

УДК 544.7:544.22:544.08:544.032

Применение метода лазерной десорбционной масс-спектрометрии для исследования поверхности композитных материалов

И.В. Миненкова, Е.С. Кузнецова и И.С. Пыцкий*

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

*E-mail: ivanpic4586@gmail.com

Аннотация

Работа посвящена анализу материалов на основе модельного адаптивного композита разного состава. Продемонстрированы возможности масс-спектрометрии с визуализацией с целью исследования поверхности материалов, включая боковые срезы. Построены двумерные диаграммы распределения ионов по исследуемым поверхностям. Разработанная методика позволила обнаружить как органические, так и неорганические компоненты модельных композитов. Представленная методика визуализации масс-спектрометрических данных с лазерной десорбцией/ионизацией позволяет анализировать поверхность композитных материалов, оценивать степень воздействия агрессивной среды на них и получать важную информацию о структуре поверхности и распределении соединений по глубине на всю толщину образца, что демонстрирует уникальность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: лазерная десорбция/ионизация, масс-спектрометрия, двумерные диаграммы распределения, кластеры.

Поступила в редакцию 21.11.2025 г. После доработки 24.11.2025 г.; Принята к публикации 24.11.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-4-94-110](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-4-94-110)

Введение

Масс-спектрометрия является одним из востребованных методов исследования в современной науке [1]. Предметом исследования масс-спектрометрии могут быть самые разнообразные объекты практически из любой сферы деятельности человека [2]. Следует отметить, что при изучении современных публикаций в области естественных наук, более половины из них в какой-то мере связаны с масс-спектрометрией [3–5]. Особое место занимают методы масс-спектрометрии

поверхности – лазерная десорбция/ионизация (ЛДИ) и матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация (МАЛДИ).

В наших предыдущих работах [6–9] методы ЛДИ и МАЛДИ были использованы для идентификации конкретных ингибиторов как непосредственно на поверхности, так и после пробоподготовки, связанной с переносом вещества с поверхности на стандартную плашку. В работе [8] описано применение ЛДИ-масс-спектрометрии для обнаружения м-нитробензойной и 3,5-динитробензойной кислот и их солей непосредственно на поверхности конструкционных материалов, используемых в ракетной технике в качестве отмывочных реагентов топливных баков после контакта с компонентами топлива. Анализируемые вещества смываются ацетонитрилом с исследуемой поверхности, затем анализируются методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с ионизацией электрораспылением и параллельно методом ЛДИ. Для ионизации электрораспылением предел обнаружения составил 6 мкг/л, а для ионизации ЛДИ – 2 мкг/л.

Разработанная методика [10] исследования поверхностей материалов может быть применена для образцов различной природы. Применение этого метода стало возможным после доработки стандартной плашки масс-спектрометра. В такой плашке сделаны углубления, позволяющие закреплять на её поверхности фрагменты любых материалов размером до 2 см по обоим направлениям и толщиной до 6 мм. Применение доработанной плашки позволяет проводить исследования металлических сплавов непосредственно с поверхности. Показано [11], что ионизация в данном случае имеет некоторые особенности по сравнению с работой на стандартной поверхности плашки. На основе статистически обобщенных данных сделаны выводы о точности определения значений m/z , разрешающей способности, эффективности ионизации и искажении распределения изотопов при исследовании окисленных поверхностей. Продемонстрировано, что полученные результаты могут быть использованы для получения представления о химической природе и морфологии исследуемых поверхностей и, в частности, для построения диаграмм распределения анализируемых соединений по поверхностям. Однако при работе с металлическими материалами возможно накопление заряда на поверхности при многочисленном повторении эксперимента и, как следствие, сдвиг шкалы масс с появлением систематической ошибки. Проблема может быть решена использованием проводящего закрепляющего материала или конструированием заземления непосредственно на используемой плашке. Прямое исследование образцов без смывания также позволяет провести визуализацию масс-спектров, построив двумерные диаграммы распределения вещества по поверхности [12].

Последующее развитие масс-спектрометрической визуализации позволило применять метод для количественной оценки содержания веществ на поверхности. Авторами [13] продемонстрирована возможность анализа количества хлора на поверхности нержавеющей стали, и описан способ получения воспроизводимых

результатов путем измерения или устранения физико-химических особенностей поверхностной ионизации калибра, кристаллизующегося из раствора. Установлено, что основным фактором, влияющим на качество калибровки и анализа, является форма полученной капли и ее размер. Показано, что интегрирование аналитического сигнала по всей капле является наиболее подходящим методом калибровки и получения наиболее воспроизводимых результатов. Представлены основные факторы, влияющие на физико-химические характеристики ионизации и, как следствие, на воспроизводимость калибровочных данных. Метод калибровки с интегрированием сигнала по капле может быть эффективно использован при анализе сверхмалых количеств хлора на поверхности нержавеющей стали в диапазоне от 0.12 до 120 пмоль/мм². В этом случае предлагаемый подход устраниет физико-химические факторы, влияющие на эффективность ионизации, которые ограничивают использование поверхностной ЛДИ для количественного анализа.

Таким образом, возможно применение ряда масс-спектрометрических методик исследования поверхностей различной природы, направленных на обнаружение продуктов коррозии, токсичных соединений, оценки качества обработки и отмычки материалов и прогнозирования сроков эксплуатации материалов. Из литературных данных видно, что метод ЛДИ имеет большие перспективы и может быть использован в исследованиях, связанных с изучением свойств поверхностей, изменений её морфологии в различных условиях.

В настоящей работе описана методика анализа композитных материалов, полученных различными способами, и показаны возможности ЛДИ-масс-спектрометрии с визуализацией поверхности при изучении состава материалов для установления качества покрытия и глубины проникновения веществ в основной слой материала.

Методика эксперимента

Объекты исследования – образцы модельного адаптивного композита (МАК). Исходные образцы: грунтовочное покрытие, содержащее металлический наполнитель из цинка (МАК1); грунтовочное покрытие, содержащее металлический наполнитель из цинка и микрокапсулированный ингибитор (МАК2). Также были исследованы образцы МАК после воздействия агрессивной среды – экспозиция в 3% водном растворе хлорида натрия при 60°C в течение 850 ч. Образцы исходные МАК1.О и МАК2.О после экспозиции – МАК1.Н и МАК2.Н, соответственно.

Исследование проводилось на трех сторонах каждого образца: верхняя, нижняя сторона и срез (боковая сторона) (например, МАК1.ОА – верхняя (матовая) сторона, МАК1.ОВ – нижняя (глянцевая) сторона, МАК1.ОС – боковой срез).

В работе использовали масс-спектрометр Bruker Ultraflex II (Bruker, Германия). Образцы закрепляли на специальной доработанной плашке с углублениями, затем загружали ее в масс-спектрометр и вакуумировали до 10⁻⁹ атм. Ионизацию

осуществляли азотным лазером с рабочей длиной волны 337 нм. Масс-спектры регистрировали в режиме положительных и отрицательных ионов. Параметры эксперимента при работе в режиме с положительными ионами: вытягивающее напряжение – 25 кВ, доускоряющее напряжение – 21 кВ, напряжение на ионных линзах – 10 кВ, напряжение на рефлекторе – 26 и 14 кВ; при работе в режиме с отрицательными ионами: вытягивающее напряжение – 20 кВ, доускоряющее напряжение – 17 кВ, напряжение на ионных линзах – 7 кВ, напряжение на рефлекторе – 21 и 11 кВ. Полученные данные обрабатывались с использованием программы Flex Control (Bruker, Германия). Масс-спектры получали в диапазоне масс 10–1500 Да. Визуализацию результатов проводили с помощью автоматического сбора масс-спектров путем сканирования исследуемой поверхности и их обработки с использованием собственного программного обеспечения (программы Generator и MALDI2D).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты исследования поверхности матовой стороны образца MAK1.OA представлены на Рисунке 1. Согласно полученным результатам в режиме регистрации отрицательных ионов (Рисунок 1а) наблюдается последовательность пиков с разницей 12 Да. Это свидетельствует о наличии в образце соединений органической природы. Ряд 36–48–…–156–168 Да соответствует углеродным кластерам C_3 – C_{14} . Обнаруженные пики со значениями m/z 197, 211, 227, 255 Да относятся к органическим соединениям, содержащим кислород. При регистрации положительных ионов (Рисунок 1б) выявлен наиболее интенсивный пик с $m/z=64$ Да, соответствующий катиону цинка, пик с $m/z=130$ Да соответствует кластерной частице Zn_2^+ .

