

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13423

Новый анионообменник на основе сополимера стирола и дивинилбензола с привитым глицидилметакрилатом

Евгений Вячеславович Погоня, Анастасия Владимировна Горбовская,
Олег Алексеевич Шпигун, Анна Станиславовна Ужель[✉]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
anna_uzhel@analyt.chem.msu.ru[✉]

Аннотация. В данной работе получен новый анионообменник на основе сополимера стирола и дивинилбензола с привитым глицидилметакрилатом в результате одностадийной обработки диметилэтанолмином. Синтезированный сорбент обладает средней степенью гидрофилизации и подходит для работы в режиме ионной хроматографии с подавлением фоновой электропроводности при использовании наиболее простого оборудования с карбонатным буферным раствором в качестве элюента. Данный анионообменник, полученный простым синтезом, может конкурировать и с коммерческими колонками за счет быстрого разделения модельных смесей анионов. Так, смесь 7 стандартных анионов можно разделить за 9 мин; смесь 7 стандартных анионов и 5 оксоанионов (селенит (или арсенат), селенат, вольфрамат, молибдат, хромат) за 19 мин; смесь 7 стандартных анионов и 3 двухосновных органических аниона (тарtrat, оксалат, малеат) за 11 мин. В результате полученный сорбент успешно применен к анализу таких объектов, как питьевые воды, газированный напиток и ополаскиватель для полости рта.

Ключевые слова: полистирол-дивинилбензол, анионообменник, ионная хроматография, карбонатный буферный раствор, анализ питьевой воды и напитков.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 20-13-00140

Для цитирования: Погоня Е.В., Горбовская А.В., Шпигун О.А., Ужель А.С. Новый анионообменник на основе сополимера стирола и дивинилбензола с привитым глицидилметакрилатом // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 5. С. 730-738. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13423>

Original article

Novel anion exchanger based on poly(styrene-divinylbenzene) with grafted glycidyl methacrylate

Evgenii V. Pogonia, Anastasiia V. Gorbovskaia, Oleg A. Shpigun, Anna S. Uzhel[✉]

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, anna_uzhel@analyt.chem.msu.ru[✉]

Abstract. In this work novel anion exchanger based on a copolymer of styrene and divinylbenzene with grafted glycidyl methacrylate was obtained as a result of one-stage treatment with dimethylethanolamine. The synthesized resin has an average degree of hydrophilization and is suitable for operation in suppressed ion chromatography using the simplest equipment with a carbonate buffer solution as an eluent. Obtained by simple synthesis anion exchanger can compete with commercial columns due to the rapid separation of model anion mixtures. Thus, a mixture of 7 standard anions can be separated in 9 min; a mixture of 7 standard anions and 5 oxyanions (selenite (or arsenate), selenate, tungstate, molybdate, chromate) in 19 min; a mixture of 7 standard anions and 3 divalent organic acids (tartrate, oxalate, maleate) in 11 min. As a result, the resin has been successfully applied to the analysis of such samples as drinking water, carbonated beverage, and mouthwash.

Keywords: poly(styrene-divinylbenzene), anion exchanger, ion chromatography, carbonate buffer, drinking water and beverage analysis.

Acknowledgments: this work was supported by Russian Scientific Foundation through the grant № 20-13-00140.

For citation: Pogonia E.V., Gorbovskaia A.V., Shpigun O.A., Uzhel A.S. Novel anion exchanger based on poly(styrene-divinylbenzene) with grafted glycidyl methacrylate. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(5): 730-738. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13423>

Введение

В настоящее время ионная хроматография играет важнейшую роль для решения аналитических задач, связанных с определением ионов в различных объектах [1]. Наиболее широко используемым режимом разделения многих неорганических и органических анионов является ионная хроматография с подавлением фоновой электропроводности и кондуктометрическим детектированием (ИХ). Для эффективного разделения в этом режиме необходимо правильно выбрать матрицу будущего сорбента. Так, в качестве матрицы при создании сорбентов для ВЭЖХ предпочтителен силикагель. Несмотря на высокую механическую прочность, эффективность, возможность контролировать размер пор и удельную площадь поверхности, а также простоту модифицирования, силикагель не находит активного применения в ИХ с подавлением [2, 3]. Это связано с тем, что он стабилен при pH 1-7 [4]: в кислой среде возможен гидролиз связей между силикагелем и привитыми функциональными группами, а в щелочной – растворяется силикагель [2]. Стабильность неподвижной фазы имеет огромное значение, использование силикагеля в ИХ без предварительного модифицирования его поверхности крайне нежелательно [5, 6].

