УДК 541.135.5

# КОМПАКТЫ ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ С ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

© 2019 г. Ю. В. Плесков<sup>а, \*</sup>, М. Д. Кротова<sup>а</sup>, Е. А. Екимов<sup>b</sup>

<sup>а</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН Ленинский просп., 31, Москва, 119071 Россия <sup>b</sup>Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН Москва, Троицк, 142190 Россия \*e-mail: pleskov33@mail.ru Поступила в редакцию 19.06.2018 г. После доработки 19.06.2018 г. Принята к публикации 25.09.2018 г.

Компакты из легированного бором алмаза с предельно высоким уровнем легирования были получены при давлении 8-9 ГПа и температурах около 2500 К из смесей графита и 5 или 7% карбида бора (B<sub>4</sub>C). Содержание бора в алмазе, оцененное по параметру решетки алмаза (соответственно, 0.3573-0.3575 и 0.3576-0.3578 нм), имеет максимальное значение около 1-3 и 3-4%. Полученные компакты демонстрируют на примере реакции анодного выделения хлора наибольшую для всех известных алмазных, алмазсодержащих и алмазоподобных электродных материалов электрохимическую активность. В согласии с найденной ранее общей закономерностью для алмазных, алмаз-содержащих и алмазоподобных материалов, и в данном случае с ростом уровня легирования, заметен некоторый рост электроактивности материала (тока реакции электроокисления ионов хлора). Показана возможность использования электродов из высоколегированных бором алмазных компактов для электроаналитического определения этилендиаминтетрауксусной кислоты в водном растворе по току ее окисления.

*Ключевые слова*: алмаз, компакт, легирование бором, циклическая вольтамперометрия, электрохимический импеданс, годограф, этилендиаминтетрауксусная кислота **DOI:** 10.1134/S0424857019020075

## **ВВЕДЕНИЕ**

Электроды из синтетического алмаза за последние 30 лет после появления первой работы. посвященной их изучению [1], сделались привычным объектом электрохимических исследований [1-5]. Нами установлено, что электрохимическая активность алмазных, алмазсодержащих и алмазоподобных материалов повышается с ростом их электропроводности, независимо от природы этого роста. Действительно, проводимость полупроводниковых микрокристаллических алмазных CVD-пленок растет с увеличением концентрации легирующей примеси бора (акцептора) в результате повышения концентрации электронных дырок; проводимость азотированных нанокристаллического алмаза и алмазоподобного углерода – с ростом концентрации азота, по-видимому, из-за увеличения доли *sp*<sup>2</sup>-гибридизованного углерода, проводимость которого выше, чем *sp*<sup>3</sup>-гибридизованного углерода; проводимость отожженных в вакууме нелегированных алмазных CVD-пленок – с ростом температуры отжига, из-за роста количества проводящего "графитоподобного" углерода по межкристаллитным границам. Во всех этих случаях повышается электрохимическая активность: это наблюдается и для CVD-пленок [6], и для нанокристаллического алмаза [7], и для алмазоподобного углерода [8], и для нелегированных отожженных в вакууме алмазных пленок [9]. В цитированных работах электрохимическую активность электродов характеризовали в квазиобратимой окислительно-восстановительной системе ферро-феррицианид, измеряя либо непосредственно (методом электрохимического импеданса) сопротивление переноса заряда  $R_{\rm F}$ , обратно пропорциональное току обмена, либо разность потенциалов анодного и катодного пиков тока циклической вольтамперограммы. В частности, свойства алмазных СVD-пленок с ростом концентрации бора постепенно меняются от полупроводниковых к квазиметаллическим и, в конце концов, их электродное поведение становится квазиобратимым (коэффициент переноса α ~ 0.5, разность потенциалов анодного и катодного пиков при комнатной температуре  $\sim 60 \text{ мB}$ ).

Недавно мы добавили к перечисленным выше алмазным электродным материалам еще один их вид, а именно компакты из сильно легированного бором синтетического алмаза [10]. В настоящей работе исследованы компакты с очень высоким уровнем легирования бором. Для полноты представленной выше картины мы исследовали влияние изменения уровня легирования компактов на их электроактивность<sup>1</sup>. Дополнительно, была изучена принципиальная возможность применения электродов-компактов для электроаналитического определения органического вещества по току его окисления (на примере этилендиаминтетрауксусной кислоты, ЭДТУ).

# МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### Получение образцов

Синтез образцов осуществляли при давлениях 8-9 ГПа и температурах около 2500 К из смесей графита марки МГОСЧ (99.9999%) и карбида бора (99.4%). Смеси приготавливались перетиранием в ступке из яшмы. Параметры синтеза алмаза в системе карбид бора (В<sub>4</sub>С)-углерод были определены нами ранее [11], а подробности эксперимента при высоких давлениях и температурах представлены в работе [12]. Под давлением при температуре плавления эвтектики карбид бора-графит (около 2500 К) образуется жидкая ростовая среда, в которой растворяется графит и из которой кристаллизуется легированный бором алмаз. Согласно представлениям о строении фазовых диаграмм эвтектического типа с ограниченными твердыми растворами компонент, при температуре плавления эвтектики карбид бора-графит равновесная растворимость бора в алмазе должна быть максимальной. Продолжительность синтеза не превышала 10 с. Были получены цилиндрические компакты диаметром 3.5-4 и высотой 2.5 мм. Образцы отмывались в кипящей хлорной кислоте в течение 50 ч для удаления графита и карбида бора с поверхности образцов. На рис. 1 представлена дифрактограмма одного из образцов, полученного съемкой с торцевой поверхности компакта после кислотной обработки. Из анализа дифракционных данных следует, что алмаз и карбид бора В<sub>4</sub>С являются единственными фазами, присутствующими в образце.



Рис. 1. Дифрактограмма, иллюстрирующая фазовый состав алмазных компактов, полученных синтезом под давлением из смесей графита и карбида бора B<sub>4</sub>C.

На рис. 2 показаны микроструктуры торцевой поверхности образца после химической обработки и поверхности излома образца после его раскалывания. С использованием микрорентгеноспектрального анализа было изучено распределение бора и углерода на поверхности излома образца. Присутствие борсодержащих включений и отсутствие пустот на изломе указывают на сохранение исходной структуры в объеме образца после химической обработки. Данное исследование указывает на формирование в образце алмазной матрицы, фаза карбида бора в которой находится в виде изолированных неудаляемых кислотной обработкой включений.

В образцах, обозначенных E5 и E7, концентрация  $B_4C$  в шихте составляла, соответственно, 5 и 7%; параметр решетки алмаза в образцах определялся с использованием эталона кремния NIST640C и составил для этих двух образцов значения, соответственно, 0.3573–0.3575 и 0.3576–0.3578 нм. Этим значениям параметра решетки соответствуют концентрации бора в алмазе 1-3% [или (2–5) ×  $10^{21}$  см<sup>-3</sup>] и 3–4%, оцененные по ранее построенной зависимости параметра решетки алмаза от содержания бора в алмазе [13]. Концентрация бора в алмазе 3–4%, как следует из работы [13], является максимальной для алмаза, синтезированного при высоких давлениях.

#### Электрохимические измерения

Методика измерений описана в предыдущей статье [10]. Вкратце, мы исследовали образцы в форме дисков диаметром 3.5–4 и высотой 2.5 мм. Была использована ячейка с платиновым противоэлектродом. Площадь поверхности рабочего

Строго говоря, в идеальном случае все образцы-компакты должны были бы иметь одинаковый (предельно высокий) уровень легирования бором, а избыток бора должен выпадать в виде включений карбида бора. В реальности, однако, из-за конструктивных особенностей синтеза увеличение концентрации карбида бора в шихте способствует быстрому превращению графита в алмаз в сильно неравновесных условиях, что приводит к повышению уровня легирования материала.



**Рис. 2.** Микроструктуры поверхности образца после кислотной обработки (а) и излома образца после его раскалывания (б, в). Изображения излома в характеристическом рентгеновском излучении бора (г) и углерода (д) показывают присутствие обогащенного бором включения в алмазной матрице и относительно однородное распределение бора в алмазе.

электрода-компакта составляла ~0.1 см<sup>2</sup>. Значения потенциала в статье приводятся по отношению к хлорид-серебряному (1 M KCl) электроду сравнения (**XC**Э), а значения плотности тока и дифференциальной емкости отнесены к 1 см<sup>2</sup> геометрической поверхности электрода. Измерения проводили в растворе индифферентного электролита (1 M KCl).



