

Ф И З И К А

УДК 53.06, 538.9, 621.31, 621.38

DOI: 10.31429/vestnik-16-2-48-58

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПРОВОДЯЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕНА

Мазинов А. С., Гурченко В. С., Шевченко А. И., Арутинов Н. Э., Тютюник А. С.

SPECTRAL AND CONDUCTIVE CHARACTERISTICS OF FULLERENE-BASED
THIN-FILM STRUCTURESA. S. Mazinov, V. S. Gurchenko, A. I. Shevchenko, N. E. Arutinov, A. S. Tyutyunik
Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
e-mail: mazinovas@cfuv.ru

Abstract. In the present paper we consider carbon films obtained by the method of sequential deposition from fullerene solutions in various types of solvents. Micrographs are presented to estimate the surface geometry of thin-film structures. So, using various solvents, it is possible to form various geometrical objects depending on the functional purpose of the films. At the same time, nanostructured objects can have the form of both bulk polygons (in our case, hexagons) and star-shaped branching structures. The IR spectra of the obtained samples were analyzed and their comparative characteristics were given for a volume of a precipitated solution of 0.15 ml and 1 ml. Depending on the type of initial solvent, both solvent peaks, fullerene, and complex organic impurities can be present in the fabricated samples. From the presence of solvent peaks, it is possible to make an assumption about the crystallization of solvates and their preservation in the film after drying. The conductive properties of thin-film structures are investigated. The use of five types of solvents made it possible to change linear resistances from hundreds to thousands of GOhms with a volume of 0.15 ml applied. An increase in the volume of the nanocrystalline fraction (1 ml of solution) made it possible to reduce the resistance to tens of GOhms

It is worth noting that the mechanisms of the action of the active solvent environment on the morphology of the synthesized objects are not entirely clear, however, studies conducted to obtain nanostructures from fullerene solutions will be effective and, in our opinion, for controlled self-assembly of other functional organic systems.

Keywords: fullerene, C₆₀, solvent, current-voltage characteristic, thin-film structures, topology.

Введение

Фуллерены и их химические производные являются перспективными материалами для использования в полупроводниковой технике и наноэлектронике [1, 2]. Соединения фуллеренов являются наиболее перспективными материалами в областях, связанных с искусственным фотосинтезом, нелинейной оптикой и получением светочувствительных пленок и наноструктур [3–5]. Они обладают ярко выраженными нелинейно-оптическими свой-

ствами, связанными со структурой молекулы. Поэтому они могут быть использованы для создания ограничителей интенсивного излучения. Синтезированы материалы, обладающие вследствие многоатомности молекулы практически сплошным спектром поглощения в видимой и ближней ИК областях спектра [6]. Высокая эффективность светопоглощения и разделения зарядов в композитах проводящих полимеров с фуллереном C₆₀ позволяет прогнозировать создание на

Мазинов Алим Сеит-Аметович, канд. техн. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: mazinovas@cfuv.ru.

Гурченко Владимир Сергеевич, студент магистратуры Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: gurchenko_v@mail.ru.

Шевченко Алексей Иванович, канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: shevshenkoai@cfuv.ru.

Арутинов Никита Эдуардович, студент бакалавриата Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: kintiri1997@gmail.com.

Тютюник Андрей Сергеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: real-warez@mail.ru.

их основе фотодиодов, транзисторов, солнечных батарей и других оптико-электрических устройств [7–10].

Целью данной работы является формирование различных углеродных структур на основе фуллерена при использовании различных растворителей и массовой доли вещества, а также исследование их физических свойств.

1. Синтез

В работе использовался фуллерен, полученный методом электродугового распыления графитового стержня с дальнейшим выделением чистого C_{60} [11–13].

Первоначально порошок фуллерена отмерялся с точностью 0,1 миллиграмма на аналитических весах. После этого заготовки заливались различными видами растворителей с последующим выдерживанием полученных растворов при комнатной температуре до максимально возможного растворения. Масса исходного C_{60} для каждой модификации составила 10 мг, а объём каждого растворителя — 10 мл. В качестве растворителей применялись пять различных веществ: бензол, толуол, дихлорметан, хлороформ, четыреххлористый углерод. В качестве подложек использовались 18×18 мм стеклянные подложки толщинами 170 ± 30 мкм.

Полученный раствор при комнатной температуре равными дозами подавался на подложки. Дальнейшее изотермическое испарение растворителей позволяло получить заведомо равновесную свежевывающую углеродную твердую фазу. Время получения каждого образца зависело от температуры кипения того или иного растворителя.

Были сформированы две серии образцов: первая — с общим объёмом наносимого раствора 0,15 мл, вторая — 1 мл. В зависимости от вида растворителя были введены аббревиатуры для Плёнок, Полученных из Растворов Толуола — ППРТ, Бензола — ППРБ, Дихлорметана — ППРД, Хлороформа — ППРХ, Четырёххлористого углерода — ППРЧ.

2. Микроскопия тонких пленок

Стоит отметить, растворимость C_{60} довольно низкая в любых растворителях. Лучшие результаты продемонстрировали ароматические растворители бензол и толуол.

Образцы с растворителями, относящимися к галогенпроизводным алканов (CH_2Cl_2 ,

$CHCl_3$, CCl_4), продемонстрировали наилучшие результаты растворимости по сравнению с растворителями, относящимися к группе производных бензола (C_6H_6 , $C_6H_5CH_3$) [14].

Настоящее исследование было предпринято с целью более детального изучения формирования физико-химических и проводящих свойств наноагрегатов C_{60} в ароматических веществах (АВР) и хлорпроизводных метана в качестве растворителей (ХМР).

