

УДК 543.

**М.Ф. Зуй, Л.В. Швидка, Л.С. Кифорук, С.А. Алексеев,
В.И. Герда, В.Н. Зайцев**

**СОРБЦИОННОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ IO_3^- И I^- НА
АНИОНТАХ АВ-17 И КРЕМНЕЗЕМАХ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ
АММОНИЕВЫМИ ГРУППАМИ**

Изучена возможность применения новых анионитов на основе кремнезёмов с ковалентно-иммобилизованными триметиламмонийпропильными и диметил-октадецил-аммонийпропильными группами для сорбционного концентрирования микроколичеств йодид- и йодат-ионов с их последующим спектрофотометрическим определением. Сорбционные свойства новых анионитов были сравнены со свойствами промышленного анионообменника АВ-17.

Ключевые слова: водопроводная вода, кремнезёмы с четвертичными аммонийными группами, сорбционное концентрирование йодид- и йодат-ионов.

Введение. Йод является важным биологически активным элементом, который принимает участие в процессах обмена веществ. Природное содержание соединений йода в воде и пищевых продуктах сильно зависит от региона и варьируется от долей до десятков мг/дм³ в природных водах и от 0,0001 до 10 мг/кг в пищевых продуктах. Снижение содержания йода в организме связано с хлорированием водопроводной воды, использованием консервантов и токсическим действием промышленных выбросов [1]. Недостаток йода в организме приводит к заболеваниям щитовидной железы, нарушениям умственного и физического развития.

Большое значение йода в биологии, а также низкое содержание его соединений в разных объектах обуславливают необходимость поиска селективных методов отделения, концентрирования и определения его соединений, в частности в формах I^- и IO_3^- .

В объектах окружающей среды йод находится преимущественно в виде I^- . Однако из-за неустойчивости этой формы к окислению пищевые продукты в большинстве стран мира искусственно йодируют солями IO_3^- . На сегодняшний день для определения форм нахождения йода в пищевых продуктах и воде используют ионную хроматографию [2 – 4]. Однако ее применение ограничено образцами с высоким содержанием (ммоль/дм³) определяемого вещества. Для достижения желаемой чувствительности и надежности определения микроколичеств йодид- и

© М.Ф. ЗУЙ, Л.В. ШВИДКА, Л.С. КИФОРУК, С.А. АЛЕКСЕЕВ, В.И. ГЕРДА, В.Н. ЗАЙЦЕВ, 2011

йодат-ионов необходимо их концентрирование и отделение от анионов, которые присутствуют в растворе в макроконцентрациях.

Для концентрирования галогенид-ионов широко применяются иониты на основе стирол-дивинилбензольных полимеров, оксида алюминия, гидроксидов титана и циркония [1, 5 – 7].

Цель данной работы – изучение возможности применения новых анионитов на основе кремнеземов с ковалентно-иммобилизованными триметиламмонийпропильными (ТМА-SiO₂) и диметилктадецил-аммонийпропильными (ОДМ-SiO₂) группами для сорбционного концентрирования микроколичеств йодид- и йодат-ионов с их последующим йодокрахмальным спектрофотометрическим определением. Сорбционные свойства новых сорбентов сравнивали со свойствами промышленного анионообменника АВ-17.

Методика эксперимента. Исходные 0,1 М растворы йодида и йодата калия готовили растворением точной навески соответствующей соли квалификации "х.ч." в дистиллированной воде. При этом концентрацию раствора KI проверяли титриметрически по методу Фольгарда [8]. Рабочие растворы KIO₃ и KI готовили разбавлением исходных растворов непосредственно перед применением. Все другие реактивы, которые использовали в работе, имели квалификацию "х.ч." и "ч.д.а."

pH растворов создавали с помощью ацетатного (pH 3 – 6,5) и боратного (pH 7,5 – 10) буферных растворов [9]. Кислотность контролировали с помощью pH-метра pH-673 со стеклянным электродом. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре СФ-46, толщина стеклянных кювет – 1 см.

