

## Исследование состава водных проб окружающей среды на содержание анионных поверхностно-активных веществ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии

© 2026. А. В. Стрелецкий, к. х. н., с. н. с.,  
 Д. Б. Каменецкая, к. б. н., с. н. с.,  
 О. Н. Савостикова, к. мед. н., начальник отдела экотоксикологии и  
 физико-химических методов исследований,  
 ФГБУ «ЦСП» ФМБА России,  
 119121, Россия, г. Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 1,  
 e-mail: astreletsky@cspfmba.ru

Представлен целостный подход, применимый в рамках рутинного анализа различных типов вод (питьевая, сточная и очищенная сточная) на предмет содержания анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ). Исследование выполнено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Описана комплексная методика анализа, включающая упрощенную пробоподготовку, градиентное хроматографическое разделение и масс-спектрометрическое детектирование в различных режимах, включая тандемную масс-спектрометрию. Для идентификации АПАВ использовались открытые базы масс-спектрометрических данных, содержащие информацию о молекулярных массах аналитов и их специфических фрагментных ионах. Приведён пример оценки количественного содержания загрязняющих веществ в сточных водах до и после очистки на водоочистных сооружениях, что подтверждает эффективность применяемого метода. Результаты хроматографического анализа пробы сточной воды выявили АПАВ – алкилбензолсульфонаты (C10-, C11- и C12-) и алкилсульфаты (C14). После очистки сточной воды концентрация этих веществ значительно снижается: эффективность очистки составила 97–99 %. Обнаружение следовых количеств АПАВ в очищенной воде свидетельствует о необходимости постоянного мониторинга качества воды для оценки степени загрязнения этими веществами.

**Ключевые слова:** анионные поверхностно-активные вещества, масс-спектрометрия, хроматография, сточные воды.

## Study on environmental water samples for anionic surfactants by high-performance liquid chromatography

© 2026. A. V. Streletskiy ORCID: 0000-0002-8194-1536, D. B. Kamenetskaya ORCID: 0000-0002-9050-3757  
 O. N. Savostikova ORCID: 0000-0002-7032-1366

Federal State Budgetary Institution “Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks” of the Federal medical and biological agency (Centre for Strategic Planning, of the Federal medical and biological agency),  
 10, Bld. 1, Pogodinskaya St., Moscow, Russia, 191121,  
 e-mail: astreletsky@cspfmba.ru

Results of analysis of various water samples (drinking water, wastewater, and treated wastewater) for anionic surfactants content are presented. The study was conducted using high-performance liquid chromatography with mass spectrometric detection. A comprehensive analytical methodology, including simplified sample preparation, gradient chromatographic separation, mass-spectrometric detection in various modes (including tandem mass spectrometry) is described. Special attention is paid to the anionic surfactants identification using open-access mass-spectrometric databases that based on molecular mass and characteristic fragments. An example of assessing the quantitative composition of contaminants in wastewater before and after treatment is given. It demonstrates the effectiveness of the applied approach. The results of the chromatographic analysis of the wastewater sample revealed anionic surfactants – alkylbenzene sulfonates (C10-, C11-, and C12-) and alkylsulfates (C14). After wastewater treatment, the concentration of the above substances significantly decreases; a removal efficiency is 97–99 %. The detection of trace amounts of surfactants in the treated water indicates the need for continuous water quality monitoring to assess the level of contamination by anionic surfactants.

**Keywords:** anionic surfactants, mass spectrometry, chromatography, wastewater.

Основными источниками загрязнения поверхностно-активными веществами (ПАВ) водных объектов, как правило, выступают сельскохозяйственные и промышленные предприятия, а также хозяйственно-бытовые сточные воды. Вследствие особых свойств ПАВ наносимый ими вред окружающей среде трудно переоценить. Для эффективного мониторинга таких загрязнений важно уметь идентифицировать отдельные примеси и измерять их концентрацию. Идентификация конкретных соединений также необходима для определения источника загрязнения и для более эффективного контроля в повседневной практике.

В настоящей работе рассмотрены анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ), которые являются одними из наиболее распространённых ПАВ [1]. Анионные ПАВ широко используются в моющих и косметических средствах, а также применяются во многих производственно-технологических процессах. Примерами таких соединений являются алкилбензолсульфонаты натрия и алкилсульфонаты натрия.

Поскольку объём бытового и промышленного использования АПАВ достаточно высокий [2], всегда существует вероятность того, что АПАВ могут проникнуть в питьевую воду через очистные сооружения, создавая тем самым угрозу для здоровья населения. Активно проводятся исследовательские работы по совершенствованию и оптимизации процесса очистки вод от разного рода химических загрязнителей, включая синтетические ПАВ [3, 4]. В связи с этим задача по обнаружению и количественному определению АПАВ в водных объектах является актуальной [5, 6].

