

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.06:546.271:543.554.6

ИОНОСЕЛЕКТИВНЫЙ МЕМБРАННЫЙ ЭЛЕКТРОД  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКТАГИДРОТРИБОРАТ-АНИОНА

© 2023 г. А. В. Копытин<sup>а</sup>, Е. С. Турышев<sup>а, \*</sup>, М. Ш. Мадраимов<sup>б</sup>, А. С. Кубасов<sup>а</sup>,  
К. Ю. Жижин<sup>а</sup>, Л. К. Шпигун<sup>а</sup>, Н. Т. Кузнецов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

\*e-mail: tyrishev@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 27.09.2022 г.

Разработан ионоселективный электрод (ИСЭ) на основе пластифицированной поливинилхлоридной мембраны, химически допированной октагидротриборатом тетрадециламмония ( $[(C_{10}H_{21})_4N^+][B_3H_8^-]$ ). Показано, что электрод обладает обратимым потенциометрическим откликом по отношению к октагидротриборат-анионам в присутствии ряда других неорганических анионов. Исследовано влияние концентрации электродно-активного вещества и природы пластификатора в фазе мембраны на электрохимические характеристики изготовленного сенсора. Найден оптимальный состав ионочувствительной мембраны. Установлено, что разработанный сенсор обеспечивает широкий диапазон определяемых концентраций  $B_3H_8^-$  ( $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$ ) и низкий предел их обнаружения ( $10^{-7.3}$  М). Новый ИСЭ может быть рекомендован для прямого потенциометрического детектирования свободных октагидротриборат-анионов в технологических водных растворах.

**Ключевые слова:** октагидротриборат-анион, полимерная мембрана, октагидротриборат тетрадециламмония

**DOI:** 10.31857/S0044457X22601432, **EDN:** GWLWQG

ВВЕДЕНИЕ

Бороводороды интенсивно изучаются на протяжении многих лет [1–5]. В семействе боргидридных соединений октагидротриборат-анион ( $B_3H_8^-$ ) занимает промежуточное положение и представляет особый научно-практический интерес, поскольку широко используется для получения высших полиэдрических бороводородов, а также является ключевым интермедиатом при дегидрировании многих боргидридов [6–11]. Однако несмотря на то, что  $B_3H_8^-$  достаточно хорошо исследован, его количественное определение в водных растворах изучено мало [12, 13]. Эффективным подходом к решению этой задачи представляется применение мембранного ионоселективного электрода (ИСЭ), обратимого к  $B_3H_8^-$ . Следует отметить, что в настоящее время ИСЭ на основе полимерных мембран, являясь важной разновидностью потенциометрических сенсоров, успешно применяются для экспрессного контроля содержания различных ионов в природных и

технологических растворах [14–17]. Это объясняется в первую очередь их замечательной доступностью с точки зрения простоты аппаратного оформления и низкой стоимости анализа, а также тем, что они практически не оказывают никакого воздействия на анализируемый раствор.

Цель работы – создание ИСЭ на основе октагидротрибората тетрадециламмония ( $[(C_{10}H_{21})_4N^+][B_3H_8^-]$ ), введенного в пластифицированную поливинилхлоридную мембрану (**ПВХ-мембрана**), и изучение возможности его использования для потенциометрического определения активности (концентрации) свободных ионов  $B_3H_8^-$  в водных растворах. Аналитический сигнал ИСЭ, регистрируемый в условиях, близких к нулевому току, и соответствующий измерению величины электродвижущей силы (э. д. с. =  $\Delta E = E_{ИСЭ} - E_{ЭС}$ ) электрохимической системы, позволит обеспечить экспрессное детектирование  $B_3H_8^-$  в широком концентрационном диапазоне и относительную простоту интерпретации полученных результатов.