Содержание йодид-ионов в водной фазе после сорбции определяли йодокрахмальным спектрофотометрическим методом после окисления I⁻ нитрит-ионами [10]. Остаточную концентрацию IO₃⁻ в растворе находили этим же методом после восстановления йодата до свободного йода йодид-ионами [10]. Градуировочные графики являются линейными в интервале концентраций 1,0·10⁻⁶ – 1,0·10⁻⁵ М для IO₃⁻ и 2,0·10⁻⁵ – 2,0·10⁻⁴ М – для I⁻. Уравнения градуировочных графиков имеют вид: $A = (0,02 \pm 0,01) + (7,28 \pm 0,11) \cdot 10^4 \cdot C$ – для IO₃⁻ и $A = (0,03 \pm 0,01) + (1,23 \pm 0,06) \cdot 10^4 \cdot C$ – для I⁻, где C – концентрация, М.

Анионит АВ-17 в Сг-форме готовили к работе по известной методике [11]. Сорбцию йодат- и йодид-ионов изучали в статических условиях. Методика определения оптимальных условий сорбции неорганических анионов заключалась в следующем: в плоскодонные колбы вносили по 0,05 – 0,10 г сорбента, добавляли буферный раствор с pH 2 – 10 и раствор йодида (йодата) калия, доводили объем раствора до 10 – 100 см³ дистиллированной водой и проводили сорбцию в течение 5 – 60 мин, используя перемешивающее устройство ЛАБ-ПУ-01. Количество йодид- и йодат-ионов после сорбции рассчитывали по указанным выше методикам.

Статическую обменную емкость (СОЕ) сорбентов АВ-17 и анионитов с четвертичными аммониевыми группами (ЧАГ-SiO₂) определяли следующим образом. К 0,5 – 1,0 г сорбента добавляли 25 см³ 0,01М раствора КIO₃ (КИ) и проводили сорбцию в течение 10 ч. Далее находили остаточную концентрацию соответствующих анионов по [10].

Степень извлечения ионов (*R*), полную статическую обменную емкость (ПСОЕ) сорбентов, коэффициент распределения (*k_d*) и фактор разделения ($\alpha_{A/B}$) рассчитывали по [11].

Для синтеза адсорбентов использовали следующие кремнийорганические соединения: октадецилдиметил-(3-триметоксисилилпропил)-аммоний хлорид [(CH₃)₂(C₁₈H₃₇)N⁺(CH₂)₃Si(OCH₃)₃]Cl⁻ (ОДМ) и триметил(3-триметоксисилилпропил)-аммоний йодид (ТМА). Последний синтезировали из аминопропилтриметоксисилана и метил йодида по реакции Гофмана, как описано в работе [12].

Для получения кремнеземных адсорбентов, содержащих ковалентно-закрепленные на их поверхности анионообменные группы ЧАГ, 10 г предварительно прокаленного при 450°С силикагеля Kieselgel Merck 60 (удельная площадь поверхности – 510 – 540 м²/г, размер частиц – 0,063 – 0,2 мм) помещали в круглодонную колбу и добавляли к нему раствор 10 ммоль ОДМ или ТМА в 50 см³ абсолютизированного ацетонитрила. Реакционную смесь перемешивали при 80°С в течение одних суток, кремнезем отфильтровывали, переносили в аппарат Сокслета и отмывали ацетонитрилом и водой. Полученные адсорбенты (ОДМ-SiO₂ и ТМА-SiO₂) высушивали в вакууме до постоянной массы (ТМА-SiO₂ предварительно переводили в бромидную форму путем промывки сорбента насыщенным водным раствором КВr).

Концентрацию ионообменных центров на поверхности адсорбентов устанавливали из данных аргентометрического титрования с потенциометрической (для ТМА-SiO₂) и кондуктометрической (для ОДМ-SiO₂) индикацией точки эквивалентности. При этом концентрация целевых групп составляла 0,33 и 0,44 ммоль/г соответственно для ТМА-SiO₂ и ОДМ-SiO₂.

