₆
20	504	Sn ₃ O ₉ H ₆	40	986	NaSn ₇ O ₈ H ₃

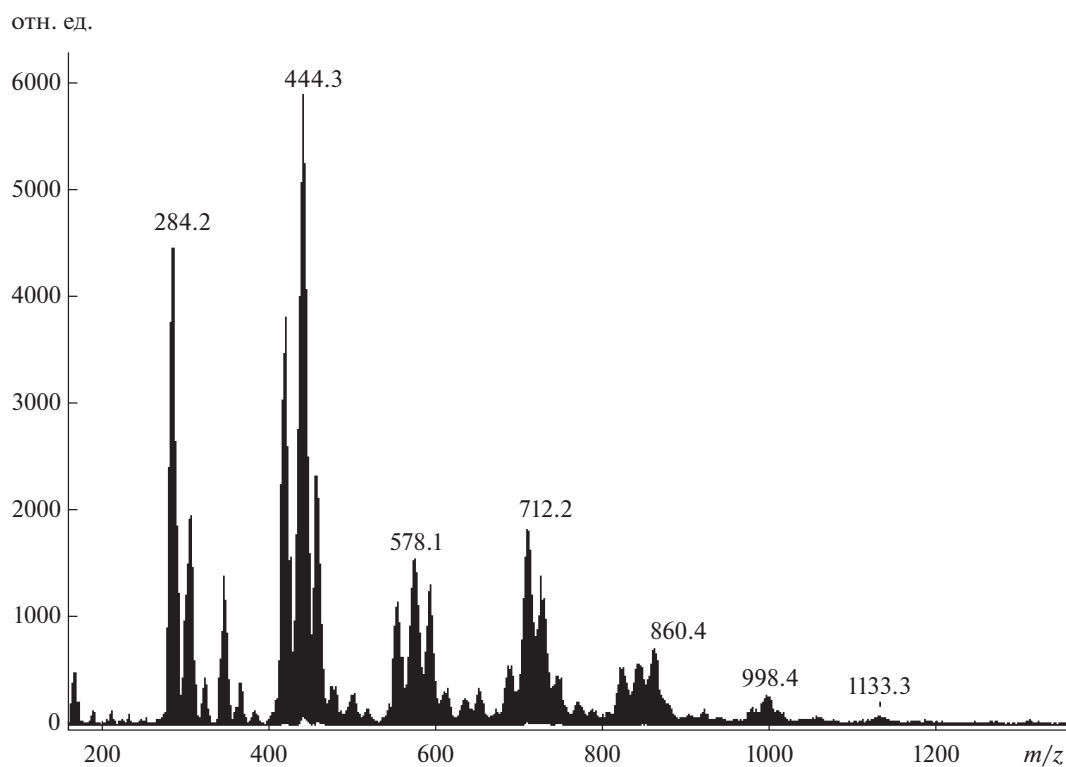
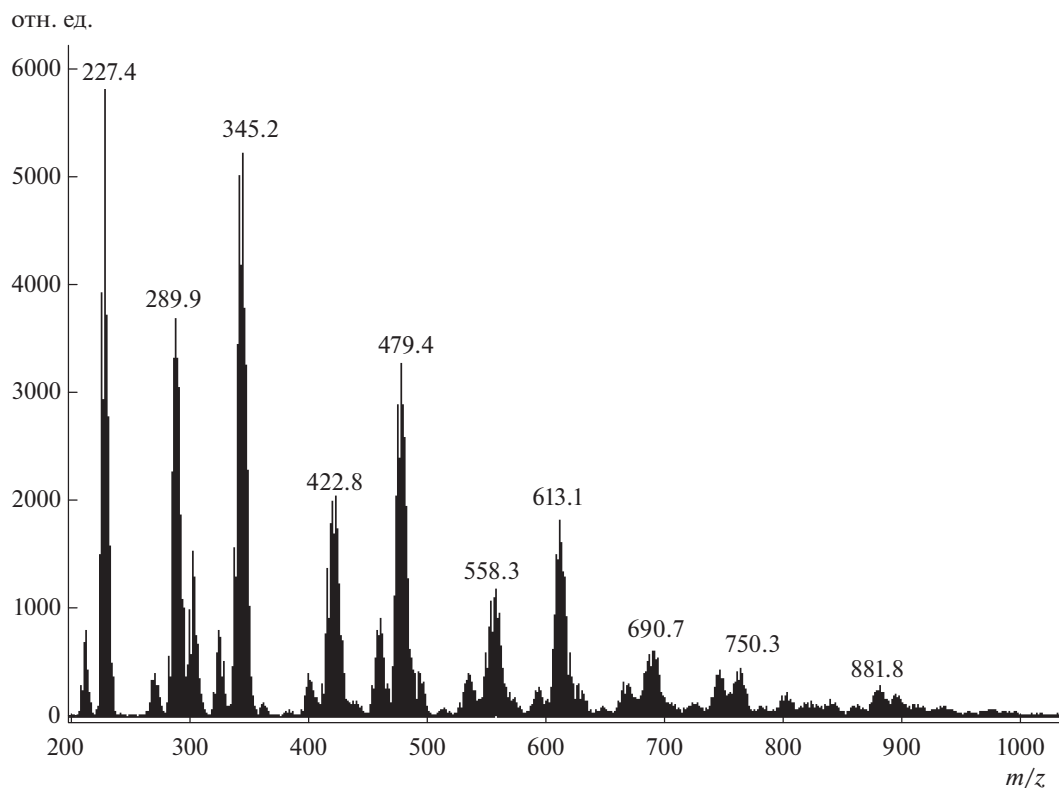
**Рис. 4.** Масс-спектр отрицательных ионов станната натрия, полученный при смешении насыщенного раствора станната натрия с 2,5-дигидроксibenзойной кислотой и последующем упаривании.