Первичный анализ морфологии полученных образцов осуществлялся посредством просвечивающей и отраженной микроскопии с использованием микроинтерферометра ЛОМО МИИ-4М с набором лазерных светодиодов зеленого и синего диапазонов, а также широкополосных светодиодов. На рис. 1 представлена динамика формирования рельефа тонкопленочных структур при объёме нанокристаллической доли 0,15 мл.

Простой метод нанесения фуллеренсодержащего материала на стеклянные подложки с помощью выпаривания чистого раствора позволил получить разнообразные архитектуры материала в экспериментальных условиях.

Интуитивно невозможно предсказать, как расположатся наноструктуры после нанесения на подложку. После нанесения исследуемых образцов на подложки было обнаружено появление наноструктурированных артефактов: от шестиугольных головок до «морских звезд». На рис. 1, 2 изображены разнообразные морфологии микронного размера, такие как ремни, листья, морские звезды.

Как видно из приведенных рис. 1 микротографий, при использовании бензола образец имеет вид относительно однородной пленки, тетрахлорметана — представляет собой разрозненные частицы, расположенные достаточно равномерно. Образцы, полученные с использованием толуола, дихлорметана и хлороформа, обладают более сложной рельефной структурой, которая далека от однородной. Также в ППРД наблюдается образование шестиконечной звезды, а в толуоле образованы линейчатые структуры, ППРХ имеет крайне неоднородную структуру.

В ППРЧ (рис. 2) хорошо различимы отдельные структуры, представляющие собой гексагоны. Толуол образует относительно однородные пленки. В случае использования ХМР наблюдается рост островковых структур, которые максимальны по размерам у хлороформа и минимальны для тетрахлорме-

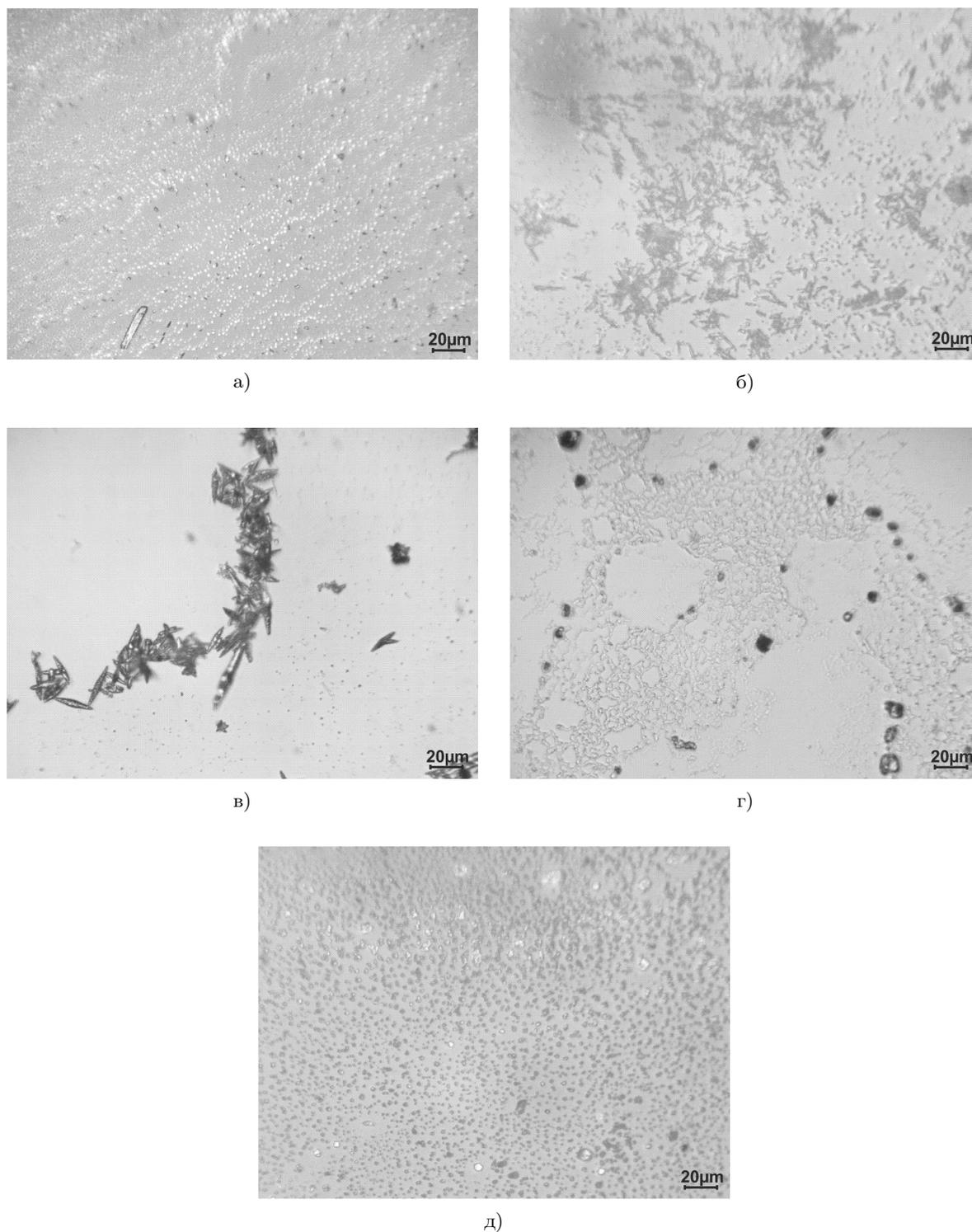


Рис. 1. Разнообразие рельефов тонкопленочных структур при объёме раствора в 0,15 мл: а) ППРБ, б) ППРТ, в) ППРД, г) ППРХ, д) ППРЧ