Результаты и их обсуждение. Для исследуемых анионитов была определена ПСОЕ по каждому выбранному аниону (табл. 1). Значения ПСОЕ для АВ-17 больше по сравнению с ТМА-SiO₂ и ОДМ-SiO₂. Более низкие значения ПСОЕ для ЧАГ-SiO₂ были предсказуемыми и объясняются меньшим содержанием функциональных групп на органоминеральных ионообменниках по сравнению с полимерными ионообменными смолами. Для всех исследуемых ионообменников их емкость по отношению к йодат-ионам является меньшей по сравнению с йодид-ионами. Это согласуется с данными о характере изменения сродства сильноосновных анионитов к неорганическим однозарядным анионам, увеличивающимся в ряду F⁻ < Cl⁻ < BrO₃⁻ < IO₃⁻ < Br⁻ < I⁻ < ClO₄⁻ [13].

Таблица 1. Величины полной статической обменной емкости анионитов для IO_3^- и I^-

| Сорбент | C_L , мкмоль/г | a , мкмоль/г | |
|---------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| | | по IO_3^- | по I^- |
| АВ-17 | 1000 | 210 | 500 |
| ТМА- SiO_2 | 330 | 30 | 100 |
| ОДМ- SiO_2 | 440 | 20 | 80 |

Большее сродство анионов к ионитам соответствует и большим константам равновесия при ионном обмене. Например, константы равновесия для I^- и IO_3^- для сильноосновного анионита Дауекс 1, который имеет триметил-аммониевые группы, равняются соответственно 8,7 и 0,2 [13]. Меньшую емкость анионитов по отношению к йодат-ионам можно объяснить также высокой гидрофильностью IO_3^- , поэтому и ассоциативная связь IO_3^- –ЧАГ будет слабее по сравнению с парой I^- –ЧАГ [14, 15].

В табл. 2 приведены коэффициенты распределения, которые были рассчитаны для АВ-17, ТМА- SiO_2 и ОДМ- SiO_2 в области Генри.

Таблица 2. Коэффициенты распределения (k_d) и факторы разделения (α) IO_3^- и I^- на АВ-17 и SiO_2 -ЧАГ ($m_c=0,1$ г)

| Сорбент | k_d , см ³ /г | | α I^-/IO_3^- |
|---------------------|----------------------------|------------------|-------------------------------------|
| | IO_3^- | I^- | |
| АВ-17 | $3,8 \cdot 10^3$ | $1,0 \cdot 10^4$ | 2,63 |
| ОДМ- SiO_2 | $1,0 \cdot 10^3$ | $1,0 \cdot 10^4$ | 10,0 |
| ТМА- SiO_2 | $7,4 \cdot 10^2$ | $1,0 \cdot 10^4$ | 13,5 |

При сорбции йодид-ионов k_d имеет максимальное значение для всех исследуемых сорбентов и составляет $1,0 \cdot 10^4$ см³/г. Таким образом, йодид-ионы обладают одинаковым высоким сродством ко всем исследуемым сорбентам. Для йодат-ионов коэффициент распределения больший для АВ-17, чем для ТМА- SiO_2 и ОДМ- SiO_2 . Следовательно, они проявляют большее сродство к АВ-17.

Близкие коэффициенты распределения I^- и IO_3^- для АВ-17 приводят к невозможности их полного разделения на последнем. Действительно, расчет фактора разделения ($\alpha_{\text{АВ}}$) для пары I^- и IO_3^- показал, что для АВ-17

он не превышает трех, тогда как для ОДМ-SiO₂ и ТМА-SiO₂ эта величина >10 (см. табл. 2).

Получены изотермы сорбции йодат- и йодид-ионов на ионообменниках, которые можно отнести к изотермам L-типа (рис. 1) [16]. Это свидетельствует о высоком сродстве анионов к выбранным ионообменникам. В данном случае сорбция проходит за счет действия электростатических сил, т. е. имеет место ионный обмен:

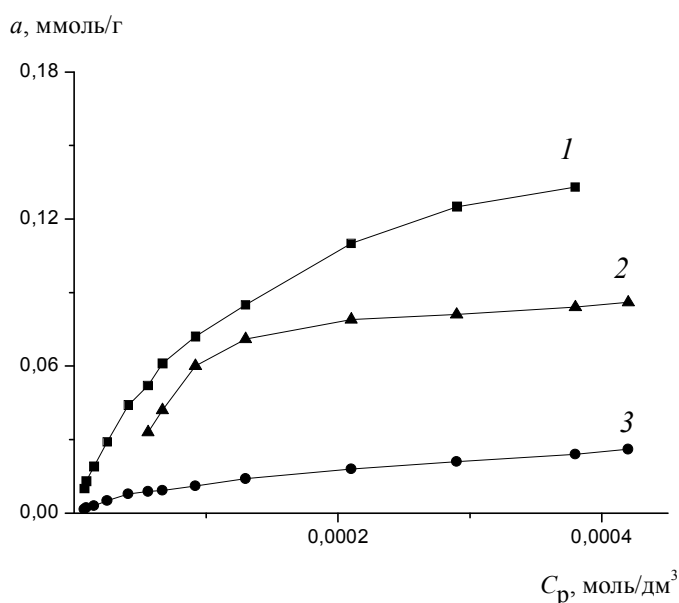


Рис. 1. Изотерма сорбции I⁻ (1) и IO₃⁻ (3) на ТМА-SiO₂ и I⁻ (2) на ОДМ-SiO₂. рН 5; V = 10 см³; m_c = 0,05 г. Продолжительность сорбции, мин: 5 – (1,3), 15 (2)

Исследована кинетика сорбции IO₃⁻ и I⁻ на анионитах АВ-17, ОДМ-SiO₂ и ТМА-SiO₂. Показано, что время достижения равновесия для йодат-ионов составляет 10 – 15 мин, а степень извлечения последних составляет соответственно больше 90 и 80% (рис.2). Для йодид-ионов степень извлечения на АВ-17 и ТМА-SiO₂ достигает 100% уже через 5 мин. На ОДМ-SiO₂ адсорбционное равновесие устанавливается через 10 мин. Более длительное время достижения равновесия для йодат-ионов может быть обусловлено большим гидратированным радиусом данного иона и трудностью его диффузии в поры анионитов, а также его более высокой гидрофильностью по сравнению с йодид-ионами [14].

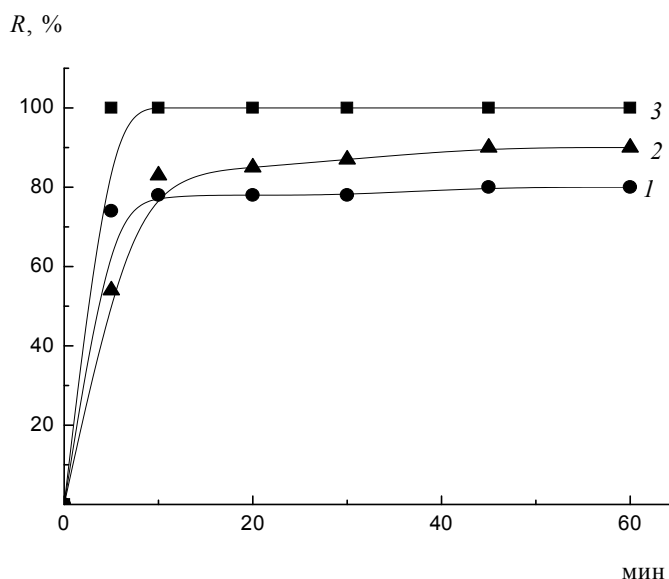


Рис. 2. Графики зависимости степени извлечения IO_3^- и I^- от времени. Сорбция IO_3^- на ТМА- SiO_2 (1), АВ-17 (2); I^- на АВ-17, ТМА- SiO_2 и ОДМ- SiO_2 (3). $C_{\text{I}^-} = 1 \cdot 10^{-4}$, $C_{\text{IO}_3^-} = 5 \cdot 10^{-5} \text{M}$; $V = 10 \text{ см}^3$; $m_c = 0,05 \text{ г}$; $\text{pH} 5$

Изучено влияние pH раствора на степень извлечения анионов. Максимальная степень извлечения IO_3^- на всех анионитах наблюдается в диапазоне pH 4 – 7 (рис. 3). Для I^- степень извлечения на АВ-17 и ОДМ- SiO_2 не зависит от pH раствора в интервале от 2 до 7 и достигает 100%, а на ТМА- SiO_2 оптимальный интервал pH составляет 4,5 – 7.