Таблица 4. Отрицательные ионы в масс-спектре станната натрия и их предполагаемый состав

№ пика	m/z	Предполагаемый состав иона	№ пика	m/z	Предполагаемый состав иона
1	152	SnO_2	23	620	$\text{Sn}_4\text{O}_9\text{H}_2$
2	168	SnO_3H_2	24	638	$\text{Sn}_4\text{O}_{10}\text{H}_4$
3	192	SnO_4H_4	25	658	Sn_5O_4
4	210	SnO_5H_4	26	694	$\text{Sn}_5\text{O}_6\text{H}_4$
5	226	SnO_6H_6	27	712	$\text{Sn}_5\text{O}_7\text{H}_6$
6	235	SnO_7H_6	28	730	$\text{Sn}_5\text{O}_8\text{H}_{10}$
7	256	$\text{Sn}_2\text{O}_2\text{H}_2$	29	750	Sn_5O_{10}
8	284	$\text{Sn}_2\text{O}_3\text{H}_2$	30	772	$\text{Sn}_5\text{O}_{11}\text{H}_2$
9	308	$\text{Sn}_2\text{O}_4\text{H}_2$	31	791	$\text{Sn}_5\text{O}_{12}\text{H}_4$
10	326	$\text{Na}_2\text{Sn}_2\text{O}_3$	32	828	$\text{Sn}_6\text{O}_7\text{H}_4$
11	352	$\text{Sn}_2\text{O}_7\text{H}_6$	33	848	$\text{NaSn}_6\text{O}_7\text{H}$
12	368	$\text{Na}_2\text{Sn}_2\text{O}_5$	34	872	Sn_6O_{10}
13	386	$\text{Na}_2\text{Sn}_2\text{O}_6\text{H}_4$	35	881	$\text{Sn}_6\text{O}_{10}\text{H}_8$
14	422	$\text{Sn}_3\text{O}_4\text{H}_2$	36	906	$\text{Sn}_6\text{O}_{12}\text{H}_2$
15	444	$\text{NaSn}_3\text{O}_4\text{H}$	37	925	$\text{Sn}_6\text{O}_{13}\text{H}_4$
16	464	$\text{NaSn}_3\text{O}_5\text{H}$	38	944	$\text{Sn}_6\text{O}_{14}\text{H}_6$
17	482	$\text{NaSn}_3\text{O}_6\text{H}$	39	981	$\text{NaSn}_7\text{O}_8\text{H}$
18	508	$\text{NaSn}_3\text{O}_8\text{H}$	40	1000	$\text{Sn}_7\text{O}_{10}\text{H}_6$
19	520	$\text{NaSn}_3\text{O}_9\text{H}_5$	41	1016	$\text{NaSn}_7\text{O}_{10}\text{H}_7$
20	556	Sn_4O_5	42	1060	$\text{Na}_3\text{Sn}_7\text{O}_{10}\text{H}$
21	578	$\text{Sn}_4\text{O}_6\text{H}_6$	43	1133	$\text{Sn}_8\text{O}_{11}\text{H}_8$
22	598	$\text{Sn}_4\text{O}_7\text{H}_6$	44	1181	$\text{Na}_3\text{Sn}_8\text{O}_{10}\text{H}$