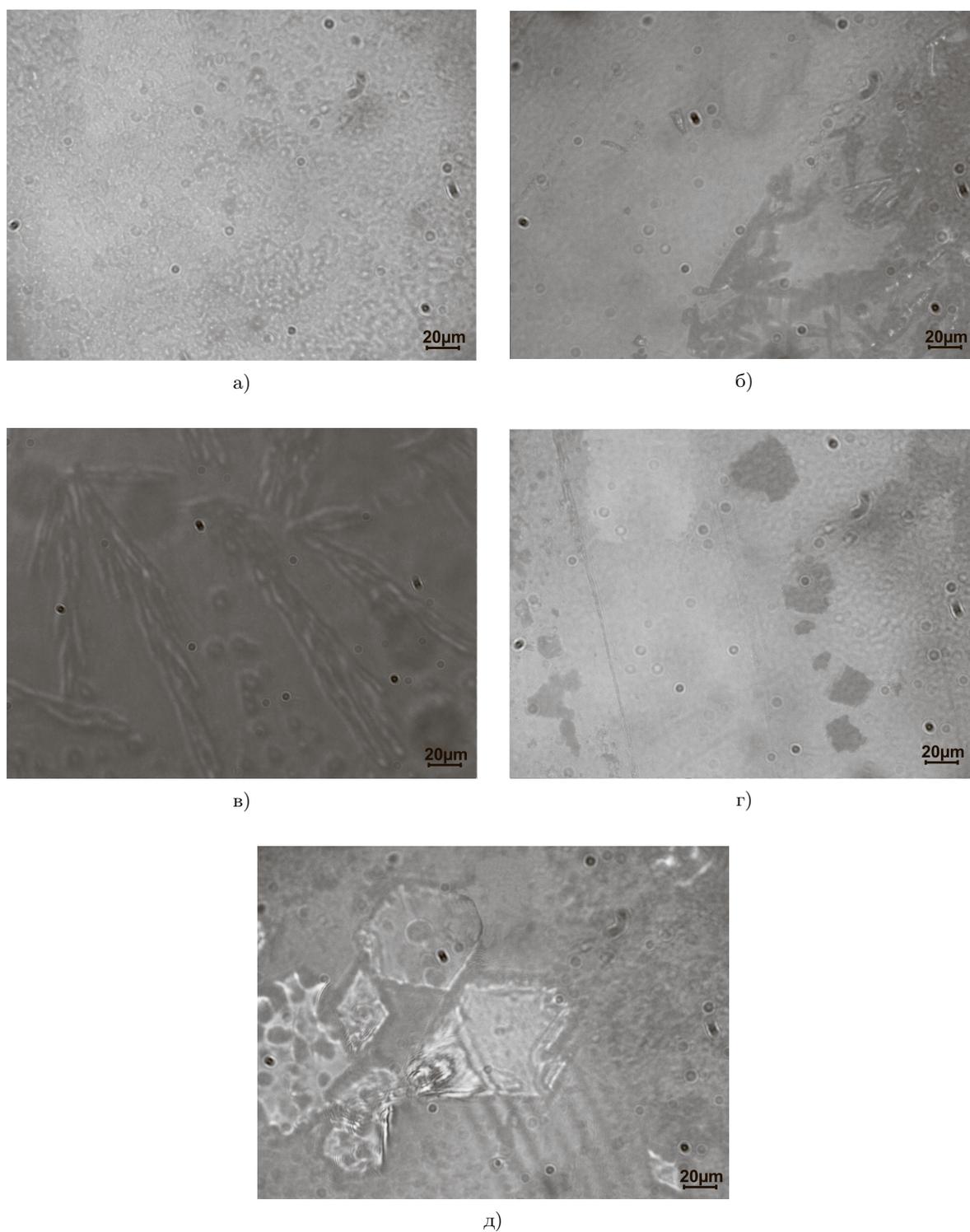


Рис. 2. Разнообразие рельефов тонкопленочных структур при объёме раствора в 1 мл: а) ППРБ, б) ППРТ, в) ППРД, г) ППРХ, д) ППРЧ

Таблица 1. Геометрические характеристики тонкопленочных структур на основе C_{60} , полученных с использованием различных растворителей

Образец	Размер моноструктур, мкм	Толщина пленки(нм)	Степень однородности
$C_{60}+C_6H_6(0,15 \text{ мл})$	5	70	Относительно однородная
$C_{60}+C_6H_5CH_3(0,15 \text{ мл})$	4	43	Относительно однородная
$C_{60}+CH_2Cl_2(0,15 \text{ мл})$	16	154	Рельефообразная
$C_{60}+CHCl_3(0,15 \text{ мл})$	4	203	Островковообразная
$C_{60}+CCl_4(0,15 \text{ мл})$	6	309	Однородная
$C_{60}+C_6H_6(1 \text{ мл})$	20	81	Относительно однородная
$C_{60}+C_6H_5CH_3(1 \text{ мл})$	10	63	Относительно однородная
$C_{60}+CH_2Cl_2(1 \text{ мл})$	58	199	Рельефообразная
$C_{60}+CHCl_3(1 \text{ мл})$	14	290	Островковообразная
$C_{60}+CCl_4(1 \text{ мл})$	34	437	Однородная

тана. Размеры полученных тонкопленочных структур указаны в табл. 1.

Подход, основанный на испарении в различных органических растворителях, позволил запустить процесс самосборки, что привело к созданию необычных наноструктурированных арт-объектов. Влияние природы растворителя на морфологию синтезируемых объектов в настоящий момент до конца не изучено, однако используемая методика получения наноструктур на основе фуллереносодержащих материалов в будущем окажется эффективной для контроля самосборки различных функциональных систем.

