

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИНЭОС РАН,
чл.-корр. РАН, д.х.н. А.А. Трифонов



_____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской
академии наук (ИНЭОС РАН) на диссертационную работу Благодарной
Елизаветы Денисовны «Синтез и свойства нефуллереновых акцепторных
материалов на основе донорно-акцепторных олигомеров и полимеров с
пониженной синтетической сложностью для органических солнечных
батареи», представленную на соискание учёной степени кандидата
химических наук по специальности 1.4.7 – Высокомолекулярные соединения
(химические науки)

Актуальность темы диссертационной работы Благодарной Е.Д., посвящённой синтезу нефуллереновых акцепторных материалов (НФА) аннелированного и неаннелированного строения на основе донорно-акцепторных олигомеров и полимеров с пониженной синтетической сложностью, установлению взаимосвязей между их химическим строением и физико-химическими свойствами, а также оценке перспективности применения полученных соединений в бинарных и трёхкомпонентных органических солнечных батареях (ОСБ), обусловлена активным развитием органической фотовольтаики как одного из направлений альтернативной энергетики. Одним из ключевых факторов, ограничивающих коммерциализацию ОСБ, является высокая трудоёмкость, многостадийность синтеза и низкие общие выходы реакций для наиболее эффективных НФА аннелированного строения, что делает разработку синтетически простых

аналогов с сохранением высоких фотовольтаических характеристик важной задачей данной области. Применение в дальнейшем полученных соединений в бинарных и многокомпонентных системах для получения высокоэффективных ОСБ позволяет пролить свет на некоторые фундаментальные вопросы взаимосвязи «структура и свойства материалов – свойства ОСБ». Актуальность проведённых Благодарной Е.Д. исследований не вызывает сомнений и имеет важное значение для успешных прикладных разработок как в области органической фотовольтаики, так и в смежных с ней областях органической оптоэлектроники и фотоники.

Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, главы результатов и их обсуждения, выводов, списка использованных сокращений, списка литературы и приложения. В Приложении А представлены дополнительные экспериментальные данные. Работа изложена на 176 страницах печатного текста, содержит 53 рисунка и 13 таблиц. Список цитируемых литературных источников включает 172 наименования.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы научной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, его методология, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикации результатов.

Литературный обзор (Глава 1) состоит из пяти разделов. В первом разделе приведена историческая справка о развитии фотовольтаики и органических солнечных батарей. Во втором разделе рассмотрены принципы работы и факторы стабильности ОСБ с объёмным гетеропереходом. Третий раздел посвящён основным характеристикам ОСБ и особенностям многокомпонентных устройств. В четвёртом разделе систематизированы современные донорные материалы и нефуллереновые акцепторы аннелированного и неаннелированного строения. В пятом разделе

проанализированы современные синтетические подходы к получению НФА, включая обсуждение принципиальных ограничений методов построения аннелированных структурных фрагментов.

Экспериментальная часть (Глава 2) содержит описание используемых материалов, подробные методики синтеза промежуточных и целевых соединений, а также характеристику методов физико-химического анализа и методик изготовления и характеристики устройств ОСБ.

Глава 3 «Результаты и их обсуждение» состоит из двух основных разделов. В первом разделе (3.1) представлены молекулярный дизайн и разработанные схемы синтеза аннелированных НФА на основе центрального фрагмента ВТРТ, а также неаннелированных НФА на основе фрагментов ВТВ, ВСВ и ТВТ, и проведён анализ синтетической сложности полученных соединений. Второй раздел (3.2) содержит сравнительный анализ оптических, электрохимических, термических и структурных свойств синтезированных соединений и фотовольтаических характеристик бинарных и трёхкомпонентных ОСБ на их основе.

Каждый раздел Главы 3 диссертационной работы представляет собой логически завершённый этап исследования.