**Рис. 5.** Масс-спектр положительных ионов хлорида олова(II), полученный при смешении насыщенного раствора хлорида олова(II) с 2,5-дигидроксibenзойной кислотой и последующем упаривании.

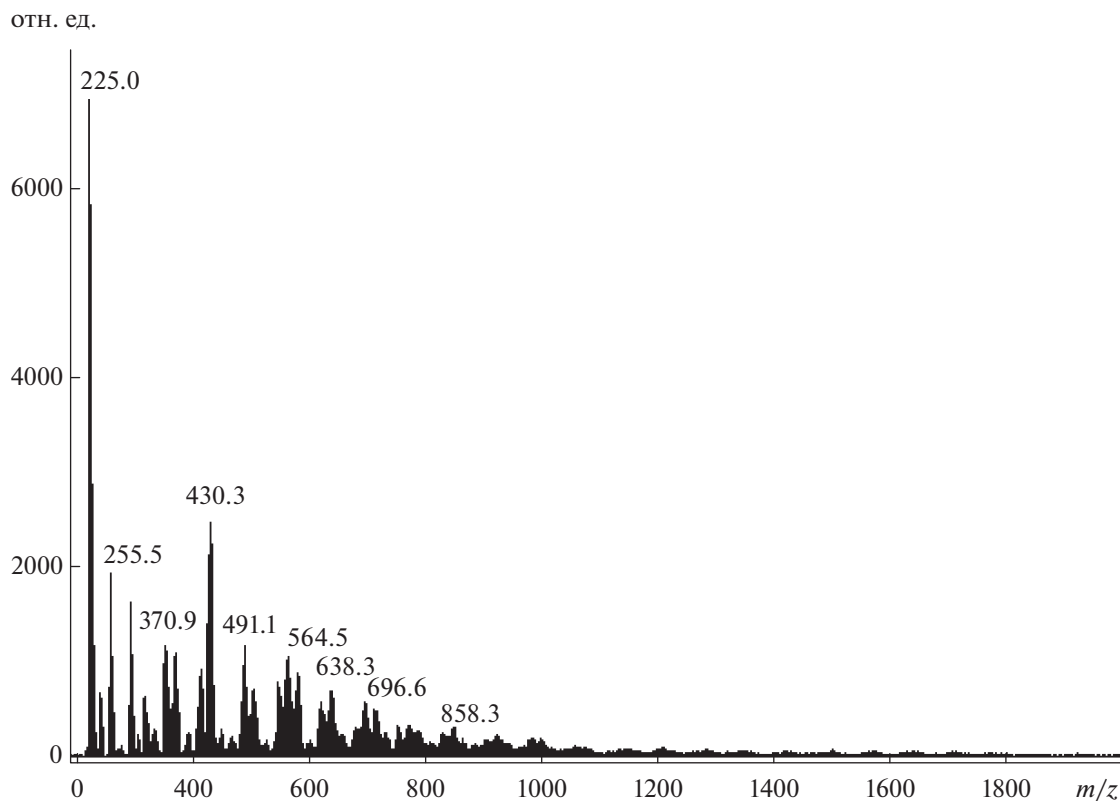


Рис. 6. Масс-спектр отрицательных ионов хлорида олова(II), полученный при смешении насыщенного раствора хлорида олова(II) с 2,5-дигидроксibenзойной кислотой и последующем упаривании.

Таблица 5. Положительные ионы в масс-спектре хлорида олова(II) и их предполагаемый состав

m/z	Предполагаемый состав иона
155	SnCl^+
210	SnOCl^+
227	SnCl_3^+
290	$\text{SnO}_4\text{HCl}_3^+$
345	$\text{Sn}_2\text{O}_5\text{HCl}$
423	$\text{Sn}_2\text{O}_7\text{H}_4\text{Cl}_2$
479	$\text{Sn}_2\text{O}_7\text{Cl}_4\text{H}_2$
558	$\text{Sn}_3\text{O}_8\text{Cl}_2\text{H}_2$
613	$\text{Sn}_3\text{O}_9\text{H}_3\text{Cl}_3$
691	$\text{Sn}_4\text{O}_{11}\text{H}_5\text{Cl}$
750	$\text{Sn}_4\text{O}_{11}\text{H}_3\text{Cl}_2$

деление, совпадающее с экспериментальным. Состав этих ионов также соответствует общим формулам $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{H}_m\text{Cl}_p$ и Sn_xCl_y , где количество атомов олова достигает 4. Характерный масс-спектр отрицательных ионов для хлорида олова(II) представлен на рис. 6. Возможный состав ионов — в табл. 6.

Таблица 6. Отрицательные ионы в масс-спектре хлорида олова(II) и их предполагаемый состав