3. Спектральные свойства пленок

Исследования ИК-спектров обеих серий образцов проводились на ИК-Фурье-спектрометре Agilent Cary 630 с приставкой ATR (НПВО). Установленное разрешение в диапазоне спектра $4000-650 \text{ см}^{-1}$ ($2,5-15,38 \text{ мкм}$) составляло 4 см^{-1} . Для удобства анализа образцы были разделены на две группы ($0,15$ и 1 мл). ППРТ первой группы и вся вторая группа образцов содержат пики исходных растворителей, что подтверждают данные ИК-спектроскопии (рис. 3, 4). Стоит заметить, что кристаллические сольваты C_{60} нестабильны и остаточные растворители сохраняются лишь в небольшом количестве в межкристаллитном пространстве.

На рис. 3 изображены ИК-спектры пленок C_{60} , полученных из растворов бензола, толуола, дихлорметана, хлороформа, тетрахлорметана при их объемах $0,15 \text{ мл}$.

В результате анализа графиков образцов группы $0,15 \text{ мл}$ были обнаружены пики, соответствующие фуллерену, а также пики примесей, которые можно отнести к высшим углеводородам (табл. 2).

Так, двойной пик малой интенсивности в окрестности 2900 см^{-1} , соответствующий связи $C_{sp3}-H$ в высших углеводородах, был обнаружен в ППРХ. Другие пики данной функциональной группы не видны, что может быть обусловлено более высокой пороговой концентрацией обнаружения, так как на образцах группы 1 мл они были обнаружены и имели меньшую амплитуду по сравнению с данным пиком. Также эта полоса поглощения была отмечена в ППРЧ и ППРТ, однако интенсивность в них на порядок ниже, чем в хлороформе, что говорит о малом содержании в пленке соответствующих веществ.

Для ППРБ и ППРТ были отмечены полосы поглощения, соответствующие характеристическим пикам фуллерена C_{60} в области работы прибора: 1429 и 1182 см^{-1} . Интенсивность пиков фуллерена для ППРБ сравнима с интенсивностью рассмотренной выше группы в ППРХ, в то время как в ППРТ пики фуллерена значительно больше, что согласуется с наибольшей растворимостью порошка C_{60} в толуоле. Также был отмечен пик толуола в ППРТ на волновом числе 725 см^{-1} , отвечающий за $C_{ar}-H$ в ароматических веществах.

При сравнении спектра чистого покровного стекла со спектрами полученных образцов нельзя не отметить высокой степени поглощения в области, характерной для подложки: $1200-650 \text{ см}^{-1}$. Однако наблюдается обратная последовательность по интенсивности для по-

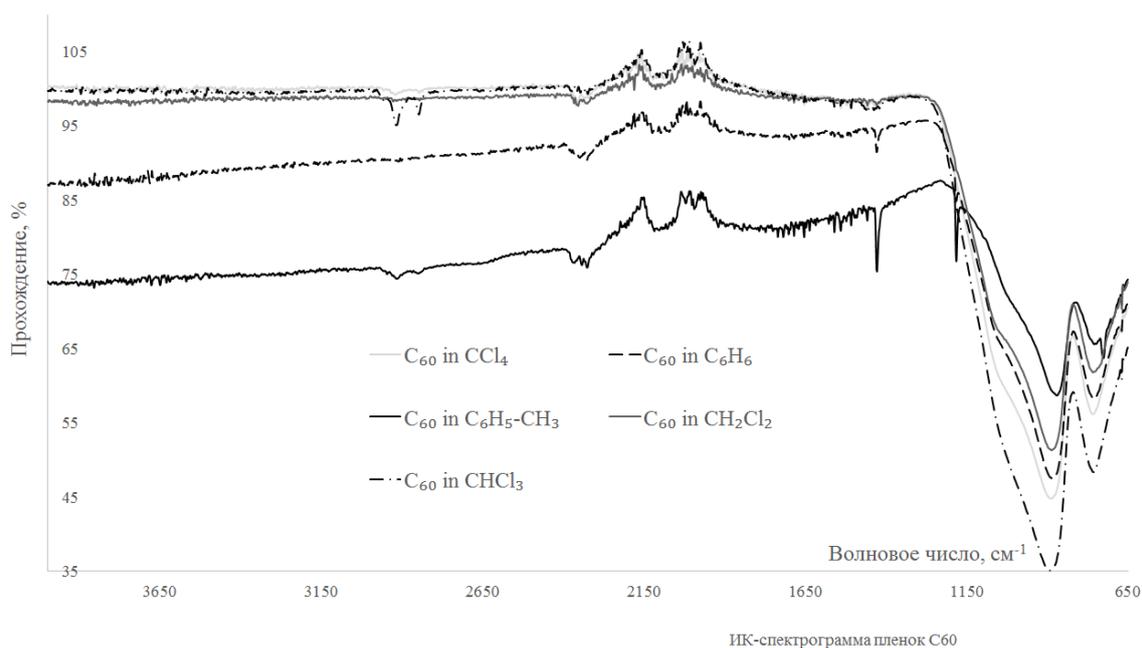


Рис. 3. Спектры пропускания плёнок C_{60} на стеклянных подложках (объём раствора — 0,15 мл)

рядка графиков прохождения в коротковолновой и длинноволновой частях рассматриваемого спектра. Так, ППРТ имеет самое низкое пропускание в высокочастотной области, а в области влияния стекла — самое высокое, что объясняется экранированием пленкой стекла.