Выводы обобщают основные результаты, полученные в работе. Они непосредственно следуют из представленного экспериментального материала, содержательны и имеют как научную, так и практическую значимость. Приведённые результаты и выводы диссертации свидетельствуют о достижении поставленной цели и решении сформулированных задач исследования.

Диссертационная работа отвечает предъявляемым требованиям по качеству оформления. Представленный в диссертации материал логично структурирован, оформлен в полном соответствии с требованиями, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата химических наук.

Достоверность и обоснованность полученных результатов диссертационной работы обеспечена применением комплекса современных физико-химических методов исследования, а также воспроизводимостью экспериментальных данных. Результаты работы прошли рецензирование и опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Диссертационная работа прошла необходимую апробацию: по результатам работы опубликовано 5 научных статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, а результаты также были представлены на 20 международных и российских научных конференциях в виде устных и стендовых докладов.

Рассмотренная диссертационная работа содержит ряд ключевых научных и практических достижений, а именно:

1. Разработаны эффективные и воспроизводимые схемы синтеза серии из 16 новых нефуллереновых акцепторных материалов аннелированного (ВТРТ-серия) и неаннелированного (ВТВ-, ВСВ-, ТВТ-серии) строения, включающие как олигомерные, так и полимерные структуры. В качестве ключевого метода построения сопряжённого центрального фрагмента неаннелированных акцепторов использована реакция прямого С–Н-арилирования, что позволило исключить стадии металлирования и кросс-сочетания по Стилле, необходимые для аналогичных превращений, и снизить синтетическую сложность целевых соединений по сравнению с коммерческим НФА У6 в 2.2–3.4 раза.

2. Установлен комплекс отдельных взаимосвязей «структура–свойство» для полученных серий соединений. Показано, что все соединения характеризуются эффективным поглощением солнечного света в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах, высокой термической стабильностью и отсутствием фазовых переходов в диапазоне температур эксплуатации ОСБ; природа концевых электроноакцепторных групп преимущественно определяет положение уровня НСМО, тогда как строение центрального фрагмента и π -сопряжённого линкера влияет на уровень ВЗМО. Для полимерных акцепторов на основе ВТРТ установлена определяющая роль региорегулярности

полимерной цепи: региорегулярные полимеры характеризуются более высокими молекулярно-массовыми характеристиками и повышенной термической стабильностью по сравнению со статистическими аналогами, что коррелирует с существенными различиями фотовольтаических характеристик соответствующих бинарных ОСБ (КПД 6.5–7.8 % против 1.7 %).

3. Практическая значимость работы подтверждается рядом достигнутых результатов при изготовлении бинарных и трёхкомпонентных ОСБ на основе синтезированных материалов. Продемонстрирован рост эффективности при переходе от низкомолекулярного неаннелированного НФА ВТВ-1 к его полимерному аналогу ВТВ-Т (КПД возрастает с 0.9 % до 14.1 %), обусловленный увеличением эффективной длины сопряжения и формированием более благоприятной морфологии слоя. Показана эффективность применения неаннелированных НФА в качестве третьего компонента референсной системы РМ6:У6: введение 2–10 масс. % позволило повысить КПД трёхкомпонентных устройств с 15.5 % до 17.7 % за счёт расширения спектрального диапазона поглощения, каскадного выравнивания энергетических уровней и оптимизации морфологии фотоактивного слоя.

Автором проделана обширная синтетическая и аналитическая работа, потребовавшая хорошей теоретической подготовки, знаний методологии синтеза органических соединений и современных физико-химических методов анализа.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. Для установления взаимосвязи между молекулярной структурой новых нефуллереновых акцепторов и с их фотовольтаическими свойствами автор проводит сравнительный анализ внутри одной группы соединений (ВТРТ, ВТВ, ВСВ или ТВТ). Было бы неплохо, используя лучшие фотовольтаические характеристики ОСБ в каждой из групп, сравнить их и между собой. Это позволило бы определить достоинства/недостатки разных НФА и, в частности, НФА на основе неаннелированного и аннелированного центра.