m/z	Предполагаемый состав иона	m/z	Предполагаемый состав иона
225	SnCl_3^-	548	$\text{Sn}_3\text{O}_9\text{H}_4\text{Cl}^-$
298	SnCl_5^-	565	$\text{Sn}_3\text{O}_8\text{H}_2\text{Cl}^-$
323	$\text{Sn}_2\text{O}_3\text{Cl}^-$	581	$\text{Sn}_3\text{O}_8\text{Cl}_3^-$
355	$\text{Sn}_2\text{O}_5\text{Cl}^-$	623	$\text{Sn}_3\text{O}_8\text{Cl}_4^-$
371	$\text{Sn}_2\text{O}_4\text{Cl}_2^-$	638	$\text{Sn}_4\text{O}_8\text{Cl}^-$
430	$\text{Sn}_3\text{O}_2\text{Cl}^-$	659	$\text{Sn}_4\text{O}_9\text{Cl}^-$
491	$\text{Sn}_3\text{O}_6\text{Cl}^-$	697	$\text{Sn}_4\text{O}_{10}\text{HCl}_2^-$
507	$\text{Sn}_3\text{O}_7\text{Cl}^-$	716	$\text{Sn}_4\text{O}_{11}\text{H}_3\text{Cl}_2^-$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения работы было выявлено, что энергия лазерного излучения влияет на состав масс-спектров MALDI станната натрия и хлорида олова(II). Также было установлено различие в качественном составе масс-спектров при различном содержании аналита в пробе. Была проведена оптимизация условий регистрации масс-спектров для изучения состава кластерных ионов. В ходе изучения образцов, полученных из растворов станната натрия и хлорида олова(II), в масс-спектрах было обнаружено несколько десятков пиков, предположительно соответствующих кластерам, содержащим в своем составе олово. Предложены брутто-формулы ионов для соответствующих пиков в масс-спектрах. Сделан вывод о существовании в образцах, содержащих станнат натрия, положительных и отрицательных кластерных ионов общего состава $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{Na}_z\text{H}_m$, в которых содержание олова достигает 8 атомов, а отношение массы иона к заряду (m/z) — 1100. В образцах, содержащих хлорид олова(II), также были обнаружены пики ионов, содержащих олово, на основании идентификации которых можно говорить о существовании положительных и отрицательных ионов общего состава $\text{Sn}_x\text{O}_y\text{H}_m\text{Cl}_p$ и Sn_xCl_y , в которых содержание олова достигает 4 атомов, а m/z — 1000. Пики ионов с более высокими молекулярными массами также присутствуют в масс-спектрах, но в силу низкой интенсивности их идентификация осложнена.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайтсайде Дж., Эйглер Д., Андерс Р. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований. М.: Мир, 2002. 292 с.