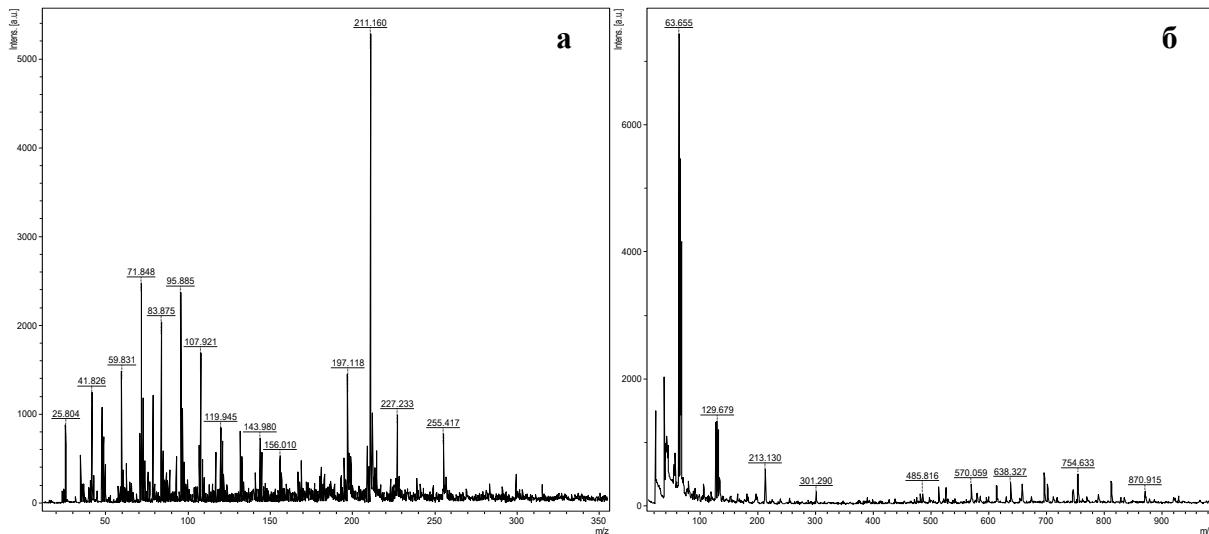


Рисунок 1. Масс-спектр образца MAK1.OA в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

Для обнаруженных частиц Zn^+ и Zn_2^{+} были построены двумерные диаграммы распределения по изучаемой поверхности (Рисунок 2). Полученные двумерные диаграммы показывают относительно равномерный характер распределения частиц цинка по поверхности, а также взаимосвязь иона Zn^+ с его димерным кластером.

Следует отметить, что на масс-спектре положительных ионов (Рисунок 1б) проявились два ряда пиков с разницей 44 и 58 Да. Значения m/z первого ряда 526–570–…–702–746 Да соответствуют гомологам полиэтиленгликоля с полимерным «звеном» 44 Да, а второго ряда 638–676–…–871 Да – гомологам политриметилен оксида со звеном 58 Да. Распределение по изучаемой поверхности первых представителей в гомологических рядах представлено на Рисунке 3.

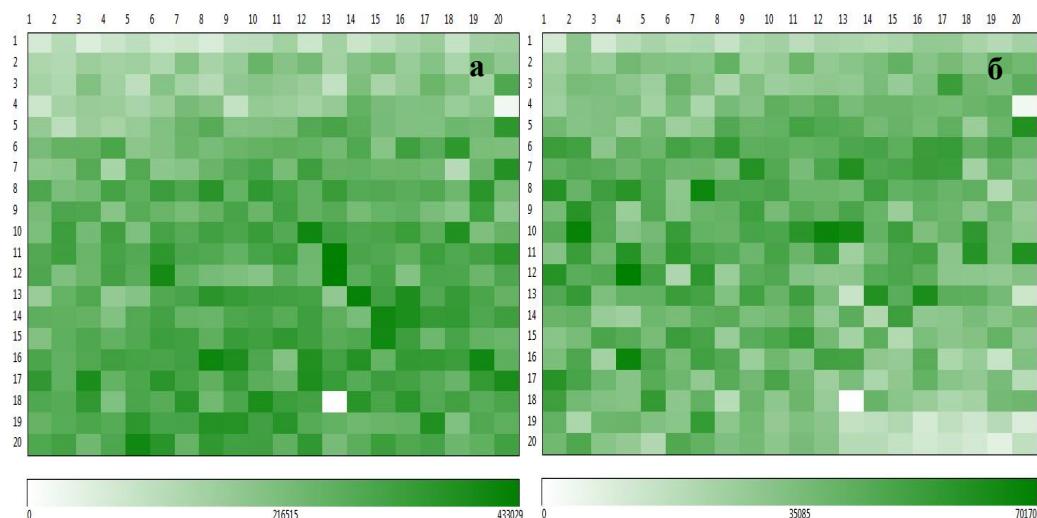


Рисунок 2. Двумерные диаграммы распределения по поверхности образца MAK1.OА ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а) и 131 Да (Zn_2^{+}) (б) в положительном режиме регистрации ионов. Шаг построения – 200 мкм.

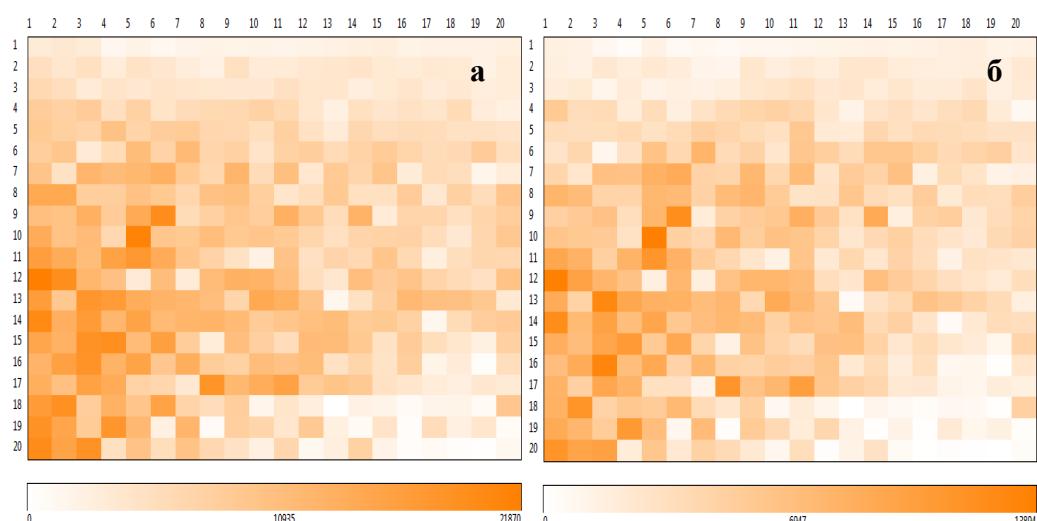


Рисунок 3. Двумерные диаграммы распределения по поверхности образца MAK1.OА ионов с m/z 526 Да (а) и 638 Да (б) в положительном режиме. Шаг построения – 200 мкм.