Причиной сужения pH-диапазона сорбции на ЧАГ- SiO_2 , возможно, является диссоциация остаточных силанольных групп на кремнеземе, которые уже в слабощелочной среде имеют отрицательный заряд [17]. В результате одноименно заряженные I^- и IO_3^- могут отталкиваться от поверхности, что снижает их степень извлечения.

Для сорбентов АВ-17 и ТМА- SiO_2 было исследовано влияние соотношения объема раствора к массе сорбента на степень извлечения анионов. Установлено, что степень извлечения I^- не зависит от изменения объема раствора в диапазоне 10 – 100 см^3 при массе навески 0,05 – 0,1 г. Для IO_3^- степень извлечения снижается при увеличении соотношения V/m (рис.4). Максимальная степень извлечения IO_3^- на обоих сорбентах наблюдается при $V/m = 100$. Исходя из оптимальных соотношений V/m , коэффициент концентрирования ($K_{\text{конц}}$) может достигать 1000 для концентрирования I^- на АВ-17 и ТМА- SiO_2 , а 100 – для IO_3^- .

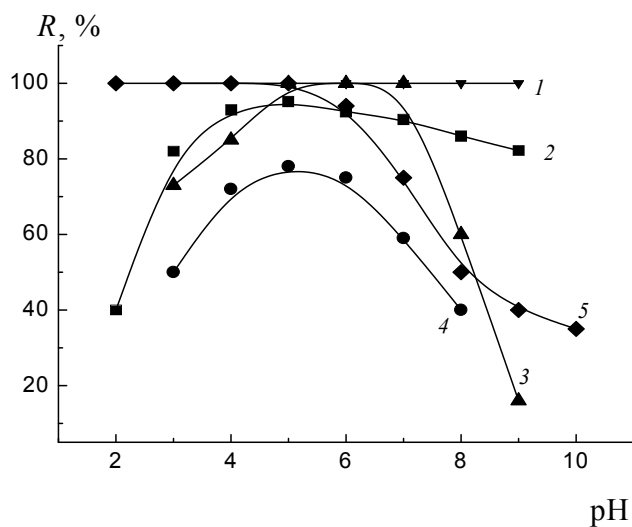


Рис. 3. Графики зависимости степени извлечения I^- и IO_3^- от pH раствора. Сорбция I^- на АВ-17 (1), ТМА- SiO_2 (3), ОДМ- SiO_2 (5); IO_3^- на АВ-17 (2), ТМА- SiO_2 (4). $C_{I^-} = 1 \cdot 10^{-4}$, $C_{IO_3^-} = 5 \cdot 10^{-5}$ М; $V = 10$ см³; $m = 0,05$ г; $t = 15$ мин

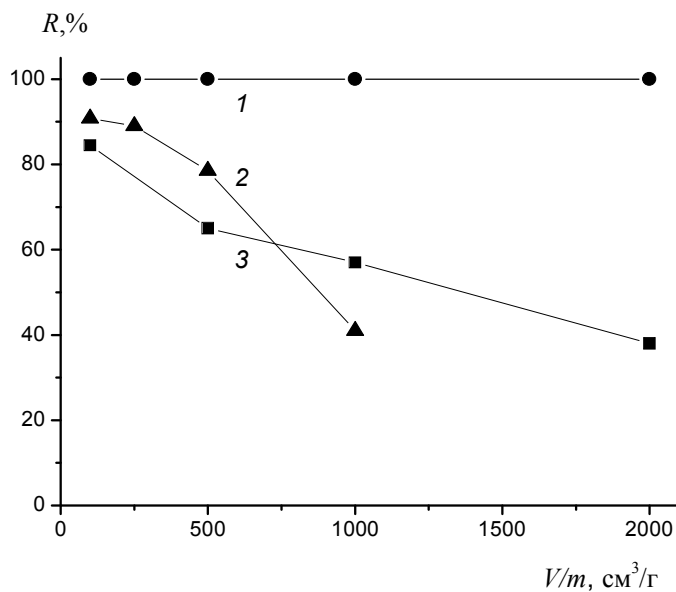


Рис. 4. Графики зависимости степени извлечения I^- ионами АВ-17 и ТМА- SiO_2 (1); IO_3^- – АВ-17 (2) и ТМА- SiO_2 (3) от V/m . $t = 15$ мин; pH 5