Нормы допустимых концентраций АПАВ могут варьироваться в зависимости от конкретного соединения, объекта загрязнения и регуляторных стандартов. Для сточных вод максимально допустимое значение концентраций синтетических АПАВ, установленное Постановлением Правительства РФ от 29.07.2013 № 644, составляет 10 мг/л, применительно к сбросу в бытовые системы водоотведения. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 для питьевой воды установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) для отдельных соединений, так, для алкилбензолсульфонатов ПДК зафиксировано на уровне 0,5 мг/л по органолептическому лимитирующему показателю вредности и пенообразованию.

Вместе с тем лабораторный анализ состава АПАВ и продуктов их разложения в водных

объектах окружающей среды может быть затруднён из-за отсутствия необходимой селективности метода при идентификации отдельных соединений и малой чувствительности, которой может быть недостаточно для установления остаточных количеств ПАВ.

Например, для спектрофотометрических методов чувствительность анализа ПАВ может составлять 0,01–1,00 мг/л, в зависимости от конкретного соединения и условий анализа [7, 8]. Потенциометрический метод анализа ПАВ не является трудоёмким, чувствительность данного метода составляет от 0,01 мг/л в зависимости от типа ион-селективного электрода конкретного образца и условий анализа [7, 9]. Перечисленные выше методы дают оценку содержания одного конкретного вида ПАВ (анионного, катионного, неионогенного) в пробе [10–12]. Для селективного анализа, направленного на идентификацию и определение количественного содержания соединений ПАВ в одном образце, следует использовать методы хроматографии с масс-селективным детектированием.

Известно, что метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-селективным детектором (ВЭЖХ-МС) позволяет обнаруживать и анализировать катионные, анионные ПАВ в пищевых продуктах и образцах воды с высокой чувствительностью и селективностью [13]. В многочисленных исследованиях особое внимание уделяется такому этапу анализа, как подготовка проб, например, твёрдофазная экстракция [14], дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция [13], модифицированный способ электрораспылительной ионизации (бумажный [15], с проточной инъекцией [16]).

Цель настоящей работы заключается в проведении исследований по оценке качества очистки сточных вод после прохождения очистных сооружений методом ВЭЖХ-МС с идентификацией наличия примесных АПАВ и определением их количества в различных водных пробах (питьевая вода, сточная вода, сточная вода после очистки, вода из поверхностных водоёмов).

### Объекты и методы исследования

Отбор воды проводили в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ Р 56237-2014 в герметично закрывающиеся стеклянные флаконы. Объём отбираемой пробы составлял 1000 мл. После транспортировки пробы

хранили при температуре (2–10) °С. Отобранную пробу анализировали не позднее 14 сут с момента отбора.

Для анализа водных проб использовали простой и быстрый способ пробоподготовки, заключающийся в очистке от элементов твёрдофазной дисперсией. В процессе подготовки к анализу отобранную пробу первоначально центрифугировали в течение 10 мин при центробежном ускорении 3000 g для удаления крупных частиц. Затем для удаления мельчайших частиц центрифугат пропускали через фильтрующую насадку для шприцев с полиэфирсульфоновой мембраной (диаметр пор 0,22 мкм). Для проведения хроматографического анализа пробу объёмом 1,5 мл переносили в стеклянную виалу объёмом 2 мл. В таблице 1 представлен перечень и описание исследованных проб.

Анализ образцов проведён с использованием жидкостного хромато-масс-спектрометра ВЭЖХ система Agilent 1200 серии с масс-спектрометрическим детектором Agilent 6430 (Agilent Technologies, США). Хроматографию проводили на обращённо-фазовой колонке Zorbax SB-C18 (размер зёрен сорбента – 1,8 мкм, 100 × 2,1 мм) при t = 30 °С в градиентном режиме элюирования (90 % А – > 10 % А в течение 10 мин). Компоненты подвижной фазы: А – 0,1 % (по объёму) водный раствор муравьиной кислоты, Б – ацетонитрил. Поток – 0,150 мл/мин. Время проведения анализа – 20 мин, объём инъекции – 10 мкл.

Масс-спектрометрическое детектирование проводили в условиях ионизации электро-распылением (ИЭР). В источник ионизации подавался осушающий поток азота со скоростью 5 л/мин и температурой 350 °С. Напряжение на входном капилляре составляло минус 4000 В (для отрицательных ионов). Для регистрации, анализа и обработки экспериментальных данных применяли про-

граммное обеспечение «Agilent MassHunter» и «Microsoft Excel» (США).