Для второй глянцевой стороны (В) образца MAK1 масс-спектры качественно не отличаются от соответствующих спектров для образца MAK1.OA: в масс-спектрах присутствуют пики кластеров углерода, гомологов органических соединений (169–183–…–211 Да) с разницей 14 Да, соответствующей CH_2- группе, катиона цинка и его димера (64 Да – Zn^+ , 130 Да – Zn_2^+).

Распределение катиона цинка и его димера по изучаемой поверхности приведено на Рисунке 4. Анализ полученных двумерных диаграмм показывает относительную равномерность распределения частиц цинка по изучаемой поверхности и тесную взаимосвязь между ионом Zn^+ и его димером. При этом интенсивность для иона димера значительно ниже, чем для катиона металла. Можно отметить, что на поверхности диаграмм есть четкие белые точки (квадраты), которые соответствуют микропорам и микроотверстиям на реальной поверхности образца MAK1.OB.

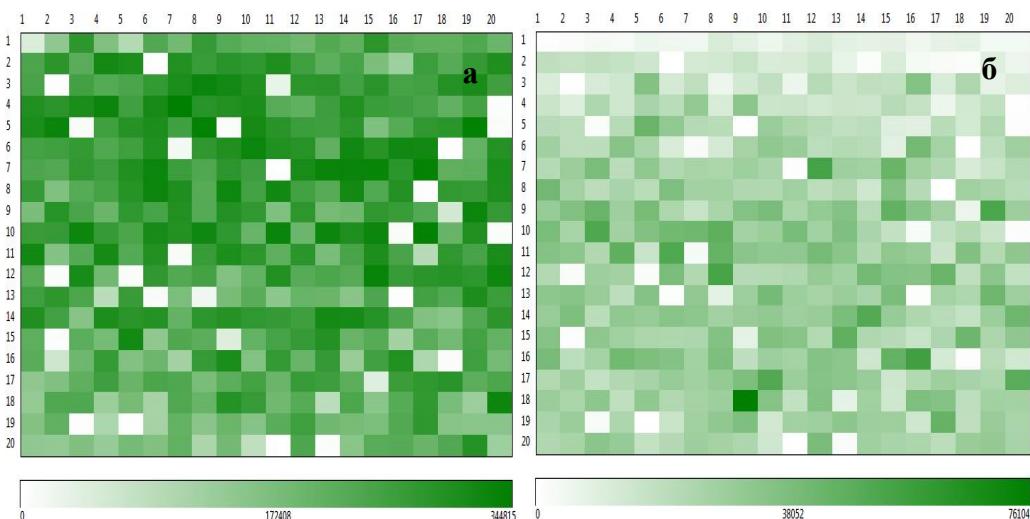


Рисунок 4. Двумерные диаграммы распределения по поверхности образца MAK1.OB ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а) и 130 Да (Zn_2^+) (б) в положительном режиме. Шаг построения – 200 мкм.

На масс-спектре положительных ионов (Рисунок 3б) проявилась группа пиков 214-302-390-478 Да с разницей между соседними пиками 88 Да, что соответствует удвоенному структурному звену полиэтиленгликоля. Интенсивность этих пиков относительно невелика. Для первого представителя этой группы была построена двумерная диаграмма распределения по поверхности (Рисунок 5). На этой диаграмме также присутствуют белые пятна, которые полностью совпадают с координатами идентичных пятен на предыдущих диаграммах образца MAK1.OB (Рисунок 4).

Наибольший интерес представляет третья – боковая сторона образца (МАК1.OC). Пики, проявившиеся на масс-спектре образца MAK1.OC, практически не отличаются от пиков для образцов MAK1.OA и MAK1.OB. Для образца MAK1.OC также были построены двумерные диаграммы для катионов цинка и его димера (Рисунок 6). Анализ полученных диаграмм показывает интенсивное и равномерное проникновение

катиона цинка во всю толщину образца MAK1. При этом со стороны матовой поверхности А наблюдается более низкое содержание металла.

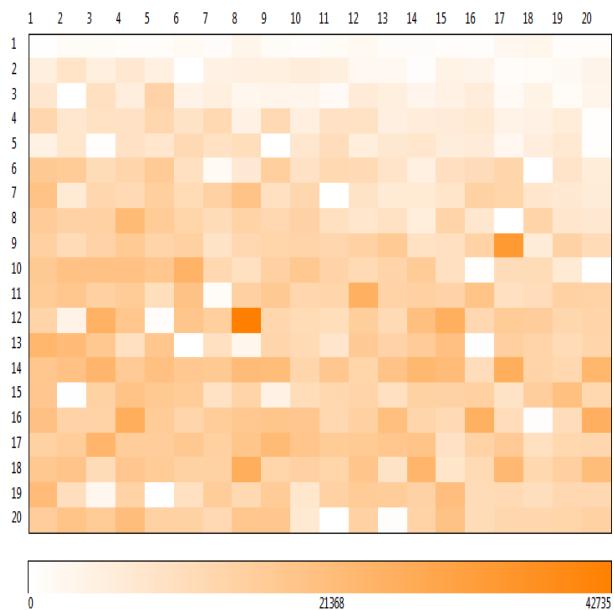


Рисунок 5. Двумерная диаграмма распределения по поверхности образца MAK1.ОВ иона с m/z 214 Да в положительном режиме. Шаг построения – 200 мкм.

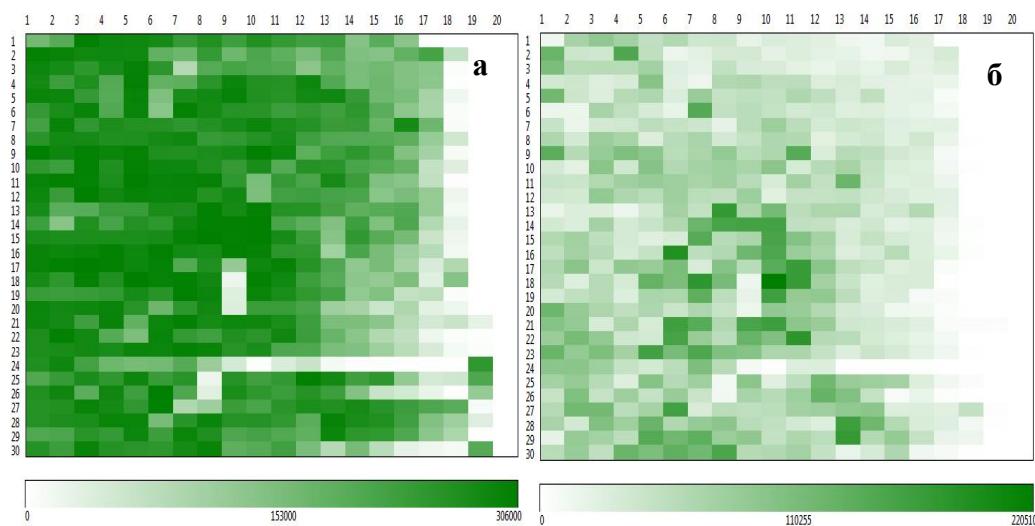


Рисунок 6. Двумерные диаграммы распределения по поверхности образца MAK1.ОС ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а) и 130 Да (Zn_2^+) (б) в положительном режиме. Шаг построения – 50 мкм, направление построения слева направо – от стороны ОВ к ОА.

Анализ полученных данных показал, что на трех исследованных поверхностях образца MAK1 присутствуют катион цинка и его димер, гомологи органических, кислородсодержащих соединений, возможно этиленгликоловых фрагментов. Металлический наполнитель образца распределен по поверхностям относительно равномерно, и наблюдается хорошее распределение по всей толщине образца.