2. В таблице 10 (стр. 140) диссертации автор приводит фотовольтаические характеристики и максимальные ВКЭ лучших ОСБ на основе ННФА. Безусловно, выбор лучших - это решение автора. Но возникает вопрос, почему среди них нет ни одного соединения из группы ВСВ или ТВТ, при этом к «лучшим» отнесена ОСБ с фотоактивным слоем РМ6:ВТВ-1 с КПД 0,9%.

3. На стр. 144 диссертации автор делает промежуточный вывод: «Для трехкомпонентного АС, состоящего из компонентов с меньшими значениями χ в парах, были получены наилучшие результаты в ОСБ». Однако составы фотоактивных слоев, приведенные в таблице 12, не совпадают с составами таблицы 11, в частности, в ней не приведены значения χ для пар РМ6:ВТВ (1-4) и Y6:ВТВ (1-4). Вывод автора был бы убедительнее, при наличии в таблице 11 этих значений.

Указанные замечания, в большей мере рекомендательного характера, ни в коей мере не уменьшают значимости работы и не снижают положительную оценку диссертации в целом.

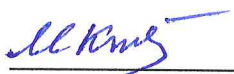
Диссертационная работа Благодарной Елизаветы Денисовны «Синтез и свойства нефуллереновых акцепторных материалов на основе донорно-акцепторных олигомеров и полимеров с пониженной синтетической сложностью для органических солнечных батарей» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые схемы синтеза нефуллереновых акцепторных материалов аннелированного и неаннелированного строения с пониженной синтетической сложностью, а также установлен комплекс фундаментальных взаимосвязей «структура – свойство» для синтезированных соединений. Установленные закономерности могут быть использованы для прогнозирования характеристик аналогичных материалов и целенаправленного молекулярного дизайна полупроводниковых соединений с заданными свойствами. Данные положения представляют собой вклад в развитие направления высокомолекулярных соединений для

органической и гибридной оптоэлектроники и демонстрируют возможность практического применения синтезированных материалов в бинарных и трёхкомпонентных органических солнечных батареях, для которых достигнуты значения КПД до 14.1 % и 17.7 % соответственно.

Доклад Благодарной Елизаветы Денисовны «Синтез и свойства нефуллереновых акцепторных материалов на основе донорно-акцепторных олигомеров и полимеров с пониженной синтетической сложностью для органических солнечных батарей» заслушан и обсуждён на расширенном заседании научного семинара Лаборатории физической химии полимеров (ЛФХП) №311 ИНЭОС РАН, протокол от 30.06.2026 г.

По своей актуальности, научной новизне, уровню выполнения, объёму, научной и практической значимости полученных результатов диссертационная работа «Синтез и свойства нефуллереновых акцепторных материалов на основе донорно-акцепторных олигомеров и полимеров с пониженной синтетической сложностью для органических солнечных батарей» полностью отвечает требованиям пп. 9–14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Благодарная Елизавета Денисовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальности 1.4.7 – Высокомолекулярные соединения (химические науки).

Отзыв подготовил ведущий научный сотрудник Лаборатории физической химии полимеров (ЛФХП) №311 ФГБУН ИНЭОС РАН, д.х.н. (шифр специальности 02.00.06), Кештов Мухамед Лостанбиевич.

 / Кештов Мухамед Лостанбиевич

Тел. (499) 135-92-02
e-mail: keshtov@ineos.ac.ru

11.08.2026

дата

Подпись д.х.н. Кештова Мухамеда Лостанбиевича заверяю.

Ученый секретарь ИНЭОС РАН, к.х.н.

Гулакова Е.Н.



Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН)

Юридический и фактический адрес организации: 119334, г. Москва, ул. Вавилова, д. 28, стр.1.

Тел. (499) 135-92-02; Факс: (499) 135-50-85; (499) 135-92-02

e-mail: larina@ineos.ac.ru