Для идентификации веществ в образцах применялся следующий подход. Рассматривали только отрицательные ионы, поскольку все АПАВ хорошо детектируются в отрицательном режиме. Первоначально на хроматограмме полного ионного тока выделяли основные пики и определяли отношение массы к заряду (m/z) доминантного иона, соответствующего пику: депротонированные молекулы ([M-H]<sup>-</sup>). Далее при повторном хроматографическом разделении проводили анализ методом тандемной масс-спектрометрии: выделенный доминантный ион подвергали фрагментации в ячейке соударения путём столкновения с молекулой азота (N<sub>2</sub>) при разных энергиях столкновения (10, 20 и 30 В). Далее по спектру ионов-фрагментов устанавливали возможное соединение путём сравнения спектров с открытой базой данных масс-спектров небольших химических соединений MassBank Project ([www.massbank.eu](http://www.massbank.eu)) и проведения оценки их сходства с помощью программного обеспечения для идентификации масс-спектров, разработанного Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) (NIST MS Search v.2.4).

Для подтверждения предполагаемого состава и приблизительной оценки концентрации использовали коммерческий продукт сульфенол (Nexxo, Россия). В состав сульфенола входят натриевые соли алкилбензолсульфоокислот (80 %), сульфат натрия (20 %). Относительный количественный состав идентифицируемых солей алкилбензолсульфоокислот был оценён по соотношениям хроматографических пиков как 10 % (натрия децилбензолсульфонат, C10-БС), 85 % (натрия ундецилсульфонат, C11-БС), 5 % (натрия додецилсульфонат, C12-БС).

На основе препарата сульфенола путём разбавления готовили водные калибровочные

Таблица 1 / Table 1

Типы проанализированных проб / Samples analyzed

Номер пробы Sample No.	Характеристика пробы Sample characteristics	Объект Object
1	сточная вода (до очистки) wastewater (before treatment)	водоочистные сооружения water treatment plants
2	очищенная сточная вода treated wastewater	водоочистные сооружения (сброс в озеро) / water treatment plants (discharge into the lake)
3	питьевая вода из подземного источника (купаж из трёх скважин) / underground drinking water (blend from three wells)	водозабор перед распределительной водопроводной сетью / water intake before the water distribution network

растворы алкилбензолсульфонокислот натрия с диапазоном концентраций 0,001–2,000 мг/л, по которым были построены градуировочные графики зависимости сигнала иона от концентрации аналита. Для измерения сигнала применяли режим регистрации выделенных ионов (SIM, **selected ion monitoring**). Метрологические характеристики измерений представлены в таблице 2. Предел обнаружения ( $C_{\text{мин}}$ ) определялся по минимальной концентрации аналита с  $S/N > 3$  раза.

### Результаты и обсуждение

Применены типичные условия хроматографического разделения, используемого для большинства полярных водорастворимых органических соединений: непрерывное изменение состава подвижной фазы с полярного растворителя ( $H_2O$ ) на менее полярный растворитель (ацетонитрил) при стационарной фазе колонки C18 с градиентом от 95 до 10 % [6, 17].

На рисунке 1 представлены масс-хроматограммы пробы 1 сточной воды, полученные в двух режимах: 1) сканирования всех ионов с  $m/z$  от 50 до 1500; 2) регистрации выделенных ионов с конкретными значениями  $m/z$ . Установлено, что основные пики масс-хроматограммы полного сканирования определяются следующими ионами с  $m/z$ : 293, 297, 311, 325.

При повторном хроматографическом анализе, но уже с масс-детектированием в режиме выделенных ионов с вышеуказанными значениями  $m/z$  были получены ясно выраженные хроматографические пики, соответствующие

каждому отдельному соединению. Таким образом, в масс-хроматограмме были установлены четыре вещества, определяющие содержание пробы.

Стоит отметить, что при регистрации полного ионного тока (полном сканировании) абсолютная интенсивность аналитического сигнала обычно несколько выше, чем в режиме мониторинга выбранных ионов. Однако в этом случае одновременно фиксируется и более высокий уровень шума, что существенно затрудняет количественное определение аналита.

Для идентификации веществ при последующем повторном хроматографическом анализе с детектированием в режиме тандемной масс-спектрометрии были получены масс-спектры фрагментов ионов-прекурсоров (рис. 2).