Оксиды металлов, например оксид циркония, применяют в качестве альтернативы силикагелю в обращённо-фазовой ВЭЖХ. Диоксид циркония обладает повышенной механической и термической стабильностью, а также устойчив во всем диапазоне pH [7]. Для получения анионообменников на основе оксидов металлов, безусловно, необходимо предварительное модифицирование. Недостатком является использование в качестве

элюента ацетата натрия, который нельзя использовать в ИХ с подавлением, в результате невозможно достичь высокой чувствительности [7]. Также основной проблемой использования оксидов металлов для применения в ИХ является возможность необратимой адсорбции веществ из анализируемых растворов на сорбенте. Кроме того, функциональные центры на их неоднородной поверхности способствуют уширению пиков и снижению эффективности [8].

На данный момент для синтеза сорбентов для ИХ наиболее распространёнными являются органические полимеры. Их получают путем сополимеризации метакрилатных (метилметакрилат, глицидилметакрилат, аллилметакрилат) и/или стирольных (стирол, этилвинилбензол) мономеров с сшивающими агентами (дивинилбензол, диметакрилат этиленгликоля) [9]. Неустойчивость в сильнощелочной среде – главный недостаток полимерных метакрилатных матриц (pH 1-12) [9]. Матрицы на основе поливинилового спирта обладают устойчивостью в ещё меньшем диапазоне pH 3-12. Кроме того, их эффективность и механическая стабильность ниже, чем у полиметакрилатных матриц [9], поэтому неподвижные фазы на их основе не получили широкого распространения.

Другим примером полимерных матриц являются сополимеры стирола или этилвинилбензола с дивинилбензолом (ПС-ДВБ и ЭВБ-ДВБ). Различное содержание дивинилбензола определяет степень сшивки сополимера, а значит, его механическую и химическую стабильность, а также пористость [2]. Преимуществом таких матриц являются достаточно высокая механическая стабильность и устойчивость во всем диапазоне pH. Бо-

лее того, поверхность матрицы, как правило, содержит непрореагировавшие двойные связи, с помощью которых ее можно модифицировать и увеличить степень гидрофилизации [10]. Это важно, поскольку при слабом экранировании гидрофобной поверхности матрицы анионы могут взаимодействовать с π -электронной ароматической системой сорбента. В результате удерживание анионов на сорбентах на основе полимерных матриц определяется не только за счёт ионного обмена, но и за счёт специфических взаимодействий. К таким взаимодействиям можно отнести Ван-дер-Ваальсовы [11], π - π [4], анион- π взаимодействия [12].

В работе [13] получили сорбенты на основе сополимера глицидилметакрилата, стирола и дивинилбензола (ГМА-ПС-ДВБ). Стоит обратить внимание на анионообменник, синтезированный за одну стадию взаимодействием триметиламина (ТМА) с остаточными эпоксидными группами на полимерных частицах. На данном сорбенте разделение 7 стандартных неорганических анионов с использованием карбонатного элюента происходит довольно продолжительно – примерно за 30 мин, значение $\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-)$ составляет 4.3, что свидетельствует о недостаточной гидрофильности сорбента. Это может быть связано, во-первых, с введением гидрофобного третичного амина. Использование N,N-диметилаэаноламина (ДМЭА) или N-метилдиэаноламина (МДЭА) наиболее предпочтительно для получения селективных и гидрофильных сорбентов. Во-вторых, у данной матрицы есть существенный недостаток: при сополимеризации реагентов образующиеся эпоксидные группы будут находиться как внутри слоя полимерной частицы, так и на её поверхности. В результате образования ионообменных центров в плотном слое гидрофобной матрицы происходит увеличение времени удерживания анионов и ухудшение хроматографических характеристик [14].