**Рис. 3.** Поляризационные потенциодинамические кривые, снятые в 1 М растворе КСІ при анодной развертке потенциала для двух электродов-компактов с концентрацией бора 1–3% (Е5) и 3–4% (Е7).

Спектры электрохимического импеданса в интервале частот переменного тока f от 1 Гц до 20 кГц измеряли с помощью анализатора спектров SOLARTRON, модель 1280В (Великобритания), а при более высоких частотах (до 200 кГц) – моста переменного тока Р-5021 (Украина). Значения элементов эквивалентной схемы получали путем сравнения экспериментально измеренных годографов импеданса с теоретически рассчитанными годографами для выбранной эквивалентной схемы, а именно схемы Эршлера–Рэндлса, в которой дифференциальная емкость заменена на элемент постоянной фазы (СРЕ). Годографы импеданса – как снятые при заданном потенциале с разверткой по частоте переменного тока f (так называемые f-sweep), так и поляризационные, снятые на фиксированной частоте при развертке потенциала *E* (так называемые *E*-sweep) – получали с помощью анализатора спектров SOLARTRON. На нем же снимали циклические вольтамперограммы при скорости развертки потенциала 20 мВ/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

## Метод циклической вольтамперометрии

На рис. 3 приведены поляризационные потенциодинамические кривые, снятые в растворе КСІ при анодной развертке потенциала для двух электродов-компактов с концентрацией бора 1–3 и 3–4%. Как и для ранее исследованных компактов [10], кривые имеют широкую область идеальной поляризуемости, за которой следует резкий подъ-



**Рис. 4.** Циклическая вольтамперограмма фонового тока (1 М КСІ, образец Е7). Скорость развертки потенциала 20 мВ.

ем тока анодного выделения хлора в результате электроокисления ионов Cl<sup>-</sup>. В согласии со сформулированной выше закономерностью, и в данном случае с ростом уровня легирования заметен некоторый рост электроактивности материала (тока реакции).

На рис. 4 показана циклическая вольтамперограмма, снятая в области идеальной поляризуемости (фоновый ток). Этот фоновый ток для сильно легированного компакта составляет 50– 100 мкА см<sup>-2</sup>, что опять-таки несколько выше, чем для компактов с меньшей концентрацией бора [10]; но, в общем, он остается достаточно малым и не препятствует исследованию электрохимических процессов, протекающих в области потенциалов идеальной поляризуемости.

#### Метод электрохимического импеданса

Годограф импеданса "*f*-sweep" приведен на рис. 5. Его форма свидетельствует о наличии в эквивалентной схеме электрода элемента постоянной фазы (**CPE**), заменяющего в эквивалентной схеме Эршлера–Рэндлса дифференциальную емкость. Действительно, в области идеальной поляризуемости это – наклонная прямая, а при потенциалах электродной реакции – приплюснутые полуокружности. Присутствие СРЕ в эквивалентной схеме вообще характерно для алмазных электродов, хотя его природа так и остается не до конца выясненной [2]. Напомним, что импеданс СРЕ равняется  $Z_{CPE} = \sigma^{-1}(i\omega)^{-a}$ , где частотно-независимый множитель  $\sigma$  измеряется в единицах  $\Phi^a$  Ом<sup>1-a</sup> см<sup>-2</sup>, параметр *a* определяет характер



Рис. 5. Годограф импеданса "f-sweep" образца Е7.

частотной зависимости,  $\omega = 2\pi f -$ круговая частота переменного тока, а *i* – мнимая единица.

По данным рис. 5 были определены параметры эквивалентной схемы a и  $\sigma$ . В области идеальной поляризуемости параметр a мало зависит от потенциала (рис. 6а). Низкочастотная "емкость" (т.е., величина  $\sigma$  при условии a = 1) в области идеальной поляризуемости также мало зависит от потенциала, а в области выделения хлора растет (рис. 6б), что, вероятно, связано с появлением псевдоемкости электродной реакции.

Поляризационный годограф (*E*-sweep, рис. 7) имеет обычный для алмазных электродов вид [10, 14]: почти вертикальная "прямая" в области идеальной поляризуемости и вертикальная "полуокружность" (искаженная благодаря наличию СРЕ) в области выделения хлора; такая форма годографа не противоречит приведенной выше поляризационной кривой (рис. 3).