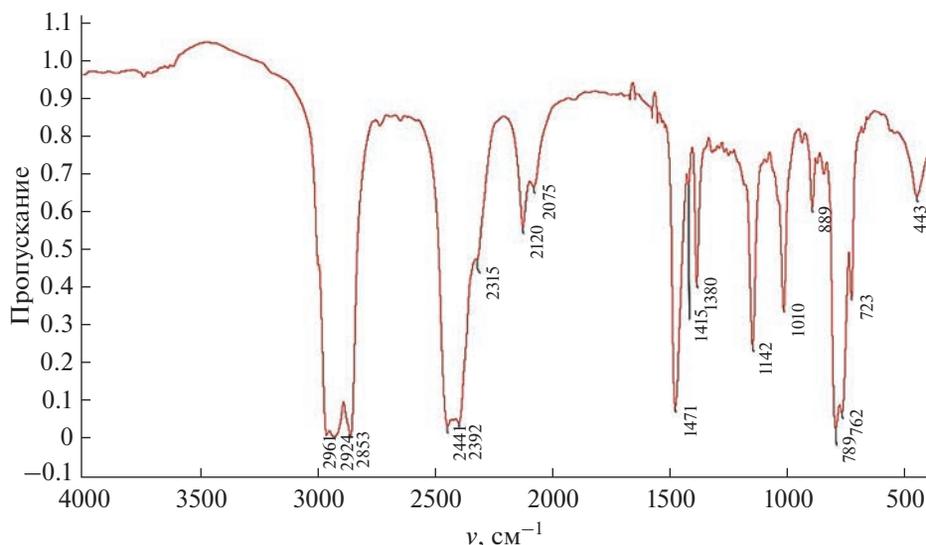
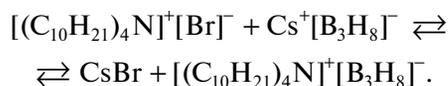


Рис. 1. ИК-спектр приготовленного образца октагидротрибората тетрадециламмония.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Реагенты и растворы.** В качестве исходных использовали реактивы марки “ч. д. а.” или “х. ч.”: 2-нитрофенилоктиловый эфир (*о*-НФОЭ), дибутилфталат (ДБФ), *трис*(2-этилгексил)фосфат (ТЭГФ), *бис*(1-бутилпентил)адипат (ББПА), а также бромид тетрадециламмония, поливинилхлорид (ПВХ, high molecular weight, Selectophore, Fluka), хлористый метилен ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) и свежеперегнанный тетрагидрофуран (ТГФ). Соль октагидротрибората цезия  $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$  была синтезирована и идентифицирована в лаборатории химии легких элементов и кластеров ИОНХ РАН [18, 19]. Исходный раствор  $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$  (0.1 М) готовили путем растворения точной навески препарата  $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$  (1.734 г) в 100 мл деионизированной воды. Остальные рабочие растворы ( $(0.01-1) \times 10^{-8}$  М) были приготовлены путем последовательного разбавления исходного.

**Получение электродно-активного вещества (ЭАВ).** Октагидротриборат тетрадециламмония получали методом жидкостной ионообменной экстракции:



С этой целью 20 мл 0.01 М раствора бромид тетрадециламмония в  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  смешивали с 25 мл 0.01 М водного раствора октагидротрибората цезия. Органическую фазу отделяли в делительной воронке и промывали 100 мл воды. Степень замещения бромид-ионов в исходной соли определяли, контролируя их содержание в водной фазе с помощью бромид-ИСЭ с твердой мембраной на

основе смеси сульфида и бромид серебра. После двухкратной экстракции регистрировали количественное замещение бромид-ионов анионами  $\text{B}_3\text{H}_8^-$  в органической фазе. Полученную органическую фазу переносили в чашку Петри. После удаления хлористого метилена при комнатной температуре получили порошок белого цвета — октагидротриборат тетрадециламмония  $[(\text{C}_{10}\text{H}_{21})_4\text{N}][\text{B}_3\text{H}_8]$ , который использовали в качестве ЭАВ. Химический состав порошка был подтвержден с помощью элементного химического анализа, методами ИК- и  $^{11}\text{B}$  ЯМР-спектроскопии (рис. 1, 2).

Так, полосы поглощения при 1390 и 1470  $\text{cm}^{-1}$  были отнесены к деформационным колебаниям C–H метильных и метиленовых групп, а интенсивная полоса поглощения при 720  $\text{cm}^{-1}$  — к колебаниям углеродных цепей типа  $[-\text{CH}_2-]_n$  при  $n > 4$  (рис. 1). Полоса поглощения при 910  $\text{cm}^{-1}$  характерна для аниона  $\text{B}_3\text{H}_8^-$  [19]. Регистрируемый в спектрах  $^{11}\text{B}$  ЯМР мультиплет с химическим сдвигом  $\delta = -29.0$  свидетельствует о наличии бора в октагидротриборат-анионе (рис. 2а).