Большинство коммерчески доступных химически модифицированных анионообменников получают на основе ПС-ДВБ. Такие сорбенты предназначены для разделения 7 стандартных неорганических анионов при использовании карбонатных и гидрокарбонатных растворов в качестве элюента. Одной из наиболее популярных колонок такого типа является STAR-ION A300 (Phenomenex, США), позволяющая разделять 7 стандартных неорганических анионов за 8 мин при использовании карбонатного буферного раствора в качестве элюента со скоростью 2 см³/мин [4].

Использование в качестве элюента карбонатного буферного раствора в режиме ИХ всё ещё актуально по ряду причин. В первую очередь это связано с меньшей стоимостью оборудования по сравнению с хроматографами, оснащенными системами электрогенерации. Во-вторых, с большей стабильностью сорбентов в карбонатном буферном растворе по сравнению с сильнощелочными элюентами. Например, некоторые сорбенты на основе полиметакрилатов или поливинилового спирта нестабильны в сильнощелочной среде, поэтому с ними зачастую используют карбонатный элюент. Кроме того, использование карбонатного буферного раствора позволяет регулировать селективность разделения за счёт изменения соотношения $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ [4, 14, 15].

Таким образом, целью работы являются получение нового анионообменника на основе ПС-ДВБ с ковалентно привитым глицидилметакрилатом (ПС-ДВБ-ГМА) за счёт аминирования эпокси-групп ДМЭА, изучение его основных хроматографических свойств и применение для анализа объектов.

Экспериментальная часть

Приборы и материалы. В качестве матрицы для синтеза сорбентов использовали ПС-ДВБ-ГМА со степенью сшивки 80%, средним диаметром частиц $5.0 \pm$

0.5 мкм, площадью поверхности 650 м²/г, средним объемом пор 1.2 см³/г и средний диаметром пор 25 нм.

Для синтеза использовали следующие реактивы и растворители: диметилэтанолламин (99.5%) («Aldrich», США), этанол (ч.д.а.) («Лабтех», Россия), нитрат натрия (>99.0%) («Merck», Германия).

Для приготовления подвижных фаз и растворов аналитов использовали деионизованную воду и реактивы квалификации х.ч. или ч.д.а. компаний «Химмед» и «Лабтех» (Россия), «Panreac» (Испания), «AppliChem» и «Merk» (Германия), «Acros Organics» (Бельгия).

Эксперименты проводили на ионном хроматографе Shine CIC-D120 (Qingdao Shenghan Chromatograph Technology Co., Китай), укомплектованном изократическим насосом, кондуктометрическим детектором, электромембранным подавителем фонового сигнала, автоматической системой ввода пробы и термостатом колонки. Объем дозирующей петли составлял 25 мкл. Для сбора и обработки хроматографических данных использовали программное обеспечение «Shine 8.5» (Qingdao Shenghan Chromatograph Technology Co., Китай).

Синтез сорбента. Для синтеза анионообменника использовали 1.5 г матрицы ПС-ДВБ-ГМА, которую суспендировали в 5 мл этанола. После этого добавляли 20 см³ деионизованной воды и 0.35 ммоль ДМЭА на 1 г матрицы. Далее реакционную смесь помещали в термостат и непрерывно перемешивали в течение 2 ч при 60°С. После содержимое колбы фильтровали на вакуумной установке, промывали и высушивали.

В работе использовали стальную колонку размером 100 × 4 мм. Для получения суспензии сорбента использовали деионизованную воду (20 см³ на 1 г сорбента), а для упаковки колонки – 15 мМ раствор Na₂CO₃. Введение суспензии в хроматографическую колонку, упаковку и уплотнение частиц сорбента осуществляли при давлении 400 бар при помощи

насоса «Knauer K-1900» («Knauer», Германия). Тестирование колонки проводили при температуре 30°С.

Пробоподготовка. Подготовка проб пищевых вод состояла в разбавлении пробы. Для анализа газированного напитка его дегазировали на ультразвуковой ванне в течение 10 мин, затем разбавляли в 10 раз. Подготовка ополаскивателя для полости рта заключалась в отборе 15 см³ образца и дальнейшей твердофазной экстракции с помощью патрона «Chromabond C₁₈ ec f», содержащий сорбент на основе силикагеля с привитыми радикалами C₁₈ («Macherey-Nagel», Германия). Патрон предварительно активировали с помощью 5 см³ ацетонитрила с последующей промывкой деионизованной водой.