# Анодное окисление этилендиаминтетрауксусной кислоты

Область идеальной поляризуемости алмазных электродов простирается до весьма высоких положительных потенциалов, поэтому эти электроды хорошо подходят для исследования окисления органических веществ (в том числе трудно окисляемых) [3, 4]. Так, например, циклические вольтамперограммы анодного окисления бензола как на алмазном CVD-тонкопленочном электроде [15], так и на умеренно легированном бором алмазном компакте [16] содержат пик тока при потенциале 2 В (ХСЭ). Такова же циклическая



**Рис. 6.** Зависимости от потенциала параметров эквивалентной схемы *a* и σ (вычисленных по рис. 5).

вольтамперограмма бензола и на сильно легированном компакте (рис. 8)<sup>2</sup>. Но для выяснения возможности электроаналитического определения органического аналита мы остановились не на бензоле, а на этилендиаминтетрауксусной кислоте (ЭДТУ), потому что ее концентрацию можно удобно менять в более широких пределах.

Этилендиаминтетрауксусная кислота – распространенный умягчитель воды (а также ее загрязнитель, когда речь идет о сточных водах). В настоящей работе мы не ставим своей целью раз-



Рис. 7. Поляризационный годограф образца Е7, снятый при частоте переменного тока 140 Гц.



**Рис. 8.** Поляризационные потенциодинамические кривые, снятые в растворе  $1 \text{ M K}_2\text{SO}_4 + 0.02 \text{ M бензол.}$ 

#### ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 55 № 3 2019

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Кривая рис. 8 снята в растворе K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в качестве фона, а не KCl, так как окисление бензола происходит при более положительном потенциале, чем ЭДТУ. В растворе K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> область идеальной поляризуемости ограничена реакцией анодного выделения кислорода из воды, которая протекает при более положительных потенциалах, чем окисление Cl<sup>-</sup>, и потому пик тока бензола оказывается не искажен током фона и лучше выражен.



**Рис. 9.** Поляризационные кривые анодного окисления ЭДТУ на электроде Е7 (1 М КСІ). Концентрации ЭДТУ ( $\Gamma$ -экв  $\pi^{-1}$ ) указаны на кривых.

работать метод электроанализа этилендиаминтетрауксусной кислоты, а лишь хотим продемонстрировать потенциальную пригодность алмазных электродов-компактов для этой цели; поэтому мы ограничимся исследованием концентрационной зависимости тока окисления.

На рис. 9 показаны поляризационные кривые анодного окисления ЭДТУ, снятые при различных ее концентрациях. Несмотря на относительно близкие потенциалы этой реакции и реакции окисления фона (KCl), кривые имеют достаточно хорошо выраженный максимум тока, высота которого зависит от концентрации реагента. Плотность тока в максимуме (после вычета тока фона) оказалась пропорциональной концентрации с этилендиаминтетрауксусной кислоты в пределах от 0.001 до 0.05 г-экв л<sup>-1</sup> (рис. 10); уравнение линейной регрессии этой калибровочной кривой таково: j (мА см<sup>-2</sup>) = 0.09115 + 192.79 c (г-экв л<sup>-1</sup>), доверительная вероятность  $R^2 = 0.9992$ , чувствительность ~193 (мА л)/(г-экв см<sup>2</sup>). Отметим, что при анодном окислении ЭДТУ на алмазном CVD-тонкопленочном электроде [17] также была получена линейная калибровочная кривая с  $R^2 =$ = 0.9946, но токи были меньше.

Существенно, что на рис. 10 совмещены два графика, относящиеся к двум разным способам изменения концентрации ЭДТУ в ячейке. В одном случае эту концентрацию постепенно повышали, добавляя порциями концентрированный раствор ЭДТУ (метод стандартных добавок). В другом — была заранее приготовлена серия растворов различной концентрации. Как видно, ка-



Рис. 10. Калибровочная кривая определения ЭДТУ (1 М КСІ, образец Е7): (□) метод стандартных добавок; (■) серия растворов различной концентрации.

либровочные кривые в обоих случаях практически совпадают.