Изучено мешающее влияние Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- и HPO_4^{2-} в концентрациях, характерных для природных вод, на степень извлечения исследуемых ионов. Показано, что присутствие данных анионов не влияет на сте-

пень извлечения Γ сорбентами ТМА-SiO₂ и ОДМ-SiO₂; IO₃⁻ при таких условиях извлекаются неполностью (рис. 5). Особенно сильно снижается степень извлечения IO₃⁻ при высоких концентрациях посторонних ионов (200 – 250 мг/дм³). Поэтому сорбенты ТМА-SiO₂ и ОДМ-SiO₂ нежелательно использовать для извлечения IO₃⁻ при высоком солевом фоне реальных объектов.

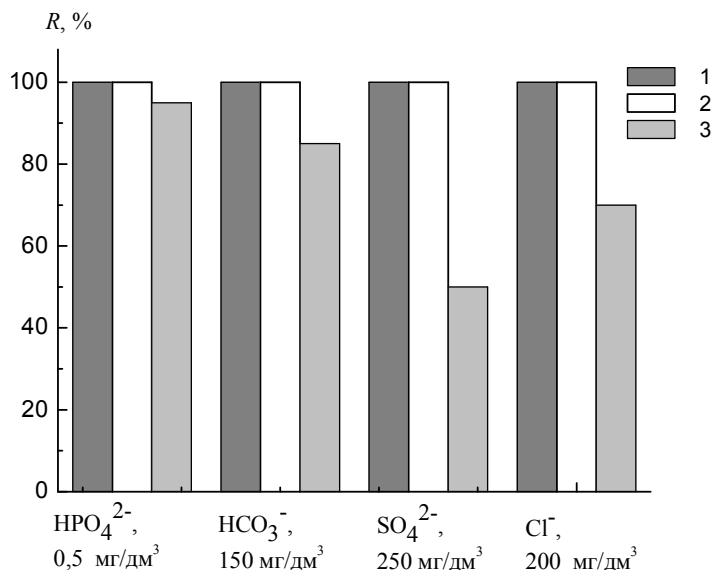


Рис. 5. Диаграмма сорбции I⁻ на ТМА-SiO₂ (1) и ОДМ-SiO₂ (2) и IO₃⁻ на ТМА-SiO₂ (3) в присутствии мешающих анионов. C_{I⁻} = 1 · 10⁻⁴ моль/дм³, C_{IO₃⁻} = 5 · 10⁻⁵ М; V = 10 см³

Исследована возможность элюирования Γ и IO₃⁻ с поверхности АВ-17 и модифицированных кремнезёмов. Известно, что лучшими элюентами для галогенсодержащих неорганических анионов являются растворы KNO₃, NaNO₃, NaOH, KOH, KHCO₃, NaHCO₃ [1, 7]. Нами в качестве элюентов были применены растворы 1 М KNO₃ и 2,5 М NaNO₃. Степени извлечения Γ и IO₃⁻ в изучаемых системах приведены в табл. 3. Таким образом, элюирование 1 М KNO₃ и 2,5 М NaNO₃ можно применять для извлечения IO₃⁻ с АВ-17 и ТМА-SiO₂ и Γ с ТМА-SiO₂. Невозможность элюирования Γ и IO₃⁻ с ОДМ-SiO₂ подтверждается литературными данными о повышении устойчивости ионных ассоциатов йодид-ионов с ЧАГ с увеличением гидрофобности радикалов при четвертичном аммонийном азоте [14, 15]. Эти данные особенно ярко выражены для органиоминеральных ионообменников [18, 19].