**Изготовление ИСЭ с пластифицированными ПВХ-мембранами.** Для получения пластифицированных ПВХ-мембран использовали ранее разработанную методику [20]. Точную навеску ЭАВ сначала растворяли в пластификаторе, а затем смешивали с заранее приготовленным раствором ПВХ в ТГФ. Полученную смесь тщательно перемешивали и переносили в стеклянное кольцо с внутренним диаметром 28 мм, расположенное на гладкой стеклянной поверхности. Сверху кольцо накрывали 5 мм слоем фильтровальной бумаги,

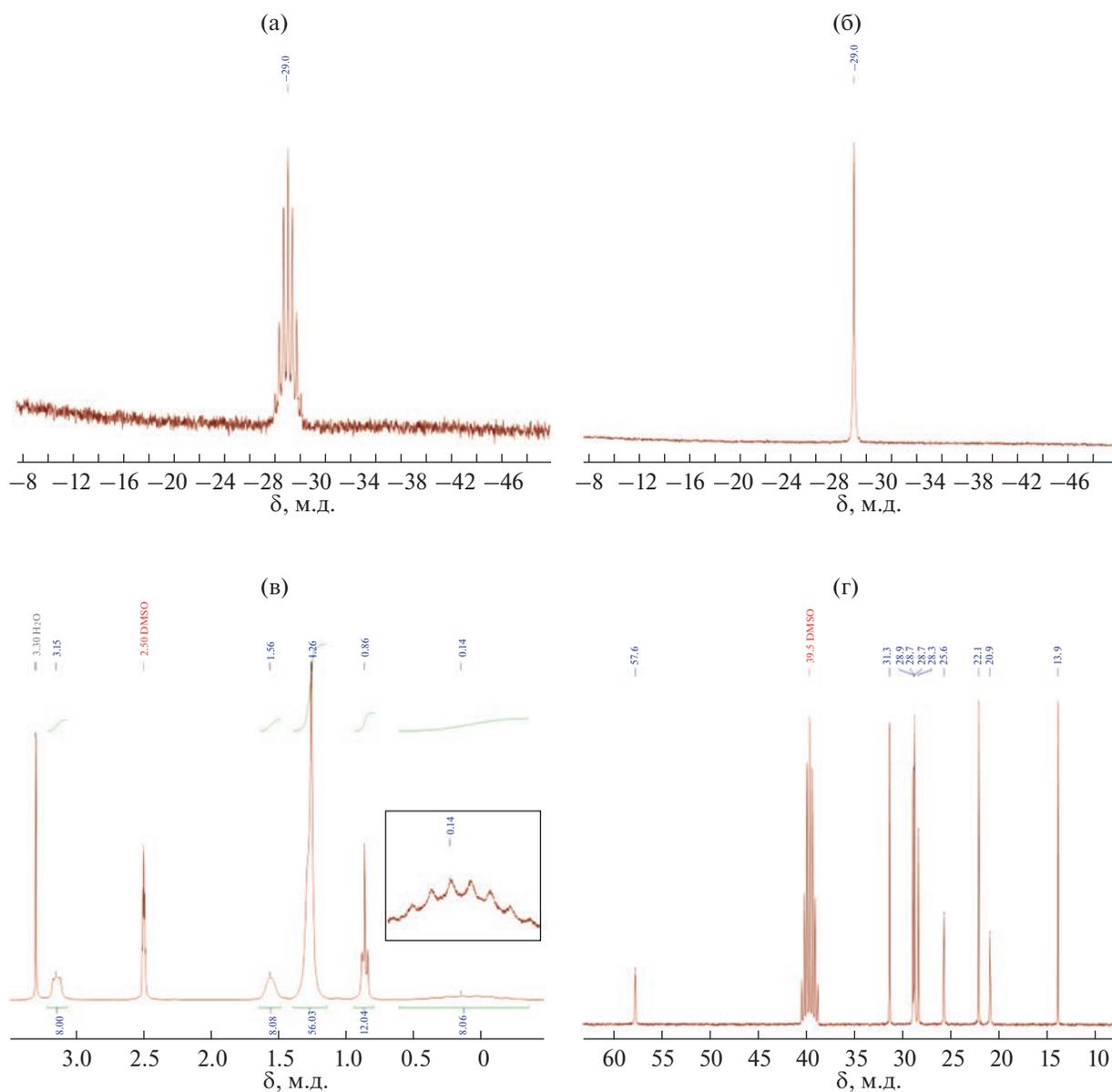


Рис. 2. ЯМР-спектры, характеризующие образец октагидротрибората тетрадециламмония:  $^{11}\text{B}$  ЯМР (а),  $^{11}\text{B}\{-^1\text{H}\}$  ЯМР (б),  $^1\text{H}$  ЯМР (в),  $^{13}\text{C}$  ЯМР (г).

которую придавливали свинцовым грузом (для равномерного испарения ТГФ с поверхности). После испарения ТГФ в термостате при  $32^\circ\text{C}$  в течение 48 ч мембрану выдерживали под вакуумом в течение 60 мин. В итоге получали прозрачную полимерную пленку со средней толщиной  $\sim 0.3$  мм. Далее из нее вырезали диски диаметром 9.5 мм, которые помещали в стандартный корпус

фирмы электрода Philips IS 561. Перед работой изготовленный сенсор выдерживали в  $1 \times 10^{-4}$  М растворе  $\text{Cs}[\text{B}_3\text{H}_8]$  в течение 15–30 мин.

**Методы анализа и аппаратура.** Потенциометрические измерения проводили с помощью рН-ионоанализатора Radelkis OP-300, используя гальваническую цепь следующего вида:

Ag/AgCl	3 М KCl, AgCl <sub>насыщ</sub>	Исследуемый раствор	Мембрана	Внутренний раствор сравнения	AgCl/Ag