Обсуждение результатов

В данной работе синтезировали сорбент на основе ПС-ДВБ-ГМА. Эпоксидные группы на поверхности раскрывали действием избытка ДМЭА. Полученный анионообменник тестировали в режиме ИХ для изучения селективности и эффективности разделения различных групп анионов. Все опыты проводили в изократическом режиме элюирования с использованием в качестве элюента карбонатного буферного раствора 5.5 мМ NaHCO₃ + 0.6 мМ Na₂CO₃ и 1.8 мМ NaHCO₃ + 0.2 мМ Na₂CO₃ для слабоудерживаемых анионов (pH 9.3).

Для оценки гидрофильности можно использовать значение коэффициента селективности поляризуемого нитрата к хлориду: по снижению $\alpha(\text{NO}_3/\text{Cl}^-)$ можно судить о повышении степени гидрофиллизации [16, 17]. По снижению $\alpha(\text{NO}_3/\text{Br}^-)$ – об уменьшении влияния неионообменных взаимодействий. Также на увеличение гидрофильности и снижение степени сшивки функционального слоя указывает уменьшение $\alpha(\text{ClO}_3/\text{Cl}^-)$ и $\alpha(\text{ClO}_3/\text{NO}_3^-)$. Повышение степени экранирования ароматической матрицы можно оценить по снижению $\alpha(\text{BrO}_3/\text{Cl}^-)$.

Таблица 1. Коэффициенты селективности по парам, отражающим степень гидрофилизации функционального слоя в режиме ИХ, нормированные эффективности нитрата относительно хлорида полученного анионообменника и ранее описанных в литературе

Table 1. Selectivity coefficients for pairs reflecting the degree of hydrophilization of the functional layer in IC mode, normalized efficiencies of nitrate relative to chloride of the obtained anion exchanger and described previously in literature

Анионообменник	$\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-)$	$\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Br}^-)$	Ссылка
Анионообменник на основе сополимера ГМА-ДВБ, поверхностно модифицированного аллилглицидиловым эфиром и кватернизованного МДЭА	2.9	1.4	[20]
Анионообменник на основе сополимера ГМА-ПС-ДВБ, кватернизованного ТМА	4.3	1.5	[13]
Анионообменник на основе ПС-ДВБ, поверхностно модифицированного ГМА и ковалентно привитым ДМЭА	3.3	1.5	Данная работа

В статье [18] описали достаточно гидрофильный сорбент, полученный из аминированного ПС-ДВБ, на который действовали 1,4-бутандиолдиглицидиловым эфиром, а образующиеся концевые эпокси-группы обработали ДМЭА. Так, значение $\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-)$ составило 2.6. В работе [19] получили двухслойный гиперразветвленный анионообменник на основе матрицы, полученной по клик-реакции с цистеамином из сополимера аллилметакрилата и дивинилбензола. Значение $\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-)$ составляет 5.4, что говорит о его гидрофобности. Для сорбента, полученного в данной работе: $\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-) = 3.3$; $\alpha(\text{NO}_3^-/\text{Br}^-) = 1.5$; $\alpha(\text{ClO}_3^-/\text{Cl}^-) = 5.6$; $\alpha(\text{ClO}_3^-/\text{NO}_3^-) = 1.6$; $\alpha(\text{BrO}_3^-/\text{Cl}^-) = 1.9$. Можно заключить, что анионообменник обладает средней степенью гидрофилизации (табл. 1). Полученный сорбент позволяет эффективно разделить 7 стандартных неорганических анионов. Значение $N(\text{Cl}^-)$ составляет 15500 тт/м, а для остальных анионов от 6000 тт/м для нитрата и до 20000 тт/м для фторида.

На полученном сорбенте оксогалогениды элюируются позже хлорида, что ограничивает возможность определения хлорита и бромата в присутствии больших количеств хлорида. Также анионообменник обладает низкой селективностью по парам селенит/арсенат и хромат/тиосульфат. Стоит отметить, что с ростом

удерживания оксоанионов эффективность разделения уменьшается: с 19000 тт/м для селенита до 5000 тт/м для тиосульфата, форма пиков значительно ухудшается. Так, для сильнополяризуемого тиосульфата коэффициент асимметрии составил 6.0. Это указывает на недостаток полученного сорбента: разделение сильнополяризуемых анионов, в частности тиоцианата, перхлората и иодида, на нём не представляется возможным.