Таблица 3. Степень извлечения I^- и IO_3^- с сорбентов АВ-17 и ЧАГ-SiO₂

| Сорбент | Степень извлечения I^- , % (элюент – 2,5 М NaNO ₃) | Степень извлечения IO_3^- , % (элюент – 1М KNO ₃) |
|----------------------|---|--|
| АВ-17 | 40 | 70 |
| ТМА-SiO ₂ | 100 | 70 |
| ОДМ-SiO ₂ | 5 | 15 (2,5 М NaNO ₃) |

Методика определения йодат-ионов в водопроводной воде. Разработана методика предварительного выделения и концентрирования IO_3^- из водопроводной воды на ТМА-SiO₂ с последующим спектрофотометрическим определением.

К 100 см³ пробы воды добавляли 5 см³ ацетатного буферного раствора при рН 5 и перемешивали, после чего этот раствор переносили в конические колбы на 200 – 300 см³, содержащие по 0,2 г ТМА-SiO₂. Растворы перемешивали на механическом встряхивателе в течение 20 мин. Затем сорбент отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и обрабатывали три раза по 2,5 см³ 1М раствором KNO₃. Элюат собирали в мерные колбы на 10 см³, добавляли по 0,4 см³ 1М H₂SO₄, 0,4 см³ 0,5% KI и 0,4 см³ 1%-ного раствора крахмала. Раствор доводили до 10 см³ дистиллированной водой, перемешивали и измеряли оптическую плотность при 575 нм против холостого раствора в кювете с $l = 2$ см.

Методика была проверена методом "введено – найдено". Результаты определения IO_3^- приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты определения IO_3^- в водопроводной воде ($V_{пр} = 25$ см³; $m_c = 0,1$ г; $V_{эл} = 5$ см³; $P = 0,95$; $n = 3$)

| Номер раствора | C(IO_3^-), М | | S_r |
|----------------|---------------------|---|-------|
| | Введено | Найдено | |
| 1 | $5,0 \cdot 10^{-7}$ | $5,2 \cdot 10^{-7} \pm 1,0 \cdot 10^{-7}$ | 0,10 |
| 2 | $7,0 \cdot 10^{-7}$ | $7,2 \cdot 10^{-7} \pm 1,0 \cdot 10^{-7}$ | 0,07 |
| 3 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | $1,1 \cdot 10^{-6} \pm 1,4 \cdot 10^{-7}$ | 0,05 |

Примечание. $V_{пр}$ – объем пробы, $V_{эл}$ – объем элюента.

Предложенная методика определения йодат-ионов характеризуется удовлетворительной точностью и воспроизводимостью.

В табл. 5 приведены метрологические характеристики методики сорбции и элюирования Γ^- и IO_3^- на ТМА-SiO₂. Коэффициенты концентрирования равны 10 для обоих ионов, диапазоны рабочих концентраций составляют $3 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$ М и $5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$ М соответственно для IO_3^- и Γ^- .

Таблица 5. Метрологические характеристики методики концентрирования Γ^- и IO_3^- на сорбенте ТМА-SiO₂ ($V_{\text{исх}} = 100 \text{ см}^3$; $m_c = 0,1 \text{ г}$)

| Ионы | $R, \%$ | $R_{\text{эл}}, \%$ | $V_{\text{исх}}/V_{\text{кон}}$ | $K_{\text{конц}}$ | Интервал концентраций, М |
|-----------------|---------|---------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| IO_3^- | 80 | 70 | 100/10 | 10 | $3 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5}$ |
| Γ^- | 100 | 100 | 100/10 | 10 | $5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$ |

Примечание. R – степень извлечения ионов на сорбент; $R_{\text{эл}}$ – степень элюирования ионов сорбента.

Выводы. Таким образом, исследованы новые сорбенты: триметиламонийпропилкремнезем и октадецилдиметиламоний- γ -пропилкремнезем; сравнены их сорбционные свойства по отношению к Γ^- и IO_3^- с промышленным анионитом АВ-17. Показано, что ионы Γ^- имеют одинаково высокое сродство ко всем трем исследуемым ионитам; ионы IO_3^- проявляют наибольшее сродство к АВ-17. Также показано, что разделение Γ^- и IO_3^- будет проходить намного эффективнее на модифицированных кремнеземах ТМА-SiO₂ и ОДМ-SiO₂, чем на АВ-17. Преимуществом ЧАГ-кремнеземов является высокая скорость сорбции и возможность практически полного элюирования Γ^- и IO_3^- , сорбированных на ТМА-SiO₂. Полученные результаты позволяют использовать кремнезем ТМА-SiO₂ для концентрирования микроколичеств йодид- и йодат-ионов из водных растворов с последующим спектрофотометрическим определением.