---------	--------------------------------	---------------------	----------	------------------------------	---------

**Таблица 1.** Зависимость потенциометрических характеристик ИСЭ, полученных в растворах Cs[B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>], от концентрационного содержания ЭАВ в фазе мембраны

Состав мембраны, мас. %			$c_{\text{мин}}, \text{М}$	$s,$ мВ/декада	Линейный концентрационный диапазон отклика, М	Дрейф потенциала, мВ/ч
ЭАВ	ПВХ	ДБФ				
0.5	29.0	70.5	$\sim 9 \times 10^{-8}$	59.0	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$	$\pm 2 - 4$
0.8	29.0	70.2	$5 \times 10^{-8}$	57.9	$8 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-2}$	$\pm 0.2$
1.0	29.0	70.0	$3 \times 10^{-7}$	55.4	$5 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-2}$	$\pm 0.1$

В качестве внутреннего раствора сравнения использовали  $1 \times 10^{-3}$  М раствор перхлората калия, выбранный с учетом достаточно низкой энергии гидратации перхлорат-аниона. Внешним электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод Radelkis OP-0820. Электродную функцию регистрировали в диапазоне  $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-1}$  М с использованием свежеприготовленных растворов Cs[B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>], начиная с растворов с меньшей концентрацией аниона. Электродный потенциал фиксировали как среднеарифметическое трех значений, различающихся не более чем на 0.5 мВ. Исследуемые растворы перемешивали при помощи магнитной мешалки. Температура в процессе измерений составляла  $25 \pm 1$  °С.