Далее приведены результаты исследований поверхностей образца MAK1 после воздействия агрессивной среды. Рисунок 7 иллюстрирует масс-спектры, полученные с поверхности образца MAK1-2.NA. Большинство полученных пиков относятся или к примесям, или к низкомолекулярным органическим соединениям.

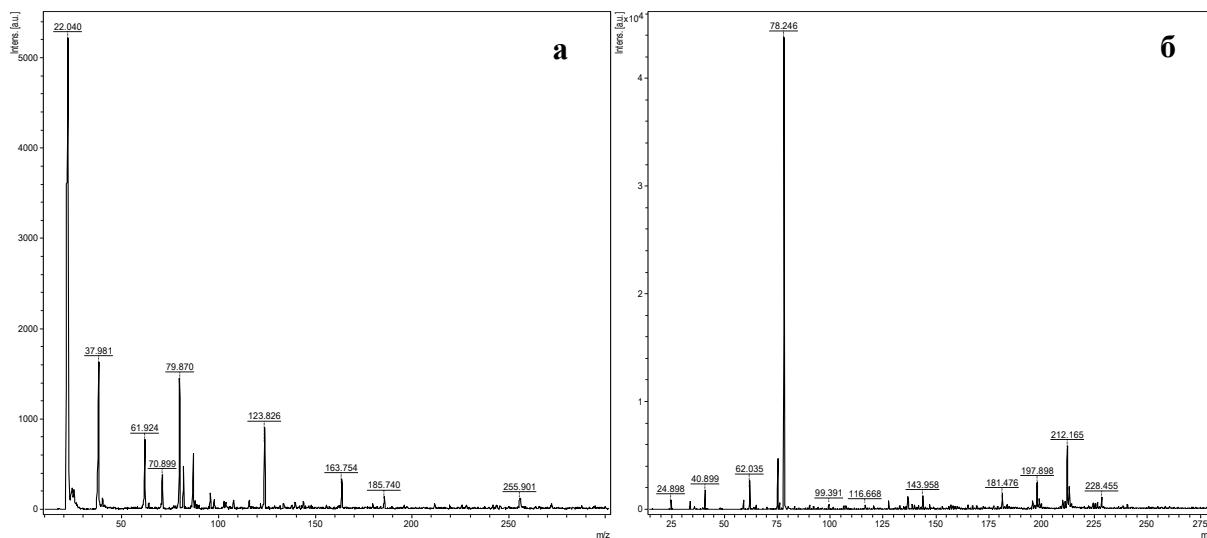


Рисунок 7. Масс-спектры образца MAK1-2.NA в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

Двумерная диаграмма распределения иона с m/z 64 Да (катион цинка) (Рисунок 8) показывает низкое и неравномерное присутствии частицы на поверхности, по сравнению с образцом MAK1.OA (Рисунок 2), не подвергавшемся воздействию раствора хлорида натрия.

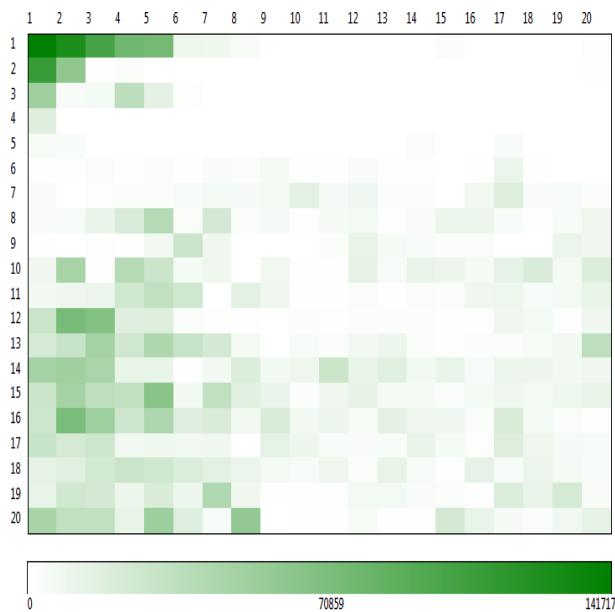


Рисунок 8. Двумерная диаграмма распределения по поверхности иона с $m/z = 64$ Да (Zn^+) для образца MAK1-2.NA в положительном режиме. Шаг построения – 200 мкм.

Для нижней стороны – образец MAK1-2.NB – на масс-спектре в положительном режиме регистрации получен интенсивный пик с m/z 64 Да, характерный для катиона цинка (Рисунок 9). Кроме того, на масс-спектре наблюдаются пики, относящиеся к катионам цинка с кислородом и натрием в различном соотношении: ZnO^+ (80 Да), Zn_2^+ (128 Да), Zn_2O^+ (146 Да), $[\text{ZnO}\cdot\text{Zn}_2\text{O}\cdot\text{Na}]^+$ (251 Да), $[\text{Zn}_2\text{O}\cdot\text{ZnO}_2\cdot\text{Na}]^+$ (268 Да). Для некоторых из перечисленных ионов построены двумерные диаграммы распределения (Рисунок 10). На изученном участке образца MAK1-2.NB катион цинка распределен неравномерно. На поверхности присутствуют очевидные участки с низким или полным отсутствием Zn^+ (Рисунки 10а, 10б). Распределение многокомпонентного катиона $[\text{ZnO}\cdot\text{Zn}_2\text{O}\cdot\text{Na}]^+$ (Рисунок 10в) по поверхности образца, в отличие от распределения монокомпонентных частиц Zn^+ и Zn_2^+ , характеризуется большей централизацией. В то же время распределение катиона натрия Na^+ , входящего в состав созданной агрессивной среды, отличается относительно интенсивным, равномерным распределением по поверхности (Рисунок 10г).

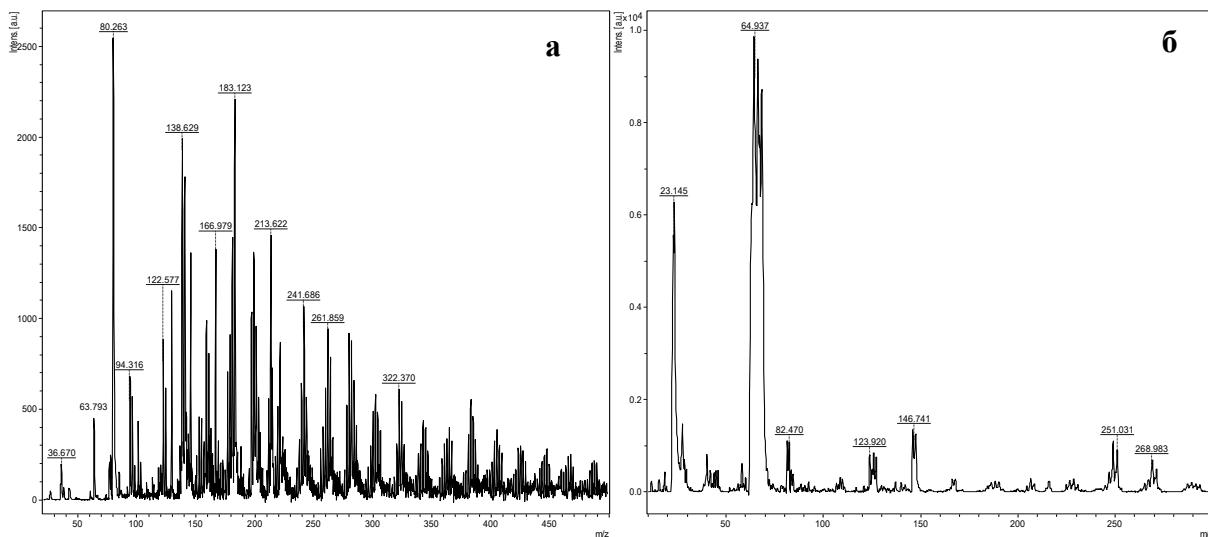


Рисунок 9. Масс-спектры образца MAK1-2.NB в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