Резюме. Вивчена можливість застосування нових аніонітів на основі кремнеземів з ковалентно імобілізованими триметиламонійпропільними та диметилдоктадециламонійпропільними групами для сорбційного концентрування мікрокількостей йодид- та йодат-іонів з їх наступним спектрофотометричним визначенням. Сорбційні властивості нових сорбентів були порівняні з властивостями промислового аніонообмінника АВ-17.

*M.F. Zui, L.V. Shvydka, L.S. Kyforuk, S.A. Alekseev,
V.I. Gerda, V.N. Zaitsev*

**SORPTION PRECONCENTRATION OF IO_3^- AND I^-
ON ANIONITES AV-17 AND SILICA GELS WITH QUATERNARY
AMMONIUM GROUPS**

Summary

The possibility of application new anionites has been studied on the basis of silica gels with covalently immobilized trimethylammoniumpropyl- and dimethyloctadecylammoniumpropyl-groups for sorption preconcentration of microquantities of I^- and IO_3^- with their subsequent spectrophotometric determination. Sorption properties of new sorbents have been compared with properties of commercial anionite AV-17.

1. *Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С.* Химия и технология брома, йода и их соединений. – М.: Химия, 1995. – 432 с.
2. *Bichsel Y., Gunten U.* // Anal. Chem. – 1999. – **71**. – P.34 – 38.
3. *Hou Xiaolin, Dahlgaard H., Rietz B., Jacobsen U., Nielsen S.P.* // J. Radioanal. and Nuclear Chem. – 2000. – **244**, N1. – P. 87 – 91.
4. *Leiterer M., Truckenbrodt D., Franke K.* // Eur. Food Res. Technol. – 2001. – **213**. – P. 150 – 153.
5. *Золотов Ю.А., Кузьмин Н.М.* Концентрирование микроэлементов. – М.: Химия, 1982. – 228 с.
6. *Уильямс Дж.* Определение анионов. – М.: Химия, 1982. – 662 с.
7. *Мархол М.* Ионообменники в аналитической химии. Свойства и применение в неорганической химии. – М.: Мир, 1985. – Ч. 1,2. – 545 с.
8. *Коростелев П.П.* Реактивы и растворы в металлургическом анализе. – М.: Металлургия. 1977. – 400 с.
9. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. – М.: Химия, 1989. – 448 с.
10. *Бабко А.К., Пилипенко А.Т.* Фотометрический анализ. Методы определения неметаллов. – М.: Химия, 1982. – 360 с.
11. *Белявская Т.А., Большова Т.А., Брыкина Г.Д.* Хроматография неорганических веществ. – М.: Высш. шк., 1986. – 206 с.
12. *Mery E., Alekseev S. A., Zaitsev V. N., Barbier D.* // Sensors and Actuators, B. – 2007. – **126**, N1. – P. 120 – 125.
13. *Инцеди Я.* Применение комплексов в аналитической химии. – М.: Мир, 1979. – 376 с.
14. *Mbuna J., Takayanagi T., Oshima M., Motomizu S.* // J. Chromatogr., A. – 2004. – **1022**, N1/2. – P. 191 – 200.
15. *Лусу С.А.* // Ibid. – 1999. – **850**, N1/2. – P. 319 – 337.
16. *Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Под ред. Г. Парфита и К. Рочестера* – М.: Мир, 1986. – 488 с.

17. *Модифицированные кремнеземы в сорбции, катализе и хроматографии* /Под ред. Г.В. Лисичкина. – М.: Химия, 1986. – 248 с.
18. *Kholin Y.V., Zaitsev V.N.* // Pure Appl. Chem. – 2008. – **80**, N 7. – P. 1561 – 1592.
19. *Ganesan V., Walcarius A.* // Langmuir. – 2004. – **20**. – P. 3632 – 3640.

Нац. ун-т им. Т. Г. Шевченко,
г. Киев, Украина

Поступила 19.11.2010