Элементный анализ ЭАВ на содержание углерода и водорода выполняли на автоматическом газоанализаторе CHNS\_3 FA 1108 Elemental Analyser (Carlo Erba). ИК-спектры получали на ИК-Фурье-спектрометре ИНФРАЛИОМ ФТ-02 в диапазоне  $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ . Образцы готовили диспергированием исследуемого вещества в вазелиновом или фторированном масле Fluorolube. Спектры ЯМР <sup>1</sup>H, <sup>11</sup>B, <sup>13</sup>C растворов [(C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>)<sub>4</sub>N][B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>] в DMSO-d<sub>6</sub> записывали на импульсном Фурье-спектрометре Bruker MSL-300 (ФРГ) на частотах 300.3, 96.32 и 75.49 МГц соответственно с внутренней стабилизацией по дейтерию. В качестве внешних стандартов использовали тетраметилсилан и эфират трехфтористого бора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования прошлых лет показали, что перспективным путем создания мембранных ИСЭ с анионной функцией является использование электродно-активных веществ с предсказуемыми ионообменными свойствами. Для определения активности (концентрации) неорганических анионов в жидких средах наибольшее распространение получили электроды на основе мембран, допированных ЭАВ с заряженными активными центрами (ионные ассоциаты с крупными органическими катионами, способные в той или иной степени диссоциировать в фазе мембраны) [21–23]. В частности, ионные ассоциаты высших чет-

вертичных аммониевых оснований с различной стерической доступностью обменного центра хорошо зарекомендовали себя в качестве ЭАВ в анион-селективных электродах [24–26]. В связи с этим нами был изготовлен ИСЭ с ПВХ-мембраной, содержащей ассоциат октагидротриборат-аниона с тетрадециламмонием [(C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>)<sub>4</sub>N][B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>], и изучено его поведение в водных растворах соли Cs[B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>].

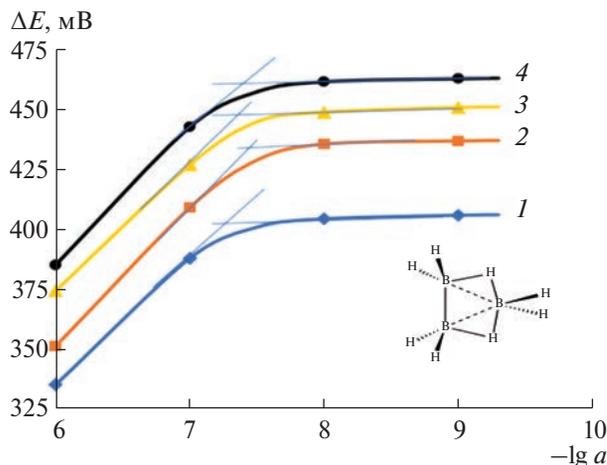
Классическая полимерная мембрана ИСЭ представляет собой трехкомпонентную композицию: ЭАВ–пластификатор–полимерная матрица, свойства которой в значительной степени зависят от природы и соотношения мембранообразующих компонентов. При этом электроаналитические параметры сенсоров на основе ионных ассоциатов существенно зависят как от содержания ЭАВ, так и от природы пластификатора в фазе мембраны. Селективность потенциометрического отклика таких сенсоров, как правило, определяется энергией гидратации (сольватации) определяемого аниона и специфичностью его взаимодействия с центром связывания [27]. Поэтому основное внимание при разработке нового ИСЭ нами было уделено вопросу оптимизации состава ионочувствительной ПВХ-мембраны.

**Выбор концентрации ЭАВ.** В результате изучения зависимости потенциометрического отклика изготовленных ИСЭ на основе ПВХ-мембраны, пластифицированной ДБФ и содержащей разные количества [(C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>)<sub>4</sub>N][B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>], было установлено, что сенсор, содержащий в фазе мембраны 0.8 мас. % ЭАВ, показывает наилучшие результаты по отношению к иону V<sub>3</sub>H<sub>8</sub><sup>-</sup> (табл. 1).

При увеличении содержания ЭАВ в полимерной композиции наблюдали ухудшение нижнего предела обнаружения ( $c_{\text{мин}}$ ) октагидротриборат-аниона в растворе, что можно объяснить ростом активности потенциалопределяющего аниона в поверхностном мембранном слое относительно водного раствора. При уменьшении содержания ЭАВ в полимерной композиции наблюдали нестабильность регистрируемого потенциала. Последнее, вероятно, связано с уменьшением ионообменных центров в фазе мембраны.