Для боковой стороны образца MAK1-2.NC также получены масс-спектры (Рисунок 11). На масс-спектрах в отрицательном режиме регистрации ионов (Рисунок 11а) получены только пики с характерным для органических соединений распределением. Кроме того, между пиками сохраняется разница 14 Да, соответствующая CH_2 -группе. В масс-спектрах для положительных ионов (Рисунок 11б) основными являются пики с m/z 23, 64, 130 и 213 Да, которые соответствуют ионам Na^+ , Zn^+ , Zn_2^+ и органического соединения, соответственно. Для этих ионов построены двумерные диаграммы распределения (Рисунок 12). Анализ полученных диаграмм распределения показал, что интенсивность катиона цинка уменьшается при переходе от поверхности А к поверхности В (Рисунок 12а). Для иона Na^+ наблюдается аналогичное изменение интенсивности. В случае с органическим

соединением, его интенсивность относительно мала и в большей степени сосредоточена у поверхности В (Рисунок 12г).

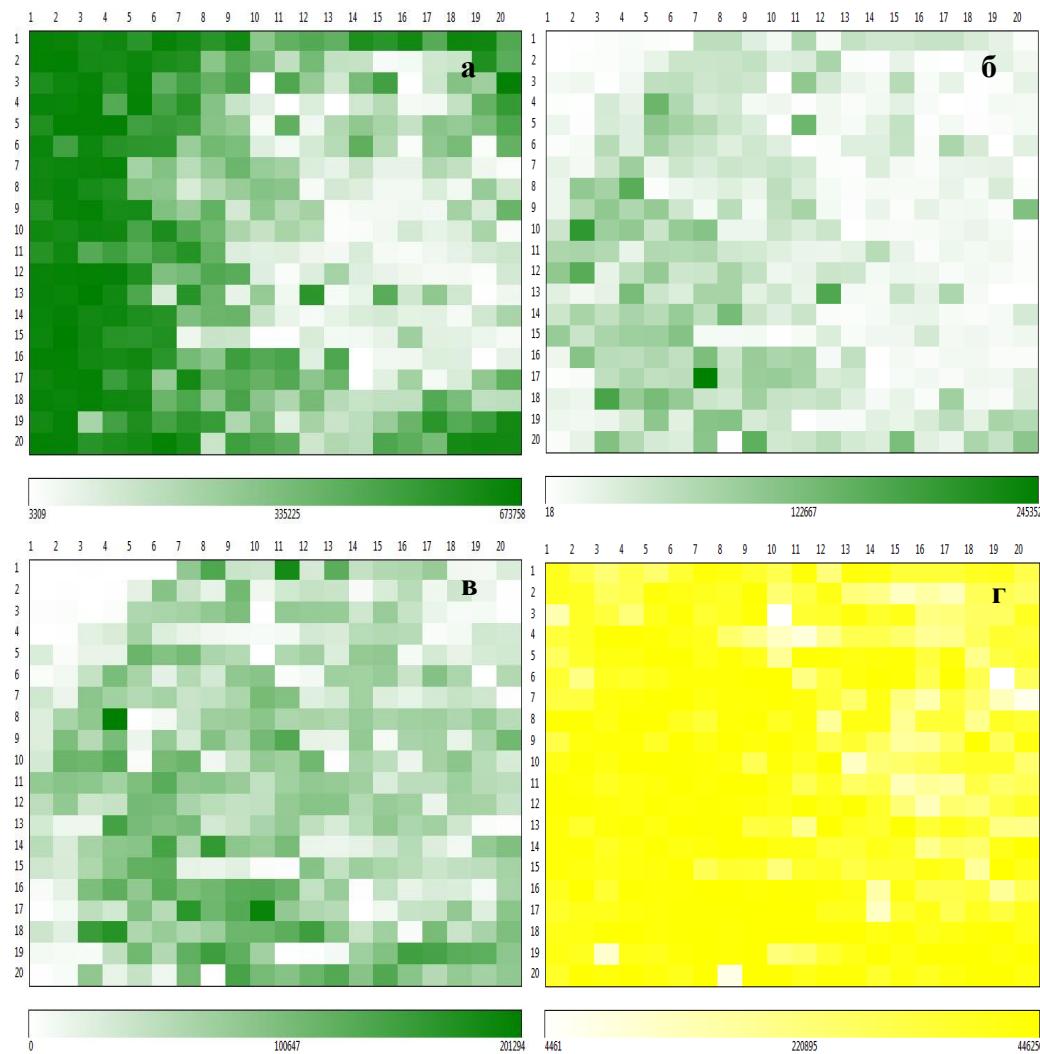


Рисунок 10. Двумерные диаграммы распределения по поверхности ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а), 128 Да (Zn_2^+) (б), 251 Да ($[\text{ZnO}\cdot\text{Zn}_2\text{O}\cdot\text{Na}]^+$) (в) и 23 Да (Na^+) (г) для образца MAK1-2.NB в положительном режиме. Шаг построения – 200 мкм.

Далее представлены результаты масс-спектрометрического исследования поверхностей образца с металлическим наполнителем и микрокапсулированным ингибитором MAK2. Масс-спектры для матовой стороны А оказались неинформативными, значимых пиков не было зафиксировано. Для глянцевой стороны В масс-спектры также получились мало информативными: зафиксированы только пики, характерные для кластеров углерода.

Относительно информативные масс-спектры были получены с поверхности боковой стороны С образца MAK2 (Рисунок 13). На масс-спектре отрицательных ионов (Рисунок 13а) зафиксирована группа гомологичных органических соединений,

а для положительных ионов (Рисунок 13б) получены катион цинка и его димер. Аналогичные результаты наблюдались и для образца MAK1.

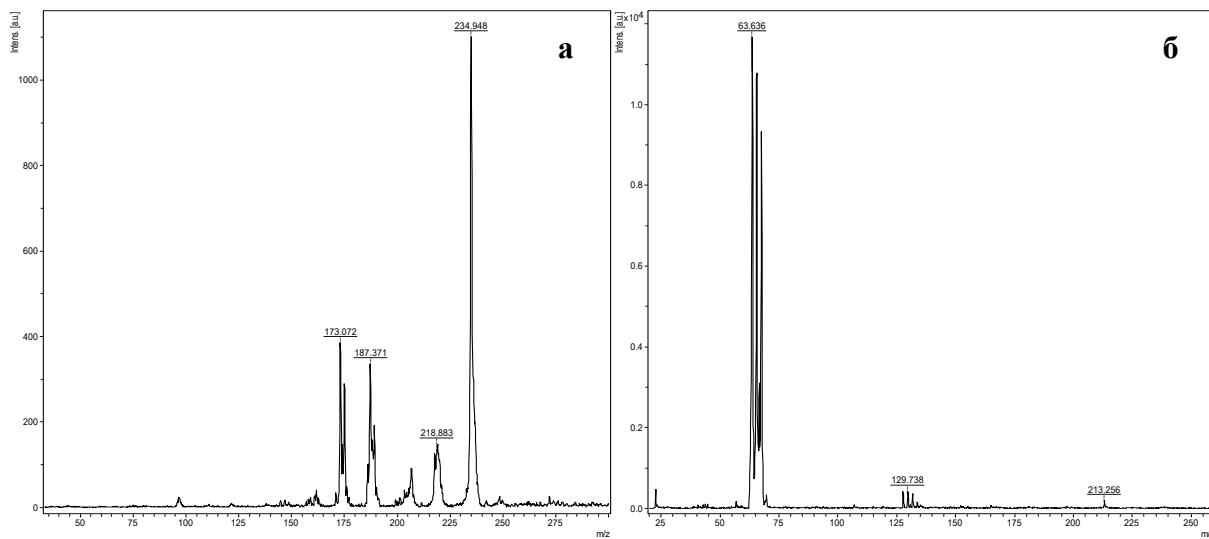


Рисунок 11. Масс-спектры образца MAK1-2.NC в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

Рисунок 14 иллюстрирует степень и характер проникновения металлического катиона цинка. Согласно полученным двумерным диаграммам распределения частиц по поверхности, металлический наполнитель наиболее интенсивно представлен с глянцевой стороны В. При этом глубина проникновения составляет примерно половину толщины слоя образца.