Для изучения селективности сорбента по отношению к слабоудерживаемым анионам одноосновных органических кислот снизили концентрацию компонентов элюента (1.8 мМ NaHCO_3 + 0.2 мМ Na_2CO_3). Стоит отметить, что $\alpha(\text{An}^-/\text{F}^-)$ достигает значения от 0.9 для галактуроната до 2.2 для глюконата. Для анионов двухосновных кислот значения $\alpha(\text{An}^{2-}/\text{SO}_4^{2-})$ от 0.8 для малата до 1.5 для адипата, при этом сульфат и малонат элюируются совместно. Разделение органических анионов происходит достаточно эффективно (8000-19000 и 14000-17000 тт/м для одно- и двухосновных кислот), но селективность полученной фазы по отношению к ним невысокая, в особенности по отношению к одноосновным кислотам.

На полученном сорбенте разделили модельные смеси, содержащие как неорганические, так и органические анионы.

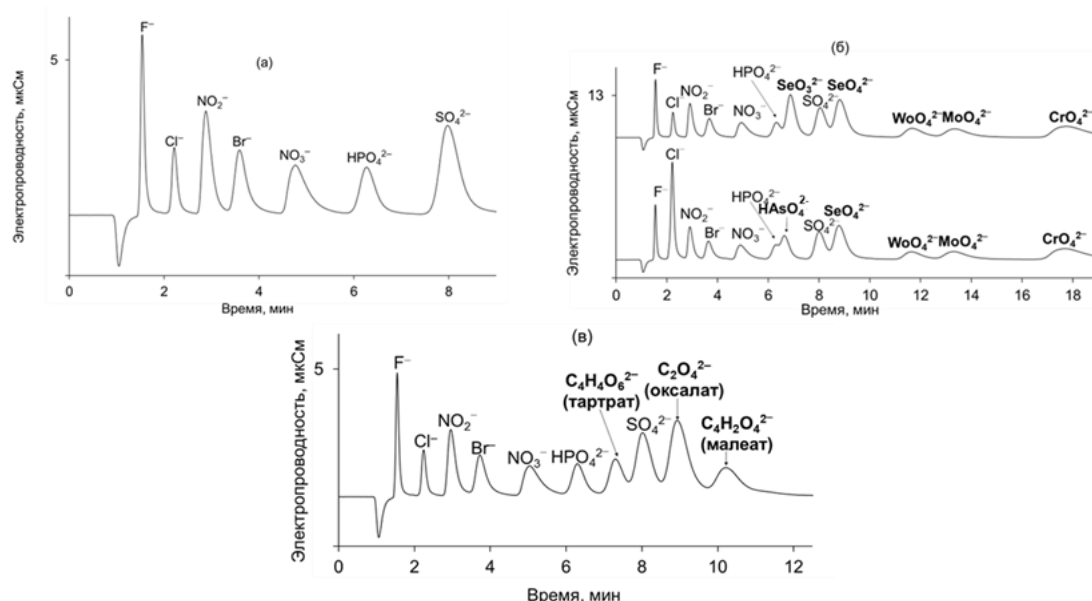


Рис. 1. Хроматограммы модельных смесей на полученном анионообменнике. (а) – 7 стандартных анионов, (б) – 7 стандартных анионов и 5 оксоанионов, (в) – 7 стандартных анионов и 3 двухосновных органических аниона. Скорость потока: 1 см³/мин.

Fig. 1. Chromatograms of model mixtures on the obtained anion exchanger. (a) – 7 standard anions, (b) – 7 standard anions and 5 oxyanions, (c) – 7 standard anions and 3 divalent organic acids. Flow rate: 1 ml/min.

Так, разделение 7 стандартных неорганических анионов происходит примерно за 9 мин, что по сравнению с [13] гораздо экспресснее. Кроме того, полученный сорбент способен разделить 7 стандартных неорганических анионов и 5 оксоанионов, включая селенит (или арсенат), селенат, вольфрамат, молибдат, хромат за 19 мин. За 11 мин осуществлено разделение смеси, содержащей 7 стандартных неорганических анионов и 3 двухосновных органических аниона – тартрата, оксалата, малеата (рис. 1).