**Зависимость отклика электрода от природы пластификатора.** Другим важным параметром, который следует учитывать для достижения наилучших характеристик ионочувствительных сенсоров, является природа пластификатора, используемого в составе мембраны. Пластификатор, составляющий, как правило, >60% массового состава мембраны, служит растворителем мембранообразующих соединений, определяет степень ассоциации образующихся ионных пар и обеспечивает ее диэлектрические и механические свойства [28–30]. В качестве пластификаторов нами были изучены ДБФ, *o*-НФОЭ, ББПА и ТЭГФ, различающиеся природой активных групп, длиной радикала и величинами диэлектрической проницаемости. При сравнении использовали соотношение мембранных компонентов, соответствующих следующему составу мембранной фазы (мас. %): ЭАВ – 0,8, пластификатор – 70,2, ПВХ – 29,0. Результаты, полученные при изучении влияния природы пластификатора на потенциометрический отклик по отношению к ионам  $V_3H_8^-$ , представлены на рис. 3 и суммированы в табл. 2.

Согласно полученным экспериментальным данным, все изготовленные сенсоры показали практически одинаковый диапазон линейности электродной функции. Однако угловой коэффициент (крутизна  $S$ ) и диапазон выполнения электродной функции в области разбавленных растворов  $Cs[V_3H_8]$  оказались зависимыми от природы пластификатора. Наилучшие результаты с точки зрения крутизны электродной функции продемонстрировали сенсоры, содержащие ДБФ ( $\epsilon_\gamma = 6.4$ ) и ББПА ( $\epsilon_\gamma = 5.3$ ). Напротив, сенсоры, изготовленные с использованием более полярных пластификаторов, таких как ТЭГФ ( $\epsilon_\gamma = 9.9$ ) и *o*-НФОЭ ( $\epsilon_\gamma = 21.0$ ), показали субнернстовский наклон. Наименьшее значение нижнего предела обнаружения  $V_3H_8^-$  было установлено для ИСЭ на основе ДБФ, наибольшее – на основе *o*-НФОЭ. Очевидно, что при замене пластификатора про-



**Рис. 3.** Электродные функции ИСЭ на основе ПВХ-мембран, содержащих  $[(C_{10}H_{21})_4N]^+[V_3H_8]^-$  и различные пластификаторы, в разбавленных растворах  $Cs[V_3H_8]$ . Пластификаторы: 1 – *o*-НФОЭ; 2 – ДБФ; 3 – ТЭГФ; 4 – ББПА.

исходит изменение степени ассоциации ионной пары  $[(C_{10}H_{21})_4N]^+[V_3H_8]^-$  в мембранной фазе и активности (свободной концентрации) ионов  $V_3H_8^-$  на границе раздела фаз мембрана/раствор.

На рис. 4 представлена диаграмма, характеризующая коэффициенты потенциометрической селективности, рассчитанные для изученных мембранных систем с наилучшими электродными характеристиками методом смешанных растворов [31]. Видно, что исследуемые электроды проявляют избирательность по отношению к  $V_3H_8^-$ . При этом порядок изменения  $\lg K_{i,j}^{pot}$  соответствует известной шкале экстрагируемости неорганических анионов четвертичными аммониевыми основаниями, начиная с липофильного  $ClO_4^-$  и заканчивая гидрофильным  $SO_4^{2-}$  [32].

**Зависимость потенциометрического отклика от pH исследуемого водного раствора.** Для оценки ра-

**Таблица 2.** Характеристики потенциометрического отклика изученных ИСЭ в зависимости от природы пластификатора в фазе мембраны

Пластификатор	Уравнение регрессии	Диапазон линейности, М	$c_{мин}, М$
ДБФ	$\Delta E = 57.92 \lg a + 4.79$ ( $R^2 = 0.9997$ )	$1 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-8}$	$10^{-7.3}$
ББПА	$\Delta E = 58.81 \lg a + 33.04$ ( $R^2 = 0.9999$ )	$1 \times 10^{-2} - 9 \times 10^{-8}$	$10^{-7.2}$
<i>o</i> -НФОЭ	$\Delta E = 52.54 \lg a + 21.12$ ( $R^2 = 0.9983$ )	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-7}$	$10^{-7.0}$
ТЭГФ	$\Delta E = 54.19 \lg a + 49.43$ ( $R^2 = 0.9992$ )	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-7}$	$10^{-7.1}$