На Рисунке 15 представлены масс-спектры, полученные для образца MAK2 после воздействия агрессивной среды. Масс-спектры для образцов после воздействия агрессивной среды мало отличаются от соответствующих результатов для исходных образцов: масс-спектры мало информативны, большинство пиков относятся к соединениям органической природы. Следует отметить, что после обработки хлоридом натрия на поверхности одной из сторон проявился ряд пиков 640–698–...–874–932 Да (Рисунок 15г) характерный для полимерных соединений с разницей 58 Да.

Масс-спектры для боковой стороны образца после экспозиции в растворе хлорида натрия представлены на Рисунке 16. Масс-спектр в отрицательном режиме (Рисунок 16а) содержит пики характерные примесям и органическим соединениям, а в положительном режиме (Рисунок 16б) – пики, характерные для катионов цинка и его димера.

Двумерные диаграммы распределения катионов цинка и его димера представлены на Рисунке 17. Полученные двумерные диаграммы характеризуются относительно равномерным плотным распределением Zn^{+} , которое находится примерно на одинаковом расстоянии от внешних сторон образца.

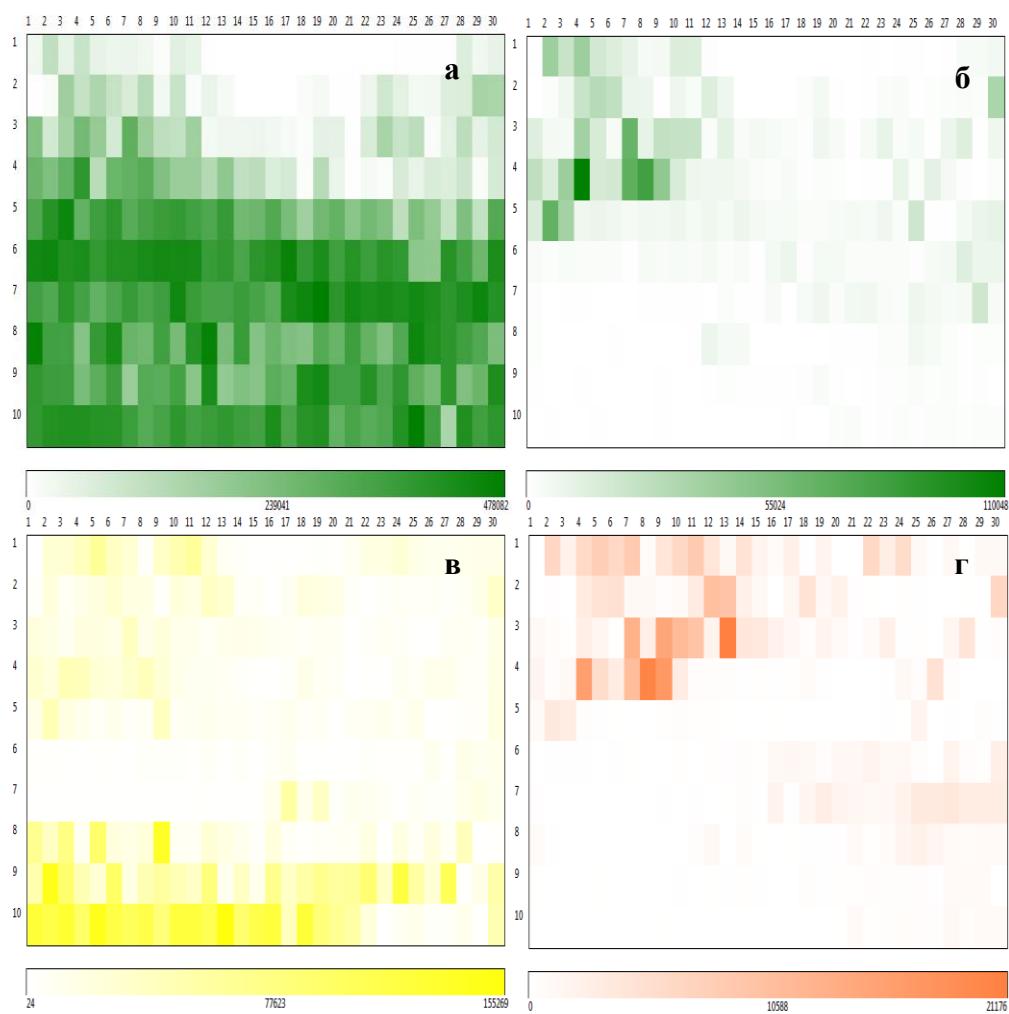


Рисунок 12. Двумерные диаграммы распределения по поверхности ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а), 130 Да (Zn_2^+) (б), 23 Да (Na^+) (в) и 213 Да (органическое соединение) для образца МАК-2.НС в положительном режиме. Шаг построения – 100 мкм, направление построения сверху вниз – от стороны NB к НА.

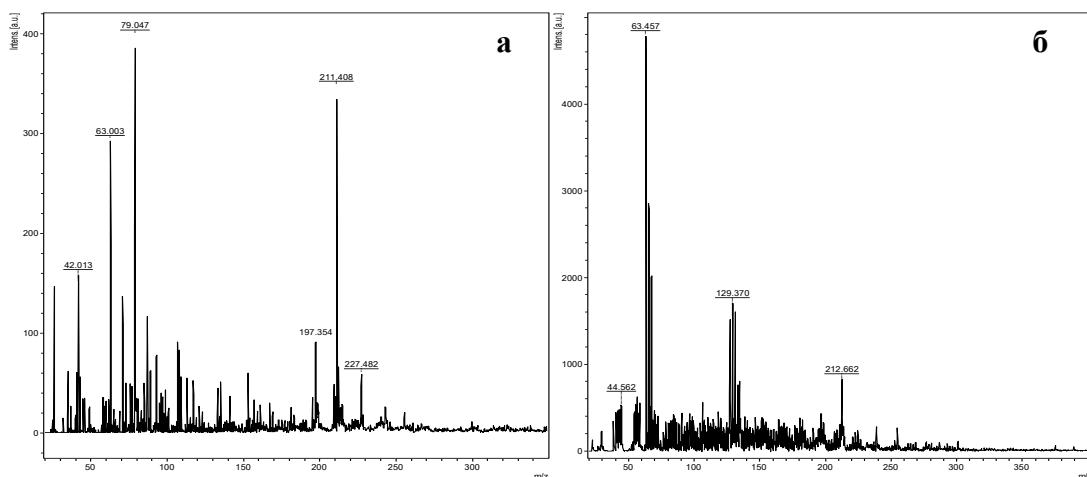


Рисунок 13. Масс-спектры образца МАК2.ОС в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