На рис. 4 изображены ИК-спектры плёнок C_{60} , полученных из растворов бензола, толуола, дихлорметана, хлороформа, тетрахлорметана при их объёмах 1 мл.

Анализ графиков группы образцов группы 1 мл показал наличие пиков, соответствующих фуллерену и растворителю, а также пиков примесей, которые можно отнести к высшим углеводородам (табл. 3).

Отдельного внимания заслуживает ППРХ, так как она имеет наибольшее поглощение среди образцов обеих групп, а также на ней чётко видны три полосы поглощения углеводородов и две полосы C_{60} . Данное обстоятельство связано с большой толщиной образовавшейся плёнки (табл. 1).

Двойной пик в диапазоне $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ является характерным для $C_{sp^3}\text{--H}$. Данный пик был обнаружен в ППРХ, ППРТ и ППРЧ.

Также наблюдаются пики 1457 см^{-1} и 1370 см^{-1} , которые также соответствуют связи $C_{sp^3}\text{--H}$. Первая полоса поглощения наблюдается сразу у трех образцов: ППРХ, ППРЧ и ППРТ; вторая наблюдается только у ППРХ

и ее интенсивность значительно ниже, из чего следует вывод, что пороговая концентрация обнаружения вещества для данной полосы выше.

Для этих же образцов хорошо выделяются и характеристические полосы поглощения фуллерена C_{60} 1428 см^{-1} и 1183 см^{-1} , причем первая из них сдвигается с пиком алкильной группы 1457 см^{-1} .

На участке $1200\text{--}650\text{ см}^{-1}$ отмечается поглощение стекла, которое в общем случае экранирует полосы в этой области и делает невозможным доскональное изучение спектра этой части диапазона. Как было отмечено ранее, для второй группы образцов также прослеживается инверсия отношения поглощения в высокочастотной и низкочастотной областях, однако образец ППРХ не подчиняется этой закономерности и поглощает больше других образцов во всём исследуемом диапазоне.

Несмотря на экранирование подложкой, в образцах из ХМР были обнаружены пики хлорпроизводных метана при значениях волнового числа 750 см^{-1} и 668 см^{-1} , которые сложились с поглощением стекла. Первый пик легко отличим по причине его высокой интенсивности в чистом растворителе, второй же — имеет вдвое меньшую интенсивность, вследствие чего незначительно выделяется

Таблица 2. Полосы поглощения плёнок (объём раствора — 0,15 мл)

Растворитель	Полоса частот, см ⁻¹	Интенсивность поглощения	Ширина полосы	Группы
C ₆ H ₆	1429±10	средн.	узкая	C ₆₀
	1182±10	слаб.	узкая	C ₆₀
	900–700	сильн.	широкая	стекло
C ₆ H ₅ CH ₃	3000–2800	слаб.	широкая	C _{sp3} -H
	1429±10	сильн.	узкая	C ₆₀
	1182±10	сильн.	узкая	C ₆₀
	900–700	сильн.	широкая	стекло
	725±5	слаб.	узкая	C _{ar} -H
CH ₂ Cl ₂	900–700	оч. сильн.	широкая	стекло
CHCl ₃	3000–2800	средн.	широкая	C _{sp3} -H
	900–700	оч. сильн.	широкая	стекло
CCl ₄	3000–2800	оч. слаб.	широкая	C _{sp3} -H
	900–700	сильн.	широкая	стекло

Таблица 3. Полосы поглощения плёнок C₆₀ (объём раствора — 1 мл)

Растворитель	Полоса частот, см ⁻¹	Интенсивность поглощения	Ширина полосы	Группы
C ₆ H ₆	1429±10	оч. слаб.	узкая	C ₆₀
	900–700	сильн.	широкая	стекло
C ₆ H ₅ CH ₃	3000–2800	слаб.	широкая	C _{sp3} -H
	1459±20	оч. слаб.	узкая	C _{sp3} -H
	1429±10	оч. слаб.	узкая	C ₆₀
	900–700	сильн.	широкая	стекло
CH ₂ Cl ₂	900–700	оч. сильн.	широкая	стекло
	750±10	слаб.	узкая	C _{sp3} -Cl
CHCl ₃	3000–2800	оч. сильн.	широкая	C _{sp3} -H
	1730±20	средн.	узкая	C=O
	1457±20	средн.	узкая	C _{sp3} -H
	1429±10	средн.	узкая	C ₆₀
	1370±20	слаб.	узкая	C _{sp3} -H
	1271±10	средне-слаб.	узкая	C _{sp3} -C _{sp3}
	1182±10	средне-слаб.	узкая	C ₆₀
	900–700	оч. сильн.	широкая	стекло
	750±10	сильн.	узкая	C _{sp3} -Cl
668±10	слаб.	узкая	C _{sp3} -Cl	
CCl ₄	3000–2800	средне-слаб.	широкая	C _{sp3} -H
	1457±20	слаб.	узкая	C _{sp3} -H
	1429±10	средн.	узкая	C ₆₀
	1183±10	средн.	узкая	C ₆₀
	900–700	сильн.	широкая	стекло
	750±10	средн.	узкая	C _{sp3} -Cl