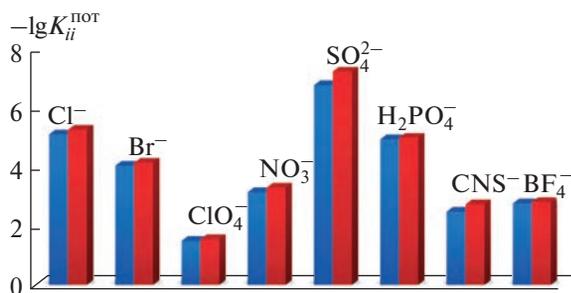


Рис. 4. Коэффициенты потенциометрической селективности ИСЭ на основе ПВХ-мембран, пластифицированных ДБФ (синий) и ББПА (красный).

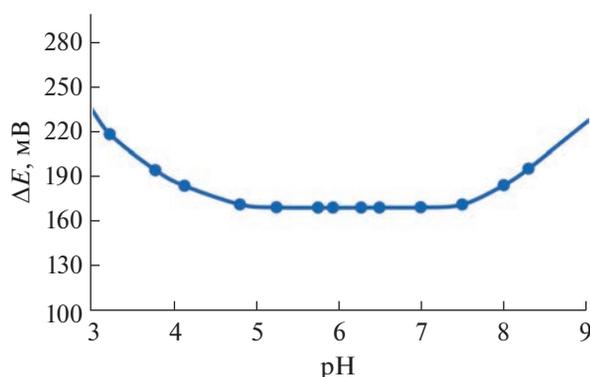


Рис. 5. Зависимость потенциометрического отклика ИСЭ с мембраной на основе ДБФ от pH водного раствора, содержащего  $1 \times 10^{-3}$  М Cs[B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>].

бочего pH-диапазона изготовленного сенсора с оптимальным составом мембраны, пластифицированной ДБФ, была получена зависимость электродного потенциала в  $1 \times 10^{-3}$  М растворах Cs[B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>] в интервале pH от 2 до 9. Из рис. 5 видно, что потенциометрический отклик сенсора практически не зависит от pH исследуемого раствора при pH 4.8–7.5.

Это подтверждает известные данные о том, что водные растворы солей октагидротриборатионов обладают достаточно высокой стабильностью [33]. Однако при  $4.5 \leq \text{pH} \leq 7.8$  наблюдается некоторый рост электродного потенциала, свидетельствующий об уменьшении свободной концентрации B<sub>3</sub>H<sub>8</sub><sup>-</sup> в щелочной и кислой среде.

На основании полученных данных можно заключить, что разработанный ИСЭ с пластифицированной ПВХ-мембраной, содержащей [(C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>)<sub>4</sub>N][B<sub>3</sub>H<sub>8</sub>] в качестве ЭАВ, характеризуется высокой чувствительностью и селективностью по отношению к B<sub>3</sub>H<sub>8</sub><sup>-</sup> в присутствии ряда неорганических анионов в широком интервале pH водного раствора. Разработанный электрод

может быть рекомендован для экспресс-анализа технологических водных растворов.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводили с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН и Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках проекта МК-207.2022.1.3.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stock A. The Hydrides of Boron and Silicon. Cornell University Press, 1933.
2. Bykov A. Y., Zhizhin K. Y., Kuznetsov N. T. // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. V. 59. № 13. P. 1539. <https://doi.org/10.1134/S0036023614130026>
3. Hagemann H. // Molecules. 2021. V. 26. № 24. P. 7425. <https://doi.org/10.3390/molecules26247425>
4. Kubasov A. S., Novikov I. V., Starodubets P. A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 7. P. 984. <https://doi.org/10.1134/S0036023622070130>
5. Avdeeva V. V., Kubasov A. S., Korolenko S. E. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 5. P. 628. <https://doi.org/10.1134/S0036023622050023>
6. Tumor L. B. // Журн. неорганической химии. 2003. V. 48. № 10. P. 1613.
7. Goedde D. M., Windler G. K., Girolami G. S. // Inorg. Chem. 2007. V. 46. № 7. P. 2814. <https://doi.org/10.1021/ic0621300>
8. Pylypko S., Zadick A., Chatenet M. et al. // J. Power Sources. 2015. V. 286. P. 10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.143>
9. Fu H., Wang X., Shao Y. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. № 1. P. 384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.081>
10. Moury R., Gigante A., Remhof A. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. № 35. P. 12168. <https://doi.org/10.1039/D0DT02170A>
11. Gigante A., Leick N., Lipton A. S. et al. // ACS Appl. Energy Mater. 2021. V. 4. № 4. P. 3737. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00159>
12. Суворцев Е. Л., Хаин Е. С., Шевченко Ю. Н. // Журн. аналит. химии. 1980. V. 35. № 7. P. 1439.
13. Копытин А. В., Жижин К. Ю., Быков А. Ю. Мембрана ионоселективного электрода для определения октагидротриборатного аниона. Пат. RU2621888C1, 2017.
14. Buck R. P. // Theory and principles of membrane electrodes. Ion-Selective Electrodes Anal. Chem. 1978. P. 1