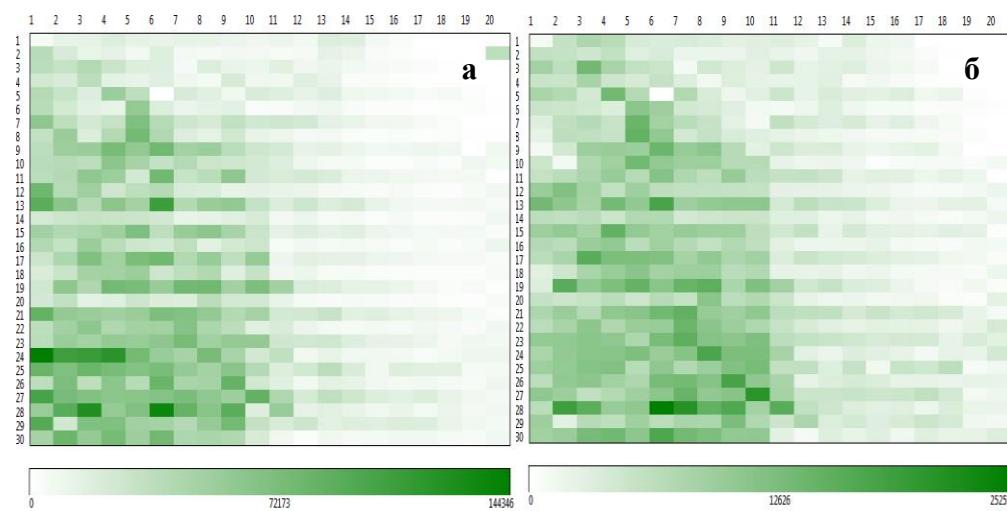


Рисунок 14. Двумерные диаграммы распределения по поверхности образца MAK2.OC ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а) и 130 Да (Zn_2^+) (б) в положительном режиме. Шаг построения – 100 мкм, направление построения слева направо – от стороны В к А.

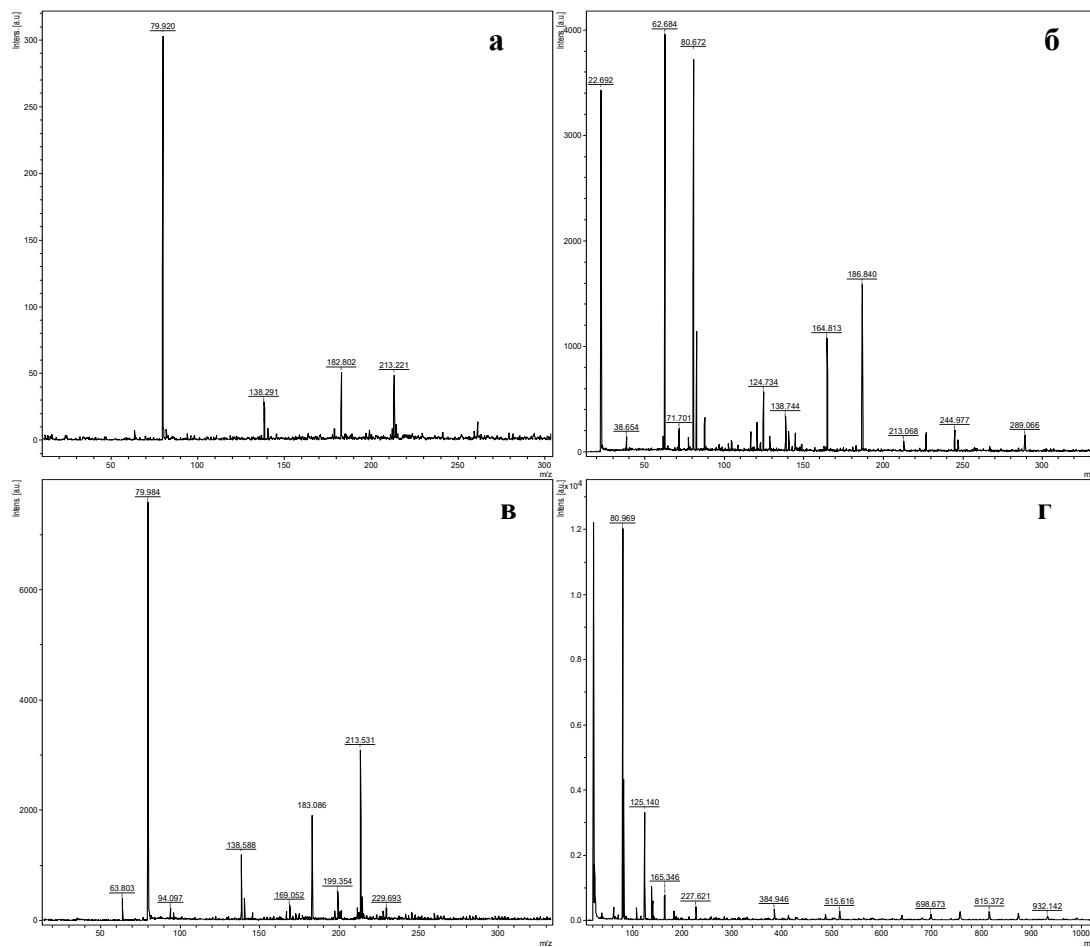


Рисунок 15. Масс-спектры образцов MAK2-2.NA (а, б) и MAK2-2.NB (в, г) в режиме регистрации отрицательных (а, в) и положительных (б, г) ионов.

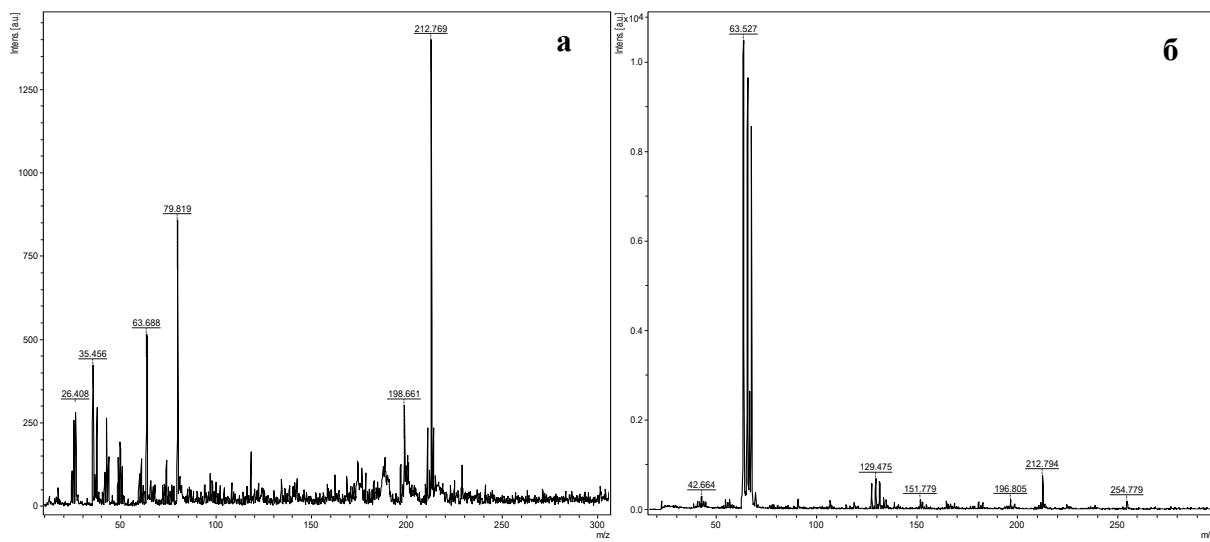


Рисунок 16. Масс-спектры образца MAK2-2.NC в режиме регистрации отрицательных (а) и положительных (б) ионов.