Таким образом, полученный анионообменник на основе ПС-ДВБ-ГМА можно охарактеризовать лишь как фазу средней гидрофильности. Вероятно, для увеличения эффективности и селективности разделения необходимо проводить более сложный и многостадийный синтез, а также предварительную гидролитическую обработку матрицы для раскрытия непрореагировавших эпокси-групп и повышения степени экранирования её поверхности. Кроме того, в исследованиях

использовали карбонатный элюент, поскольку матрица неустойчива в сильно-щелочной среде. Возможно, для увеличения разрешения пиков стоит использовать более стабильные матрицы, совместимые с градиентным элюированием щёлочью. Достоинства данного сорбента состоят в том, что его получение занимает немного времени и затрат. Несмотря на неэффективное разделение сильно удерживаемых анионов, на данном анионообменнике смогли разделить смеси, содержащие до 12 анионов различной природы.

Высокая эффективность и скорость разделения 7 стандартных анионов с использованием доступного карбонатного элюента позволили найти практическое применение полученного анионообменника. Безусловно, это определение анионов в пробах воды, которое занимает важное место в аналитической химии. По наличию или отсутствию, а также концентрации анионов в пробе можно судить о возможности её загрязнения токсичными веществами. Например, присутствие бромида в пробе воды указывает на то, что,

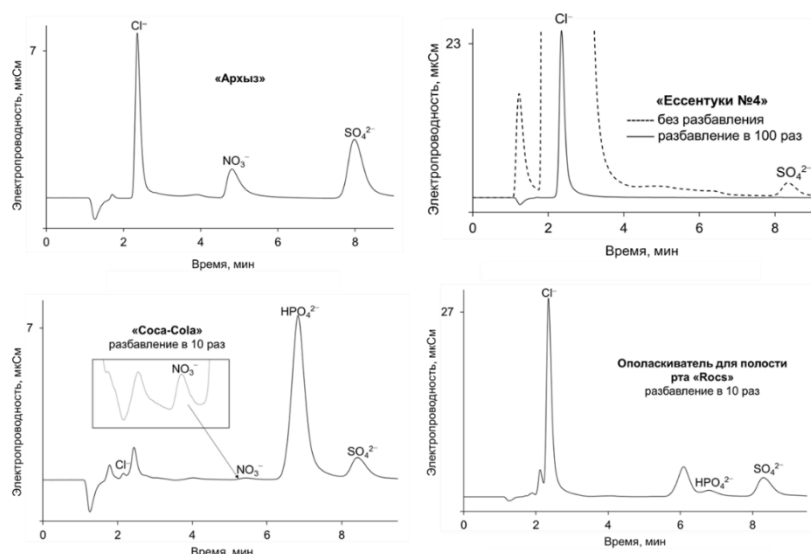


Рис. 2. Хроматограммы объектов на полученном сорбенте: питьевые воды «Архыз» и «Ессентуки №4», газированный напиток «Coca-Cola» и ополаскиватель для полости рта «Рос».

Fig. 2. Chromatograms of samples on the obtained resin: drinking waters «Arkhyz» and «Essentuki No. 4», carbonated drink «Coca-Cola» and mouthwash «Rocs».

Таблица 2. Содержание анионов и оценка правильности метода определения неорганических анионов в питьевых водах, напитке «Coca-Coal» и ополаскивателе для полости рта «Rocs» (n=3, P=0.95)

Table 2. Anion content and assessment of the accuracy of the method for determining inorganic anions in drinking water, drink «Coca-Coal» and mouthwash «Rocs» (n=3, P=0.95)

Объект	«Архыз»			«Ессентуки №4»		
Анион	В пробе без добавки, мг/л	Введено, мг/дм ³	Найдено, мг/дм ³	В пробе без добавки, мг/дм ³	Введено, мг/дм ³	Найдено, мг/дм ³
Cl ⁻	6.0±0.1	6.0	11.5±0.8	1900±300	2000	3300±400
NO ₃ ⁻	5.5±0.2	6.0	10.7±0.8	—	—	—
SO ₄ ²⁻	10.3±0.6	10.0	19.0±1.3	7.4±0.3	8.0	14.6±0.6
Объект	«Coca-Cola»			Ополаскиватель для полости рта «Rocs»		
Анион	В пробе без добавки, мг/дм ³	Введено, мг/дм ³	Найдено, мг/дм ³	В пробе без добавки, мг/дм ³	Введено, мг/дм ³	Найдено, мг/дм ³
Cl ⁻	19±1	10	25±5	230±30	200	410±30
NO ₃ ⁻	10±1	10	15±5	—	—	—
HPO ₄ ²⁻	600±100	500	1000±100	90±10	100	150±30
SO ₄ ²⁻	50±5	40	80±10	110±10	100	200±20