15. Bakker E., Pretsch E. // *Angew. Chem.Int. Ed.* 2007. V. 46. № 30. P. 5660. <https://doi.org/10.1002/anie.200605068>
16. Zdrachek E., Bakker E. // *Anal. Chem.* 2019. V. 91. № 1. P. 2. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b04681>
17. Craggs A., Moody D.J., Thomas J.D.R. // *J. Chem. Educ.* 1974. V. 51. № 8. P. 541.
18. Bykov A.Y., Razgonyaeva G.A., Mal'tseva N.N. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2012. V. 57. № 4. P. 471. <https://doi.org/10.1134/S0036023612040055>
19. Bykov A.Y., Mal'tseva N.N., Generalova N.B. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2013. V. 58. № 11. P. 1321. <https://doi.org/10.1134/S003602361311003X>
20. Turyshev E.S., Kopytin A.V., Zhizhin K.Y. et al. // *Talanta.* 2022. V. 241. P. 123239. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123239>
21. Coetzee C.J., Freiser H. // *Chem.* 1969. V. 41. № 8. P. 1128.
22. Kopytin A.V., Zhizhin K.Y., Urusov Y.I. et al. // *J. Anal. Chem.* 2011. V. 66. № 7. P. 666. <https://doi.org/10.1134/S1061934811070070>
23. Kopytin A.V., Zhizhin K.Y., Urusov Y.I. et al. // *J. Anal. Chem.* 2012. V. 67. № 2. P. 168. <https://doi.org/10.1134/S1061934812020074>
24. Wegmann D., Weiss H., Ammann D. et al. // *Mikrochim. Acta.* 1984. V. 84. № 1–2. P. 1. <https://doi.org/10.1007/BF01204153>
25. Матвейчук Ю.В., Рахманько Е.М., Окаев Е.Б. Ионоселективные электроды на основе высших четвертичных аммониевых солей, обратимые к двухзарядным неорганическим анионам. Минск, 2018.
26. Matveichuk Y.V. // *Anal. Chem. Lett.* 2018. V. 8. № 4. P. 428.
27. Schaller U., Bakker E., Pretsch E. // *Anal. Chem.* 1995. V. 67. № 18. P. 3123. <https://doi.org/10.1021/ac00114a005>
28. Бережковская О.М., Макарова Е.Д., Матерова Е.А. // *Вестн. ЛГУ.* 1986. № 4. P. 65.
29. Смирнова А.Л., Грекович А.Л., Матерова Е.А. // *Электрохимия.* 1987. V. 10. P. 1187.
30. Kopytin A.V., German K.E., Zhizhin K.Y. et al. // *Sens. Actuators, B: Chem.* 2020. V. 310. P. 127853. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127853>
31. Buck R.P., Lindner E. // *Pure Appl. Chem.* 1994. V. 66. № 12. P. 2527. <https://doi.org/10.1351/pac199466122527>
32. Szigeti Z., Vigassy T., Bakker E. et al. // *Electroanalysis.* 2006. V. 18. № 13–14. P. 1254. <https://doi.org/10.1002/elan.200603539>
33. Huang Z., Chen X., Yisgedu T. et al. // *Inorg. Chem.* 2011. V. 50. № 8. P. 3738. <https://doi.org/10.1021/ic2000987>