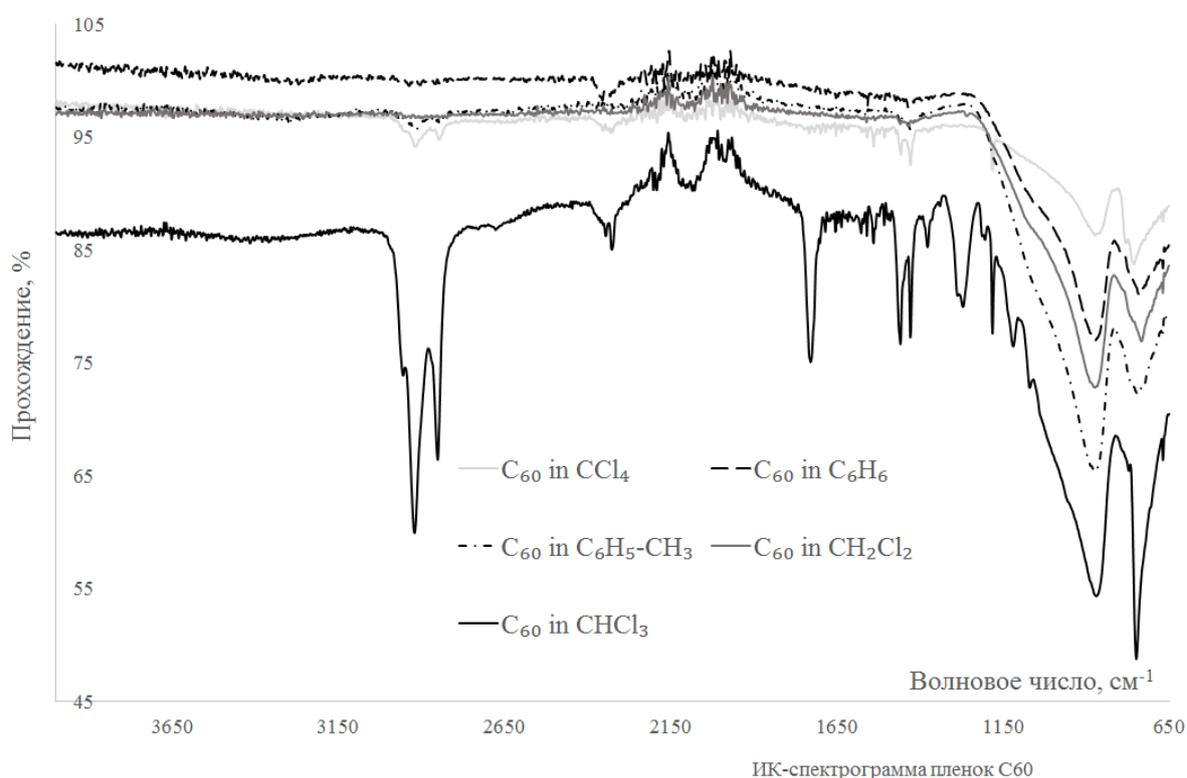


Рис. 4. Спектры пропускания плёнок C_{60} на стеклянных подложках (объём раствора — 1 мл)

на фоне подложки. Наилучшим образом это наблюдается для ППРХ.

ППРТ и ППРБ практически не имеют видимых пиков C_{60} , растворителя и примесей, что обусловлено наименьшими толщинами среди образцов 1 мл. Тем не менее, при большей чувствительности пики фуллерена и углерод-водородных связей примесей обнаруживаются.

Приведенный выше анализ позволяет в первом приближении определить изменение структуры пленок в зависимости от увеличения исходного объема раствора (количества вещества). Из изложенного выше можно сделать следующие выводы по образцам АВР при увеличении объема раствора:

- бензол в силу высокой растворяющей способности при испарении сместил центр выпадения осадка, вследствие чего концентрация C_{60} , растворителя или примесей значительно превышает предел обнаружения в исследуемой области;

- толуол обладает большей растворяющей способностью, чем бензол, что при испарении приводит к увеличению области, в которой обнаруживаются пики исследуемых материалов;

- в целом с увеличением количества растворов АВР интенсивность поглощения падает.

Хлорпроизводные метана с увеличением объема ведут себя практически одинаково:

- увеличивается интенсивность поглощения примесями и фуллеренами, а в ППРЧ появляются пики фуллерена;

- для всех трех растворителей наблюдается появление пиков растворителя в пленке, что говорит о кристаллизации сольватов и их сохранении в ней;

- ППРД в отличие от ППРХ и ППРЧ не показывает пиков C_{60} и примесей ни в одной группе.

4. Проводящие свойства пленок

Для определения кинетики носителей заряда был проведен анализ формы полученных вольт-амперных характеристик тонких пленок фуллеренов C_{60} в зависимости от величины электрического поля. Обнаруженное поведение ВАХ характерно для квазиодномерных систем, содержащих наноструктуры. В этом случае динамику движения носителей

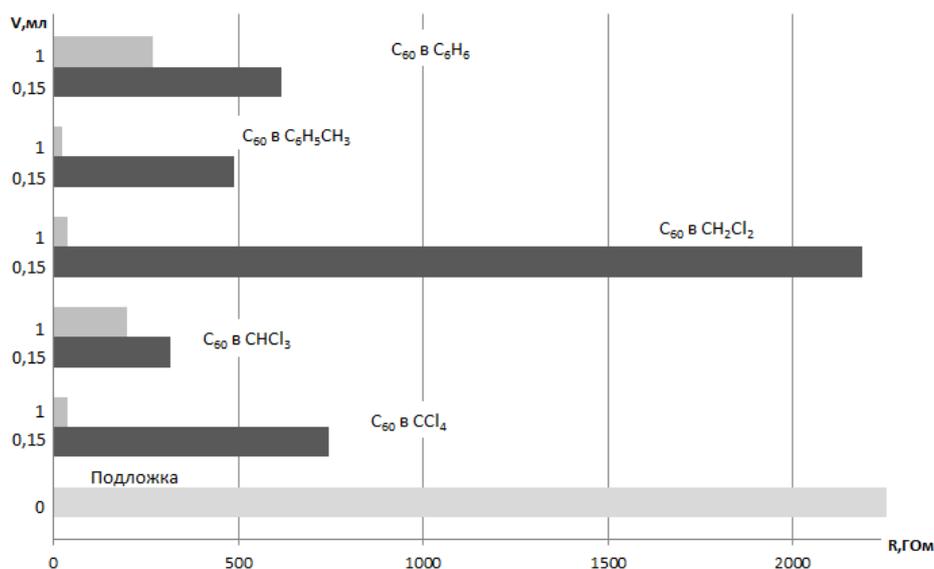


Рис. 5. Сопротивления тонкопленочных структур при объёме нанокристаллической доли 0,15 и 1 мл