Поляризационный годограф анода-компакта в растворе KCl + ЭДТУ изображен на рис. 11а. Его снимали от более положительного потенциала, чем годограф на рис. 7, поэтому на нем практически отсутствует "вертикальная прямая", относящаяся к области идеальной поляризуемости, а осталась лишь "полуокружность". Годограф в растворе, содержащем ЭДТУ, отличается от такового в растворе фона (рис. 7) наличием "петли" в области тока окисления ЭДТУ, которая начинается при потенциале 1.34 В, близком к потенциалу полуволны окисления ЭДТУ. В конце концов, кривая вновь выходит на "полуокружность" реакции выделения хлора при 1.9 В. Истолковать этот годограф легче с помощью вычисленных из него зависимостей компонентов импеданса ImZ и ReZ от потенциала *E*, приведенных на рис. 116 вместе с кривой "ток-потенциал". Эти зависимости ImZ и ReZ, в общем, отражают ход тока с потенциалом. Величина сопротивления (ReZ) мало зависит от потенциала до начала сильного выделения хлора (~1.85 В), где она спадает, очевидно, за счет резкого уменьшения сопротивления переноса заряда  $R_{\rm F}$ . Одновременно падает и емкостное сопротивление ImZ, т.к. растет связанная с реакцией псевдоемкость. Эти совместные изменения и приводят к появлению "петли" на годографе. Существенно, что форма поляризационного годографа (рис. 11а) хорошо согласуется с формой независимо снятой поляризационной кривой (рис. 3).



Рис. 11. Поляризационный годограф анода-компакта Е7 (а), снятый в растворе 1 М КСІ + 0.01 М ЭДТУ при частоте 70 Гц; зависимости компонентов импеданса Im Z и Re Z от потенциала (б).

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрохимическая активность легированных бором алмазных электродов-компактов в реакции анодного выделения хлора несколько повышается с ростом уровня легирования материала, в согласии с найденной ранее общей для алмазных электродов закономерностью. Электрод-компакт из сильно легированного бором синтетического алмаза может служить индикаторным электродом при электроаналитическом определении этилендиаминтетрауксусной кислоты по току ее анодного окисления.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00033).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Плесков, Ю.В., Сахарова, А.Я., Кротова, М.Д., Буйлов, Л.Л., Спицын, Б.В. Фотоэлектрохимическое поведение полупроводникового алмаза. Электрохимия. 1987. Т. 24. С. 69–73. [Pleskov, Yu.V., Sakharova, A.Ya., Кротова, М.D., Bouilov, L.L., and Spitsyn, B.V., Photoelectrochemical behavior of semiconductor diamond, *Elektrokhimiya*, 1987, vol. 24, p. 69–73.]
- 2. Плесков, Ю.В. Электрохимия алмаза. Москва: Едиториал УРСС, 2003. 101 с. [Pleskov, Yu.V., *Electrochemistry of Diamond*, Moscow: Editorial URSS, 2003.]
- 3. *Electrochemistry of Diamond*, Eds. Fujishima, A., Einaga, Y., Rao, T.N., and Tryk, D.A., Tokyo: BKC & Amsterdam: Elsevier, 2005.
- 4. Synthetic Diamond Films: Preparation, Electrochemistry, Characterization and Applications, Eds. Brillas, E. and Martinez-Huitle, C.A., New York: Wiley, 2011.
- Topics in Applied Physics, vol. 121, Ed. Yang, N, Springer, 2015.
- Модестов, А.Д., Плесков, Ю.В., Варнин, В.П., Теремецкая, И.Г. Электроды из синтетического полупроводникового алмаза: исследование электрохимической активности в растворе окислительновосстановительной системы. Электрохимия. 1997. Т. 33. С. 60. [Modestov, A.D., Pleskov, Yu.V., Varnin, V.P., and Teremetskaya, I.G., Synthetic Semiconductor Diamond Electrodes: A Study of Electrochemical Activity in a Redox System Solution, Russ. J. Electrochem., 1997, vol. 33, p. 55.]
- Плесков, Ю.В., Кротова, М.Д., Ральченко, В.Г., Савельев, А.В., Божко, А.Д. Электрохимическое поведение азотированных нанокристаллических алмазных электродов. Электрохимия. 2007. Т. 43. С. 868. [Pleskov, Yu.V., Krotova, M.D., Ralchenko, V.G., Saveliev, A.V., and Bozhko, A.D., Electrochemical Behavior of Nitrogenated Nanocrystalline Diamond Electrodes, Russ. J. Electrochem., 2007, vol. 43, p. 837.]
- Плесков, Ю.В., Кротова, М.Д., Поляков, В.И., Хомич, А.В., Руковишников, А.И., Друз, Б.Л., Зарицкий, И.М. Электрохимические свойства пленок аморфного азотсодержащего гидрогенизированного алмазоподобного углерода. Электрохимия. 2000. Т. 36. С. 1141. [Pleskov, Yu.V., Krotova, M.D., Polyakov, V.I., Khomich, A.V., Rukovishnikov, A.I., Druz, B.L., and Zaritskii, I.M., Electrochemical Properties of Amorphous Nitrogen-containing Hydrogenated Diamondlike-Carbon Films, Russ. J. Electrochem., 2007, vol. 43, p. 1008.]
- Плесков, Ю.В., Кротова, М.Д., Ральченко, В.Г., Хомич, А.В., Хмельницкий, Р.А. Электроды из синтетического алмаза: фотоэлектрохимическое поведение отожженных в вакууме пленок нелегированного поликристаллического алмаза. Электрохимия. 2005. Т. 41. С. 343. [Pleskov, Yu.V., Kroto-