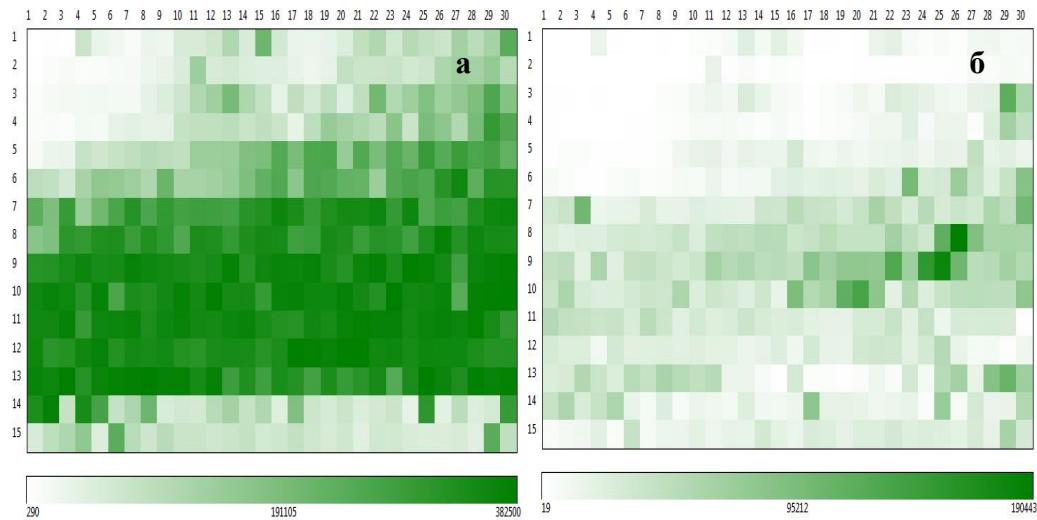


Рисунок 17. Двумерные диаграммы распределения по поверхности ионов с m/z 64 Да (Zn^+) (а) и 130 Да (Zn_{2+}) для образца MAK2-2.NC в положительном режиме. Шаг построения – 50 мкм, направление построения сверху вниз – от стороны NB к NA.

Заключение

В работе продемонстрировано применение физико-химической методики масс-спектрометрических исследований методом ЛДИ-визуализации. Представленная методика дает возможность получить информативные результаты исследования поверхности полимерных композитов для антикоррозионных покрытий. Составной частью методики является программа визуализации масс-спектрометрической информации, которая позволила построить двумерные диаграммы распределения

ионов по исследуемым поверхностям, в том числе для торцевых срезов/сколов образцов.

Исследование образцов модельного адаптивного композита до и после экспозиции в агрессивной среде позволило обнаружить и визуализировать продукты взаимодействия цинкового порошка с хлоридом натрия. Полученные результаты свидетельствует об адаптации покрытия к воздействию агрессивной среды. На поверхностях образцов МАК обнаружен ион с $m/z=212$ Да, изотопное распределение которого характерно для органических соединений. Вероятно, ион соответствует иону 2-гидроксиэтилметакрилату, фрагменту адаптивной добавки на основе акрилового полимера в составе МАК.

Таким образом, новая методика визуализации масс-спектрометрических измерений с ЛДИ-визуализацией позволяет обнаруживать компоненты МАК, оценивать степень воздействия агрессивной среды на материал и получать информацию о структуре поверхности и торцевых сколов антикоррозионных покрытий, недоступную другим методам.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. H. Awad, M.M. Khamis and A. El-Aneef, Mass spectrometry, review of the basics: ionization, *Applied Spectroscopy Reviews*, 2015, **50**, no. 2, 158–175. doi: [10.1080/05704928.2014.954046](https://doi.org/10.1080/05704928.2014.954046)
2. G.L. Glish and R.W. Vachet, The basics of mass spectrometry in the twenty-first century, *Nature reviews drug discovery*, 2003, **2**, no. 2, 140–150. doi: [10.1038/nrd1011](https://doi.org/10.1038/nrd1011)
3. P.L. Urban, Quantitative mass spectrometry: an overview, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, **374**, no. 2079, 1–5. doi: [10.1098/rsta.2015.0382](https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0382)
4. S. Tamara, M.A. den Boer and A.J. Heck, High-resolution native mass spectrometry, *Chemical reviews*, 2021, **122**, no. 8, 7269–7326. doi: [10.1021/acs.chemrev.1c00212](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00212)
5. S.R. Shuker, An introduction to mass spectrometry-based proteomics, *Journal of proteome research*, 2023, **22**, no. 7, 2151–2171. doi: [10.1021/acs.jproteome.2c00838](https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.2c00838)
6. А.К. Буряк, Н.П. Платонова, И.С. Пыцкий и А.В. Ульянов, Масс-спектрометрия для исследования коррозионных процессов на поверхностях конструкционных материалов, *Аналитика*, 2019, **9**, no. 2, 126–135. doi: [10.22184/2227-572X.2019.9.2.126.135](https://doi.org/10.22184/2227-572X.2019.9.2.126.135)
7. A.K. Buryak and T.M. Serdyuk, Chromatography–mass spectrometry in aerospace industry, *Russian Chemical Reviews*, 2013, **82**, no. 4, 366–392. doi: [10.1070/RC2013v082n04ABEH004304](https://doi.org/10.1070/RC2013v082n04ABEH004304)

8. S.D. Iartsev, I.S. Pytskii, A.S. Belova and A.K. Buryak, Mass spectrometry detection of nitrobenzoic acids and their salts on the surface of construction materials, *Journal of analytical chemistry*, 2018, **73**, no. 1, 46–51. doi: [10.1134/S1061934818010124](https://doi.org/10.1134/S1061934818010124)
9. S.D. Iartsev, I.S. Pytskii, I.G. Zenkevich and A.K. Buryak, Chromatographic and mass-spectrometric study of the surfaces of construction materials after contact with 1,1-dimethylhydrazine, *Journal of Analytical Chemistry*, 2017, **72**, no. 6, 624–631. doi: [10.1134/S106193481706017X](https://doi.org/10.1134/S106193481706017X)
10. E.S. Kuznetsova, I.S. Pytsky and A.K. Buryak, Introducing catonization agents in the soft ionization of short-chain peptides: Laser desorption and electrospraying, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2025, **99**, no. 1, 98–104. doi: [10.1134/S0036024424702686](https://doi.org/10.1134/S0036024424702686)
11. I.S. Pytskii, E.S. Kuznetsova, S.D. Iartsev and A.K. Buryak, Methodological features of mass-spectrometric studies of oxidized metal surfaces, *Colloid Journal*, 2017, **79**, 526C531. doi: [10.1134/S1061933X17040111](https://doi.org/10.1134/S1061933X17040111)
12. I.S. Pytskii, E.S. Kuznetsova and A.K. Buryak, Express search and characterization of nitro compounds via visualization mass spectrometry, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2023, **97**, no. 11, 2559–2563. doi: [10.1134/S0036024423110262](https://doi.org/10.1134/S0036024423110262)
13. I.S. Pytskii, E.S. Kuznetsova and A.K. Buryak, Surface imaging in applied research, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, **96**, no. 10, 2215–2221. doi: [10.1134/S0036024422100260](https://doi.org/10.1134/S0036024422100260)

Application of laser desorption mass spectrometry to study the surface of composite materials

I.V. Minenkova, E.S. Kuznetsova and I.S. Pytsky*

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences, 31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia

*E-mail: ivanpic4586@gmail.com

Abstract

The work is devoted to the analysis of materials based on a model adaptive composite of different compositions. The possibilities of mass spectrometry with visualization are demonstrated in order to study the surface of materials, including side cuts. Two-dimensional diagrams of ion distribution over the studied surfaces are constructed. The developed technique made it possible to detect both organic and inorganic components of model composites. The presented method for visualizing mass spectrometric data with laser desorption/ionization allows for the analysis of the surface of composite materials, the assessment of their exposure to aggressive environments, and the acquisition of important information about the surface structure and the distribution of compounds throughout the thickness of the sample, demonstrating the uniqueness of the proposed approach.

Keywords: *laser desorption/ionization, mass spectrometry, two-dimensional distribution diagrams, clusters.*