Для последних трёх соединений, отмеченных на рисунке 2 цифрами 2–4, установлен характеристический повторяющийся специфический фрагмент при  $m/z$  183, который может быть отнесён к соединению класса алкилбензолсульфонаты [11]. Ион при  $m/z$  293 с характерным фрагментом  $m/z$  80 может быть отнесён к другому классу АПАВ – алкилсульфаты [11]. Сравнение масс-спектров с базой данных известных соединений подтвердил данные предположения, показав высокие значения сходства (более 95 %). Таким образом, было установлено, что в пробе 1 сточной воды содержатся АПАВ (алкилбензолсульфонаты, C10-БС, C11-БС и C12-БС и алкилсульфаты C14). Результаты анализа представлены в таблице 3.

На основе полученных данных по идентификации АПАВ в пробе 1 были проведены

Таблица 2 / Table 2

Метрологические характеристики измерения алкилбензолсульфонокислот натрия  
Metrological characteristics of sodium alkylbenzenesulfonate determination

Аналит Analyte	$C_{\text{мин}}$ , мг/л $C_{\text{min}}$ , mg/L	Диапазон измерений, мг/л Measurement range, mg/L	$R^2$	$m/z$	Время удерживания, мин Retention time, min
C10-БС C10-BS	0,012	0,01–1,00	0,93	297	9,9
C11-БС C11-BS	0,009	0,01–2,00	0,99	311	10,8
C12-БС C12-BS	0,004	0,01–1,00	0,98	325	11,5

Примечание: C10-БС – натрия децилбензолсульфонат, C11-БС – натрия ундецилбензолсульфонат, C12-БС – натрия додецилбензолсульфонат,  $C_{\text{мин}}$  – предел обнаружения,  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $m/z$  – отношение массы к заряду.

Note: C10-BS – sodium decylbenzenesulfonate, C11-BS – sodium undecylbenzenesulfonate, C12-BS – sodium dodecylbenzenesulfonate,  $C_{\text{min}}$  – limit of detection,  $R^2$  – coefficient of determination,  $m/z$  – ratio mass to charge.

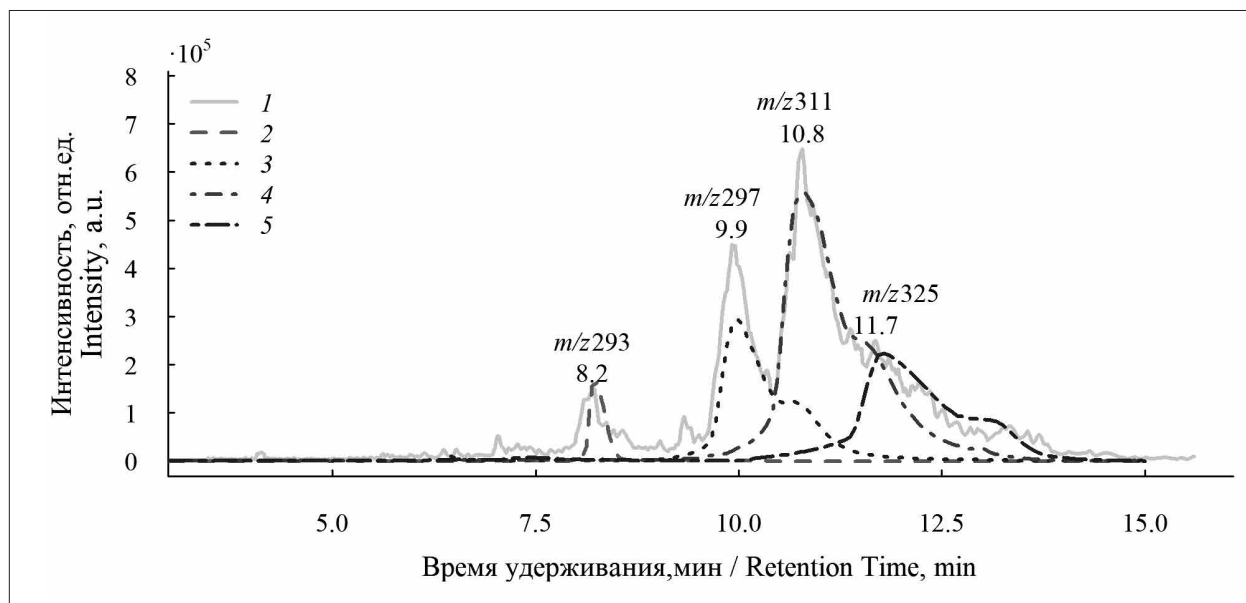


Рис. 1. Масс-хроматограммы сточной воды: 1 – полный ионный ток; в режиме регистрации выбранных отрицательных ионов ( $m/z$ ): 2 – 293, 3 – 297, 4 – 311, 5 – 325  
 Fig. 1. Mass chromatograms of wastewater sample: 1 – full ion scan; selected ion monitoring of negative ion ( $m/z$ ): 2 – 293, 3 – 297, 4 – 311, 5 – 325