заряда определяет не вся плёнка фуллеренов C_{60} , а её отдельные участки, представляющие собой молекулярные цепочки с наноостровками, которые проявляются при исследовании квазиодномерного транспорта носителей [15].

Замеры объемных сопротивлений производились не менее 50 раз в диапазоне от -40 до 40 В с шагом в $0,1$ В с дальнейшим пересчетом и выводом усредненного значения. Сравнительная характеристика проводилась относительно чистой подложки. На рис. 5 изображены значения сопротивления тонкопленочных структур, осажденных с помощью различных растворителей при объёме нанокристаллической доли $0,15$ мл и 1 мл.

Стоит отметить уменьшение сопротивления с увеличением наноструктурированной доли из объёма в 1 мл исходного материала, осажденного на диэлектрическую подложку. Это может быть вызвано формированием большего количества стабильных проводящих связей в процессе самосборки, в отличие от образцов с объёмом $0,15$ мл, где прослеживается меньшая плотность частиц на единицу площади подложки. Максимальное увеличение проводимости по сравнению с первичным объёмом $0,15$ мл наблюдалось в дихлорметане (58 раз), тогда как минимальное изменение проводящих свойств показал фуллерен в хлороформе — увеличение на 60% .

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что фуллерен обладает достаточно высоким сопротивлением. Однако применение в

качестве растворителей хлорпроизводных метана и ароматических веществ позволяет варьировать электрическими параметрами исходного вещества.

Заключение

Механизмы воздействия активной среды растворителя на морфологию синтезируемых объектов пока не совсем ясны, однако проведенные исследования по получению наноструктур из растворов фуллеренов окажутся эффективными и, на наш взгляд, для контролируемой самосборки других функциональных органических систем.

Так, используя разные растворители, можно формировать различные геометрические объекты в зависимости от функционального назначения пленок, в которых наноструктурированные объекты могут выступать как объёмные многоугольники (в нашем случае, шестиугольники), а также звездообразные ветвящиеся структуры. Также в зависимости от вида исходного растворителя в изготовленном образце могут присутствовать как пики растворителей, так и фуллереносодержащей основы.

Использование пяти видов растворителей позволило изменять линейные сопротивления от сотен до тысяч ГОм при объёме наносимого раствора $0,15$ мл. А увеличение объёма нанокристаллической доли (1 мл раствора) позволило уменьшить сопротивление до десятков ГОм.

Литература

1. Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н. Фуллерены // М.: Экзамен. 2005. 688 с.
2. Zhang Y., Murtaza I., Meng H. Development of fullerenes and their derivatives as semiconductors in field-effect transistors: exploring the molecular design // *J. Mater. Chem. C*. 2018. Vol. 6. Iss. 14. P. 3514–3537.
3. Агапьев К.Б., Врубель И.И., Полозков Р.Г., Иванов В.К. Вычисления потенциала и распределения электронной плотности фуллеренов C_{60+} , C_{60} и C_{60-} // Неделя науки СПбПУ. 2016. С. 314–316.
4. Moet D.J.D., de Bruyn P., Kotlarski J.D., Blom P.W.M. Enhanced efficiency in double junction polymer:fullerene solar cells // *Organic Electronics*. 2010. Vol. 11. P. 1821–1827.
5. Gattia T., Menna E., Meneghetti M., Maggini M., Petrozza A., Lamberti F. The Renaissance of fullerenes with perovskite solar cells // *Nano Energy*. 2017. Vol. 41. P. 84–100.
6. Белюсова И.М., Данилов О.Б., Сидоров А.И. Нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 4. С. 71–85.
7. Park S., Srivastava D., Cho K. Generalized chemical reactivity of curved surfaces: carbon nanotubes // *Nanotechnology*. 2001. Vol. 12. Iss. 3. P. 245–249.
8. Vasconcelos R.C., Aleixo V.F.P., Del Nero J. Organic field effect transistor composed by fullerene C_{60} and heterojunctions // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2017. Vol. 86. P. 142–145.
9. Li Z., Zhang Q., Zhang C., Li H., Lu J. High quality fullerene film based on electrophoresis deposition for RRAM device application // *Organic Electronics*. 2019. Vol. 66. P. 70–75.
10. Dao T.T., Matsushima T., Murata H. Organic nonvolatile memory transistors based on fullerene and an electron-trapping polymer // *Organic Electronics*. 2012. Vol. 13. P. 2709–2715.
11. Мазинов А.С., Работягов К.В., Гурченко В.С., Тютюник А.С. Влияние структурных особенностей фуллеренсодержащего материала на его резистивные свойства // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2018. Т. 15. Вып. 2. С. 86–93.
12. Шевченко А.И., Работягов К.В., Максимова Е.М., Наухацкий И.А., Батиаишвили Л.А. Фуллеренсодержащий материал, полученный низкотемпературным крекингом из резиносодержащих отходов // *Вестник ТГУ*. 2017. Т. 22. Вып. 2. С. 459–463.
13. Работягов К.В., Сай Е.В., Максимова Е.М., Наухацкий И.А., Карпенко Н.И., Шевченко А.И., Мазинов А.С. Исследование структуры и физико-химических свойств пористых углеродных материалов, полученных низкотемпературным крекингом // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия»*. 2015. Т. 1 (67). № 3. С. 125–131.
14. Безмельницын В.Н., Елецкий А.В., Окунь М.В. Фуллерены в растворах // *Успехи физических наук*. 1998. Т. 168. Вып. 11. С. 1196–1219.
15. Мазинов А.С., Гурченко В.С., Тютюник А.С., Шевченко А.И. Влияние структурных особенностей фуллеренсодержащего материала на его резистивные свойства при осаждении из раствора // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2018. Т. 15. № 4. С. 85–92.