ЭЛЕКТРОХИМИЯ том 55 № 3 2019

va, M.D., Ralchenko, V.G., Khomich A.V., and Khmelnitskii R.A., Synthetic Diamond Electrodes: Photoelectrochemical Behavior of Vacuum-Annealed Undoped Polycrystalline Diamond Films, *Russ. J. Electrochem.*, 2005, vol. 41, p. 304.]

- Плесков, Ю.В., Кротова, М.Д., Елкин, В.В., Екимов, Е.А. Электрохимическое поведение нового электродного материала-компакта из легированного бором синтетического алмаза. Электрохимия. 2016. Т. 52. С. 3. [Pleskov Yu.V., Krotova M.D., Elkin V.V., and Ekimov E.A., Electrochemical Behavior of New Electrode Material: Compact of Boron-doped Synthetic Diamond, Russ. J. Electrochem., 2016, vol. 52, p. 1.]
- Ekimov, E.A., Sidorov, V.A., and Rakhmanina, A.V., High-Pressure Synthesis and Characterization of Superconducting Boron-Doped Diamond, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2006, vol. 7, p. S2–S6.
- 12. Ekimov, E.A., Sadykov, R.A., and Gierlotka, S., A High-Pressure Cell for High Temperature Experiments in a Toroid-Type Chamber, *Instrum. Exp. Tech.*, 2004, vol. 47, p. 276.
- Brazhkin, V.V., Ekimov, E.A., Lyapin, A.G., Popova, S.V., Rakhmanina, A.V., Stishov, S.M., et al., Lattice parameters and thermal expansion of superconducting boron-doped diamonds, Phys. Rev., 2006, vol. B 74, p. 140502.

- Elkin, V.V., Krotova, M.D., and Pleskov, Yu.V., Polarization complex-plane plot of impedance for two-stage charge-transfer reaction complicated with an intermediate adsorption (by example of benzene oxidation at boron-doped diamond electrode), *Electrochim. Acta*, 2014, vol. 144, p. 412–418.
- Плесков, Ю.В., Кротова, М.Д., Елкин, В.В., Варнин, В.П., Теремецкая, И.Г. Окисление бензола на аноде из легированного бором алмаза: исследование методом электрохимического импеданса. Электрохимия. 2011. Т. 47. С. 1043. [Pleskov Yu.V., Krotova M.D., Elkin V.V., Varnin, V.P., and Teremetskaya, I.G., Benzene Oxidation at Boron\_Doped Diamond Anode: an Electrochemical\_Impedance Spectroscopy Study, *Russ. J. Electrochem.*, 2011, vol. 47, p. 973.]
- Pleskov, Yu.V., Krotova, M.D., Elkin, V.V., and Ekimov, E.A., Electrochemical Behaviour of Borondoped Diamond Compacts—a New Electrode Material, *Electrochim. Acta*, 2016, vol. 201, p. 268.
- 17. Денисова, А.Е., Плесков, Ю.В. Электроаналитическое определение ЭДТА на тонкопленочном аноде из легированного бором поликристаллического алмаза. Электрохимия. 2008. Т. 44. С. 1166. [Denisova, A.E. and Pleskov, Yu.V., Electrooxidation of Ethylenediaminetetraacetic Acid at a Polycrystalline Boron-doped Diamond Anode, Russ. J. Electrochem., 2008, vol. 44, p. 1083.]