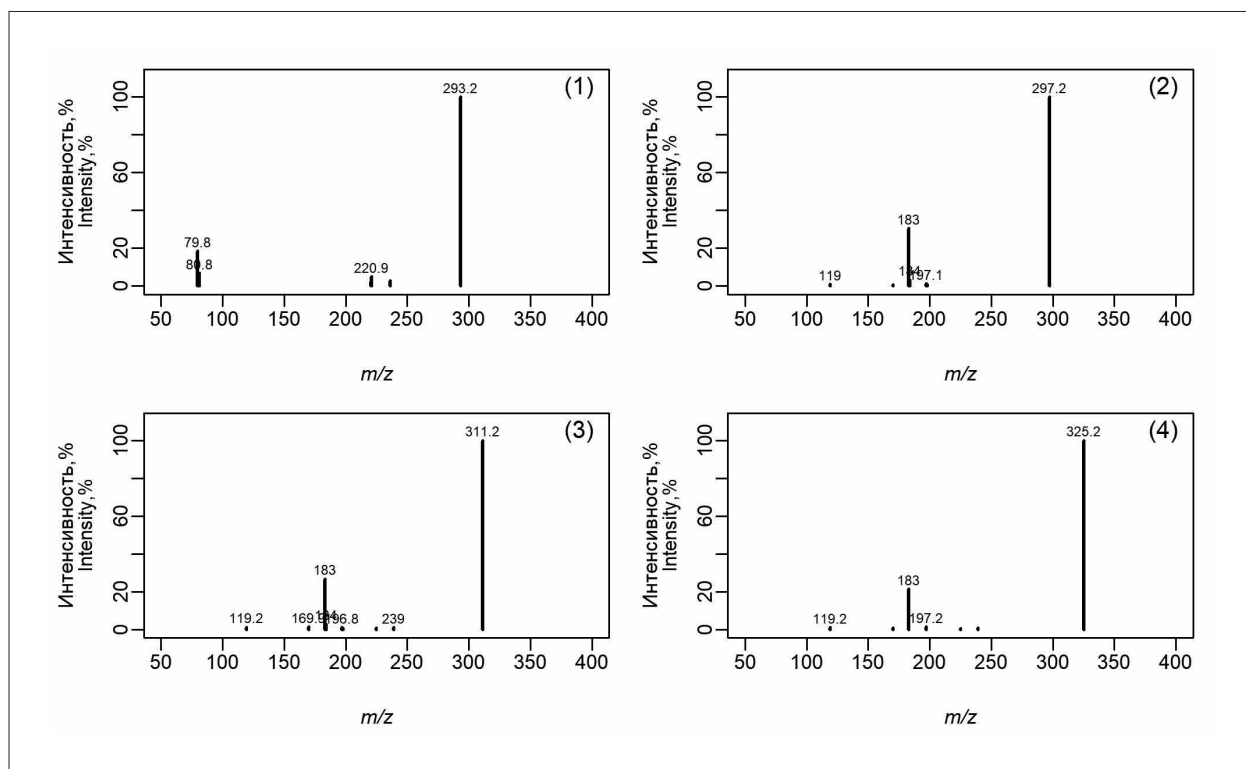


Рис. 2. Масс-спектры ионов-продуктов, полученных при фрагментации следующих ионов-прекурсоров ( $m/z$ ): 1 – 293, 2 – 297, 3 – 311, 4 – 325  
 Fig. 2. Mass spectra product ions obtained from precursor ions ( $m/z$ ): 1 – 293, 2 – 297, 3 – 311, 4 – 325

Таблица 3 / Table 3

Анионные ПАВ, обнаруженные в образце сточных вод / Defined anionic surfactants in wastewater sample

Время удерживания, мин Retention time, min	m/z ион-прекурсора m/z of precursor ion	Характеристические фрагментные ионы Characteristic fragment ions	Идентифицируемое соединение Defined compounds
8,2	293	80	Миристилсульфат (C14-АС) Myristylsulfate (C14-AS)
9,9	297	183, 119	Децилбензолсульфонат (C10-БС) Decylbenzenesulfonate (C10-BS)
10,8	311	183, 119	Деканилбензолсульфонат (C11-БС) Undecylbenzenesulfonate (C11-BS)
11,7	325	183, 119	Додецилбензолсульфонат (C12-БС) Dodecylbenzenesulfonate (C12-BS)