References

1. Sidorov, L.N., Yurovskaya, M.A., Borshchevskiy, A.Ya., Trushkov, I.V., Ioffe, I.N. *Fullerenes*. Ekzamen, Moscow, 2005. P. 688. (In Russian)
2. Zhang, Y., Murtaza, I., Meng, H. Development of fullerenes and their derivatives as semiconductors in field-effect transistors: exploring the molecular design. *J. Mater. Chem. C*, 2018, vol. 6, iss. 14. P. 3514–3537.
3. Agap'yev, K.B., Vruble', I.I., Polozkov, R.G., Ivanov, V.K. Vychisleniya potentsiala i raspredeleniya elektronnoy plotnosti fullerenov C_{60+} , C_{60} i C_{60-} [Calculations of the potential and distribution of the electron density of fullerenes C_{60+} , C_{60} and C_{60-}] *Nedelya nauki SPbPU* [J. Science Week SPbPU], 2016, pp. 314–316. (In Russian)
4. Moet D.J.D., Bruyn P., Kotlarski J.D., Blom. P.W.M. Enhanced efficiency in double junction polymer:fullerene solar cells. *Organic Electronics*, 2010, vol. 11, pp. 1821–1827.
5. Gattia, T., Menna, E., Meneghetti, M., Maggini, M., Petrozza, A., Lamberti, F. The Renaissance of fullerenes with perovskite solar cells. *Nano Energy*, 2017, vol. 41, pp. 8–100.
6. Belousova, I.M., Danilov, O.B., Sidorov, A.I. Nelineynno-opticheskiye ogranichiteli lazernogo izlucheniya. [Nonlinear optical limiters of laser radiation]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical magazine], 2009, vol. 76, no. 4, pp. 71–85.
7. Park, S., Srivastava, D., Cho, K. Generalized chemical reactivity of curved surfaces: carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 2001, vol. 12, iss. 3, pp. 245–249.
8. Vasconcelos, R.C., Aleixo, V.F.P., Del Nero, J. Organic field effect transistor composed by fullerene C_{60} and heterojunctions. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2017, vol. 86, pp. 142–145.

9. Li, Z., Zhang, Q., Zhang, C., Li, H., Lu, J. High quality fullerene film based on electrophoresis deposition for RRAM device application. *Organic Electronics*, 2019, vol. 66. P. 70–75.
10. Dao, T.T., Matsushima, T., Murata, H. Organic nonvolatile memory transistors based on fullerene and an electron-trapping polymer. *Organic Electronics*, 2012, vol. 13, pp. 2709–2715.
11. Mazinov, A.S., Rabotyagov, K.V., Gurchenko, V.S., Tyutyunik, A.S. Vliyanie strukturnykh osobennostey fullerensoderzhashchego materiala na yego rezistivnye svoystva [Influence of structural features of fullerene-containing material on its resistive properties]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2018, vol. 15, no. 2, pp. 86–93. (In Russian)
12. Shevchenko, A.I., Rabotyagov, K.V., Maksimova, E.M., Naukhatskiy, I.A., Batiashvili, L.A. Fullerensoderzhashchij material, poluchennyj nizkotemperaturnym krekingom iz rezinosoderzhashchih othodov [Fullerene-containing material received by low-temperature cracking from rubber-containing wastes]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennyye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences], 2017, vol. 22, iss. 2, pp. 459–463. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-2-459-463 (In Russian)
13. Rabotyagov, K.V., Say, E.V., Maksimova, E.M., Nauhachy, I.A., Karpenko, N.I., Shevchenko, A.I., Mazinov, A.S. Issledovanie struktury i fiziko-himicheskikh svoystv poristyh uglerodnykh materialov, poluchennykh nizkotemperaturnym krekingom [Investigation of the structure and physicochemical properties for porous carbon materials obtained by low-temperature cracking]. *Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya* [Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry], 2015, vol. 1 (67), iss. 3, pp. 125–131. (In Russian)
14. Bezmel'nitsyn, V.N., Yeletskiy, A.V., Okun', M.V. Fullereny v rastvorakh [Fullerenes in solutions]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in the physical sciences], 1998, vol. 168, iss. 11, pp. 1196–1219. (In Russian)
15. Mazinov, A.S., Gurchenko, V.S., Tyutyunik, A.S., Shevchenko, A.I. Vliyanie strukturnykh osobennostey fullerensoderzhashchego materiala na yego rezistivnyye svoystva pri osazhdenii iz rastvora [The influence of the structural features of the fullerene-containing material on its resistive properties during deposition from solution]. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2018, vol. 15, no. 4, pp. 85–92. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2019

© Мазинов А. С., Гурченко В. С., Шевченко А. И., Арутинов Н. Э., Тютюник А. С., 2019

Статья поступила 23 марта 2019 г.