скорее всего, есть и бромат, если воду обрабатывают озонированием. Бромат является канцерогеном, а также превращается в токсичные вещества. Высокое содержание нитрата способствует образованию более токсичных соединений [21].

Анализ питьевых вод включает в себя определение 7 стандартных неорганических анионов, таких как фторид, хлорид, нитрит, бромид, нитрат, сульфат и фосфат. В качестве объектов анализа выбрали питьевые воды «Архыз» и «Ессентуки

№4» (рис. 2, табл. 2). В составе питьевой воды «Архыз» определили хлорид, нитрат и сульфат. В воде «Архыз» указано содержание хлоридов и сульфатов: 2-15 и 3-15 мг/дм³, соответственно. При анализе питьевой воды «Ессентуки №4» определяли хлорид и сульфат. Согласно анионному составу, указанному производителем, содержание хлорида и сульфата составляет 1300-1900 и 0.5-30 мг/дм³, соответственно. Найденные количества анионов в питьевых водах согласуются с заявленными производителями.

Кроме того, актуальной задачей современной ИХ также является одновременное определение неорганических и одно-, двух- и трёхосновных органических кислот. При производстве напитков используют такие регуляторы кислотности, как лимонная и фосфорная кислоты. В качестве объекта для определения анионов выбрали напиток «Coca-Cola», содержащий как цитрат-, так и сульфат-ионы [4]. Определение цитрат-иона не представлялось возможным на полученном анионобменнике с использованием карбонатного элюента, так как для этой задачи необходимо использование градиентного элюирования. Тем не менее, присутствие цитрата в напитке не мешает определению других анионов на разработанной колонке (рис. 2). В напитке были обнаружены хлориды, нитраты, гидрофосфаты и сульфаты (табл. 2). Также важной задачей при анализе напитков является определение оксалата, наличие которого влияет на риск образования камней в почках [4, 20]. В результате анализа оксалат-анионы не были обнаружены.

Стоит отметить, что определение содержания анионов в таких средствах личной гигиены, как ополаскиватели для полости рта, играет немаловажную роль. Авторы [22] провели исследование, заключающееся в изучении побочного влияния на организм человека компонентов, входящих в состав таких ополаскивателей. Важно, что эти объекты являются

многокомпонентными. В их состав помимо целевых веществ входят различные вспомогательные, такие как ПАВ, пенообразователи, стабилизаторы и др. Так, наличие антиоксидантов и консервантов, например, аскорбиновой и бензойной кислот, соответственно, может вызвать раздражение кожи. Безусловно, несмотря на пользу фторидов, его завышенное содержание может негативно влиять на состояние зубов. В составе также присутствуют ароматизаторы и подсластители, усложняющие пробоподготовку для определения анионов в режиме ИХ. В качестве объекта для анализа выбрали ополаскиватель для полости рта фирмы «Rocs», в котором определили хлорид, гидрофосфат и сульфат (рис. 2, табл. 2).

Пределы обнаружения 7 стандартных анионов находились в диапазоне 0.01-0.05 мг/л, а воспроизводимость в течение суток (s_r , $n=5$) составила менее 1%. Методом «введено-найденно» подтвердили правильность определения анионов (табл. 2).