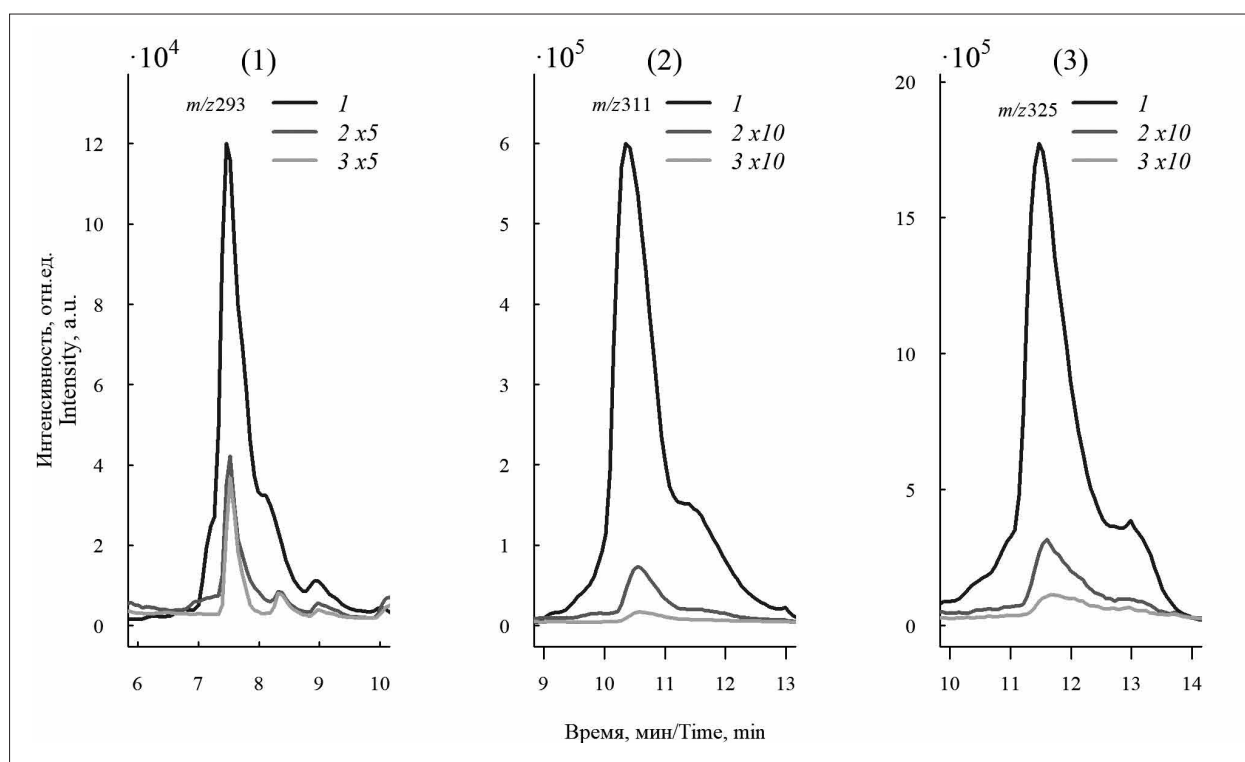


Рис. 3. Масс-хроматограммы миристилсульфата (1), деканилбензолсульфоната (2) и додецилбензолсульфоната (3) для трёх типов проб (см. табл. 1)

Fig. 3. Mass chromatograms of myristyl sulfate (1), decanyl benzenesulfonate (2) and dodecyl benzenesulfonate (3) for three sample types (see Table 1)

исследования проб очищенной сточной и питьевой (артезианской) воды. На рисунке 3 представлены сравнительные масс-хроматографические данные для всех проб, по которым можно дать оценку о наличии остаточного содержания АПАВ.

Как видно, после прохождения очистных сооружений концентрация АПАВ существенно уменьшается. Эффективность ( $\mathcal{E}$ ) очистки рассчитывали по изменению площади хроматографического пика вещества на входе ( $S_{вх}$ ) и выходе ( $S_{вых}$ ) сооружения:

$$\mathcal{E} = \frac{(S_{вх} - S_{вых})}{S_{вх}} \cdot 100\% \quad (1)$$

По данным проведённой оценки для алкилбензолсульфокислот эффективность очистки составила 99 %, а для алкилсульфоната – 97 %.

По градуировочному графику были оценены концентрации следовых количеств наблюдаемых алкилбензолсульфокислот (табл. 4).

Полученные данные подтверждают предположение о наличии в очищенной сточной

Таблица 4 / Table 4

Содержание АПАВ (бензолсульфонаты) в водных пробах  
Anionic surfactants content (benzenesulfonates) in water sample

Аналит Analyte	Содержание АПАВ (бензолсульфонаты), мг/л в пробе: Anionic surfactants content (benzenesulfonates), mg/L in water sample:		
	1	2	3
C10-BC / C10-BS	12 ± 2	0,07 ± 0,01	> 0,01
C11-BC / C11-BS	99 ± 20	0,9 ± 0,2	0,07 ± 0,05
C12-BC / C12-BS	33 ± 7	0,2 ± 0,1	> 0,01

воде следовых количеств АПАВ, что свидетельствует о необходимости ведения мониторинга качества воды для оценки и прогнозирования загрязнения водных объектов ПАВ.