2. Макаров Г.Н. // Усп. физ. наук. 2008. Т. 178. № 4. С. 337–376.
3. Макаров Г.Н. // Усп. физ. наук. 2006. Т. 176. № 2. С. 121–174.
4. Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.
5. Смирнов Б.М. // Усп. физ. наук. 2000. Т. 170. № 5. С. 495–534.
6. Castleman A.W., Jr., Bowen K.H., Jr. // J. Phys. Chem. 1996. V. 100. № 31. P. 12911–12944.
7. Luo Z., Khanna S.N. Metal Clusters and Their Reactivity. Berlin: Springer, 2020. 281 p.
8. Bosnick K.A., Haslett T.L., Fedrigo S. et al. // J. Chem. Phys. 1999. V. 111. № 19. P. 8867–8870.
9. Sakurai M., Watanabe K., Sumiyama K., Suzuki K. // J. Chem. Phys. 1999. V. 111. № 1. P. 235–238.
10. Пыцкий И.С., Кузнецова Е.С., Буряк А.К. // Коллоидный журн. 2018. Т. 80. № 4. С. 445–457.
11. Xia P., Hall M., Furlani T.R., Garvey J.F. // J. Phys. Chem. 1996. V. 100. № 30. P. 12235–12240.
12. Bréchnac C., Cahuzas Ph., Concina B. et al. // Chem. Phys. Lett. 2001. V. 335. № 1–2. P. 34–42.
13. O'Shea J.N., Schnadt J., Andersson S. et al. // J. Chem. Phys. 2000. V. 113. № 20. P. 9233–9238.
14. Briffa S.M., Lynch I., Hapiuk D., Valsami-Jones E. // Environmental pollution. 2019. V. 252. P. 974–981.
15. Macfarlane R.D., Torgerson D.F. // Science. 1976. V. 191. Issue 4230. P. 920–925.
16. Karas M., Bachmann D., Bahr U., Hillenkamp F. // Int. J. Mass Spectrom. Ion. Proc. 1987. V. 78. P. 53–68.
17. Lin H.Y., Dyakov Y.A., Lee Y.T., Ni C.K. // J. American Society for Mass Spectrometry. 2020. V. 32. № 1. P. 95–105.
18. Suddaby K.G., Hunt K.H., Haddleton D.M. // Macromolecules. 1996. V. 29. № 27. P. 8642–8649.
19. Kriwacki R.W., Wu J., Siuzdak G., Wright P.E. // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. № 22. P. 5320–5321.
20. Trhlíková O., Janata M., Walterová Z. et al. // Talanta. 2019. V. 195. P. 215–220.
21. Cancilla M.T., Penn S.G., Carroll J.A., Lebrilla C.B. // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. № 28. P. 6736–6745.
22. Sunner J., Dratz E., Chen Y.-C. // Analyt. Chem. 1995. V. 67. № 23. P. 4335–4342.
23. Donaldson J.D., Grimes S.M., Johnston S.R., Abrahams I. // J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1995. Issue 13. P. 2273–2276.
24. Peters B., Lichtenberger N., Dornsiepen E., Dehnen S. // Chemical Science. 2020. V. 11. № 1. P. 16–26.