Заключение

Таким образом, модифицирование диметилэтаноламином ПС-ДВБ-ГМА позволило получить анионообменник средней гидрофильности в одну стадию. Несмотря на трудности при одновременном определении сильно- и слабоудерживаемых анионов, полученный сорбент способен к разделению стандартных неорганических анионов, а также некоторых оксогоалогенидов и органических кислот. Полученный анионообменник использован для экспрессного и эффективного определения 7 стандартных неорганических анионов в питьевых водах, газированном напитке и ополаскивателе для полости рта с использованием доступного хроматографического оборудования с карбонатным элюентом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые

могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Rybakova E. *J. Anal.* 2014; 4: 76-82 (In Russ.)
2. Ztirakha A.V., Smolenkov A.D., Shpigun O.A. *Anal. Chim. Acta.* 2016; 904: 33-50.
3. Sýkora D., Řezanka P., Záruba K., Král V. *J. Sep. Sci.* 2019; 42: 89-129.
4. Weiss J. *Handbook of ion chromatography*. 4 ed. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2016. 1576 p.
5. Čoupek J., Vinš I. *J. Chromatogr. A.* 1994; 658(2): 391-398.
6. Auler L., Silva C., Collins K., Collins C. *J. Chromatogr. A.* 2005; 1073: 147-153.
7. McNeff C., Zhao Q., Carr P. *J. Chromatogr. A.* 1994; 684: 201-211.
8. Blackwell J., Carr P. *J. Chromatogr. A.* 1991; 549: 59-75.
9. Nesterenko P., Poole C., Sun Y. «Ion-Exchange Chromatography and Related Techniques». 1 ed. Amsterdam, Netherlands. Elsevier Pub. Co. 2023. 644 p.
10. Davankov V., Pavlova L., Tsyurupa M., Brady J., Balsamo M., Yousha E. *J. Chromatogr. B. Biomed. Sci. Appl.* 2000; 739: 73-80.
11. Bruzzoniti M.C., Mentasti E., Pohl C.A., Riviello J.M., Sarzanini C. *J. Chromatogr. A.* 2001; 925: 99-108.
12. Wheeler S.E., Houk K.N. *J. Phys. Chem. A.* 2010; 14: 8658-8664.
13. Liu J., Wang Y., Cheng H., Wang N., Wu S., Zhang P., Zhu Y. *Talanta.* 2016; 159: 272-279.
14. Dasgupta P., Maleki F. *Talanta.* 2019; 204: P. 89-137.
15. Nair L., Saari-Nordhaus R., Montgomery R. *J. Chromatogr. A.* 1997; 789: 127-134.
16. Ztirakha A.V., Pohl C.A. *J. Chromatogr. A.* 2023; 1706: 464218.
17. Gorbovskaya A.V., Popkova E.K., Uzhel A.S., Shpigun O.A., Ztirakha A.V. *J. Anal. Chem.* 2023; 78: 507-519 (In Russ.)
18. Shchukina O.I., Ztirakha A.V., Smolenkov A.D., Nesterenko P.N., Shpigun O.A. *J. Chromatogr. A.* 2015; 1408: 78-86.
19. Zhang K., Lou C., Zhu Y., Zhi M., Zeng X. *Talanta.* 2018; 184: 491-498.
20. Li Z., Chen X., Zhang F., Yang B. *Chin. J. Chromatogr.* 2022; 40: 730-735.
21. Rodgers A. *Urol. Res.* 1999; 27: 77-81.
22. Yazicioglu O., Ucuncu M., *Int. Dent. J.* 2024; 74: 223-241.

Информация об авторах / Information about the authors

Е.В. Погоня – студент кафедры аналитической химии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия, boss.pogonya@inbox.ru

А.В. Горбовская – к.х.н., н.с. кафедры аналитической химии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия, gorbovskaya_av@mail.ru

О.А. Шпигун – член-корр. РАН, д.х.н., г.н.с. кафедры аналитической химии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия, shpiguno@yandex.ru

А.С. Ужель – к.х.н., с.н.с. кафедры аналитической химии, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия, anna_uzhel@analyt.chem.msu.ru

E.V. Pogonya – student, department of Analytical chemistry, Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia, boss.pogonya@inbox.ru

A.V. Gorbovskaya – Researcher, Ph.D (chemistry), department of Analytical chemistry, Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia, gorbovskaya_av@mail.ru

O.A. Shpigun – Chief Researcher, Dr. habil. (chemistry), department of Analytical chemistry, Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia, shpiguno@yandex.ru

A.S. Uzhel – Senior Researcher, Ph.D (chemistry), department of Analytical chemistry, Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia, anna_uzhel@analyt.chem.msu.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 28.09.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 26.11.2025.