### Заключение

Предложен комплексный подход к анализу водных проб, охватывающий все этапы исследования: от пробоподготовки до хроматографического разделения с масс-спектрометрическим детектированием на содержание АПАВ, включая линейные алкилбензолсульфонаты и алкилсульфаты натрия.

Комбинация режимов детектирования (полного сканирования и тандемной масс-спектрометрии) обеспечивает одновременный мониторинг сразу нескольких химических соединений C10-C12 бензолсульфонатов и C-14 алкилсульфатов, что способствует оперативному реагированию и оптимизации процессов очистки сточных вод. Внедрение данного подхода позволит повысить экологическую безопасность водных объектов, улучшить качество очищенных сточных вод и минимизировать антропогенную нагрузку на водные экосистемы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУ «ЦСП» ФМБА России РАН (тема «Индикатор риска 25-27»).*

### Литература

1. Трифонова Т.А., Чеснокова С.М., Савельев О.В. Оценка влияния синтетических поверхностно-активных веществ на экосистему малого водотока // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 20–25. doi: 10.35776/VST.2022.04.03
2. Рынок ПАВ – Размер, производители, доля отрасли и рост [Электронный ресурс] <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/surfactants-market> (Дата обращения: 17.03.2025).
3. Закиров Р.К., Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С. Перспективы сонохимической обработки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные

вещества // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 111–116. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116

4. Курбатов А.Ю., Мурзина Е.Д., Ветрова М.А., Иванцова Н.А. Обеспечение качества и безопасности процесса питьевой водоподготовки на примере р. Ганг // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 96–104. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-096-104

5. Bautista Quispe J.I., Campos L.C., Mašek O., Bogush A. Removal of anionic surfactant from aqueous solutions by adsorption onto biochars: characterisation, kinetics, and mechanism // Environ. Technol. 2024. V. 45. No. 26. P. 5723–5744. doi: 10.1080/09593330.2024.2304677

6. Šima J., Havelka M., Holcová V. Removal of anionic surfactants from wastewater using a constructed wetland // Chem. Biodivers. 2009. V. 6. No. 9. P. 1350–1363. doi: 10.1002/cbdv.200900108

7. Bazel Y.R., Antal I.P., Lavra V.M., Kormosh Zh.A. Methods for the determination of anionic surfactants // J. Anal. Chem. 2014. V. 69. P. 211–236. doi: 10.1134/S1061934814010043

8. Ferradj A., Idouhar M. Determination of anionic surfactants in wastewater treatment plant in Algiers City // Desalin. Water Treat. 2016. V. 57. No. 53. P. 25677–25685. doi: 10.1080/19443994.2016.1157038

9. Орлова А.О., Лизунова Г.М., Зорин А.Д. Определение содержания анионных и неионных поверхностно-активных веществ в синтетических моющих средствах при помощи жидкостных ионоселективных электродов // Аналитика и контроль. 2004. № 2. С. 131–136.

10. Куренкова О.В. Методы определения поверхностно-активных веществ в природных и сточных водах // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 6. С. 138–142.

11. Budetić M., Jozanović M., Pukleš I., Samardžić M. Review of potentiometric determination of cationic surfactants // Rev. Anal. Chem. 2024. V. 43. No. 1. Article No. 20230078. doi: 10.1515/revac-2023-0078

12. Шачнева Е.Ю. Методы определения неионогенных поверхностно-активных веществ // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2015. № 6. С. 18–23.

13. Amelin V.G., Shogah Z.A., Bol'shakov D.S. Identification of cationic and anionic surfactants by chromatography-mass-spectrometry in the microextraction-fluorimetry

screening of water and food products // *J. Anal. Chem.* 2001. V. 76. P. 592–602. doi: 10.1134/S106193482105004X

14. Wiest L., Giroud B., Assoumani A., Lestremau F., Vulliet E. A multi-family offline SPE LC-MS/MS analytical method for anionic, cationic and non-ionic surfactants quantification in surface water // *Talanta.* 2021. V. 232. Article No. 122441. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122441

15. Min K., Yang Q., Zhong X., Yan D., Luo W., Fang Z., Xiao J., Ma M., Chen B. Rapid analysis of anionic and cationic surfactants in water by paper spray mass spectrometry // *Anal. Methods.* 2021. V. 13. No. 8. P. 986–995. doi: 10.1039/d0ay02215b

16. Barco M., Planas C., Palacios O., Ventura F., Rivera J., Caixach J. Simultaneous quantitative analysis of anionic, cationic, and nonionic surfactants in water by electrospray ionization mass spectrometry with flow injection analysis // *Anal. Chem.* 2003. V. 75. No. 19. P. 5129–5136. doi: 10.1021/ac020708r

17. Майер В.Р. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография. М.: Техносфера, 2019. 410 с.

## References

1. Trifonova T., Chesnokova S., Savel'ev O. Estimating the effect of synthetic surfactants on the ecosystem of a small watercourse // *Water supply and sanitary technique.* 2022. No. 4. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.35776/VST.2022.04.03

2. Surfactants market – Size, manufacturers, industry share and growth (2024–2029) [Internet resource] <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/surfactants-market> (Accessed: 17.03.2025) (in Russian).

3. Zakirov R.K., Akhmadullina F.Y., Balyмова E.S. Prospects for sonochemical treatment of wastewater containing synthetic surfactants // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 111–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116

4. Kurbatov A.Yu., Murzina E.D., Vetrova M.A., Ivantsova N.A. Ensuring quality and safety for the process of drinking water treatment: case-study of the Ganges River // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 4. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-096-104

5. Bautista Quispe J.I., Campos L.C., Mašek O., Bogush A. Removal of anionic surfactant from aqueous solutions by adsorption onto biochars: characterisation, kinetics, and mechanism // *Environ. Technol.* 2024. V. 45. No. 26. P. 5723–5744. doi: 10.1080/09593330.2024.2304677

6. Sima J., Havelka M., Holcová V. Removal of anionic surfactants from wastewater using a constructed wetland // *Chem. Biodivers.* 2009. V. 6. No. 9. P. 1350–1363. doi: 10.1002/cbdv.200900108

7. Bazel Y.R., Antal I.P., Lavra V.M., Kormosh Zh.A. Methods for the determination of anionic surfactants // *J. Anal. Chem.* 2014. V. 69. P. 211–236. doi: 10.1134/S1061934814010043

8. Ferradj A., Idouhar M. Determination of anionic surfactants in wastewater treatment plant in Algiers City // *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. No. 53. P. 25677–25685. doi: 10.1080/19443994.2016.1157038

9. Orlova A.O., Lizunova G.M., Zorin A.D. Definition of the concentration of anionic and nonionic surfactants in synthetic washing-up liquids with selective electrodes // *Analitika i kontrol'.* 2004. No. 2. P. 131–136 (in Russian).

10. Kurenkova O.V. Methods of definition of surface-active substances in natural water and sewage // *Nauchnyj Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya* 2013. No. 6. P. 138–142 (in Russian).

11. Budetić M., Jozanović M., Pukleš I., Samardžić M. Review of potentiometric determination of cationic surfactants // *Rev. Anal. Chem.* 2024. V. 43. No. 1. Article No. 20230078. doi: 10.1515/revac-2023-0078

12. Shachneva E.Yu. Methods nonionic surface-active substances // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodospabzhenie.* 2015. No. 6. P. 18–23 (in Russian).

13. Amelin V.G., Shogah Z.A., Bol'shakov D.S. Identification of cationic and anionic surfactants by chromatography-mass-spectrometry in the microextraction-fluorimetry screening of water and food products // *J. Anal. Chem.* 2001. V. 76. P. 592–602. doi: 10.1134/S106193482105004X

14. Wiest L., Giroud B., Assoumani A., Lestremau F., Vulliet E. A multi-family offline SPE LC-MS/MS analytical method for anionic, cationic and non-ionic surfactants quantification in surface water // *Talanta.* 2021. V. 232. Article No. 122441. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122441

15. Min K., Yang Q., Zhong X., Yan D., Luo W., Fang Z., Xiao J., Ma M., Chen B. Rapid analysis of anionic and cationic surfactants in water by paper spray mass spectrometry // *Anal. Methods.* 2021. V. 13. No. 8. P. 986–995. doi: 10.1039/d0ay02215b

16. Barco M., Planas C., Palacios O., Ventura F., Rivera J., Caixach J. Simultaneous quantitative analysis of anionic, cationic, and nonionic surfactants in water by electrospray ionization mass spectrometry with flow injection analysis // *Anal. Chem.* 2003. V. 75. No. 19. P. 5129–5136. doi: 10.1021/ac020708r

17. Mayer V.R. Practical high-performance liquid chromatography. Moskva: Tekhnosfera, 2019. 410 p. (in Russian).