

Обзорная статья

УДК 544.47:661.898

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-118-128

КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПАЛЛАДИЯ КАК КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ РЕАКЦИЙ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ Часть 1. Реакция Соногашеры

Я.Б. Платонова¹, А.А. Леонов², В.А. Кириллова¹, С.В. Савилов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; dekanat@chem.msu.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Систематизированы подходы к разработке гомогенных и гетерогенных каталитических систем на основе множества палладиевых комплексов для реакции Соногашеры. Особое внимание уделено стратегиям контролируемого высвобождения активных частиц металла, предотвращающим образование неактивной палладиевой черни. Показаны преимущества иммобилизации на магнитные носители, позволяющие проводить реакции в «мягких» условиях с возможностью многократного использования катализатора. Отмечен потенциал фталоцианиновых комплексов, позволяющих получать биологически активные соединения с высокими выходами продуктов.

Ключевые слова: реакция Соногашеры, биологически активные соединения, пинцерные комплексы, N-гетероциклические карбеновые комплексы палладия, фталоцианины, контролируемое высвобождение палладия

Для цитирования: Платонова Я.Б., Леонов А.А., Кириллова В.А., Савилов С.В. Комплексные соединения палладия как катализаторы для реакций кросс-сочетания для получения функциональных материалов. Часть 1. Реакция Соногашеры // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 118–128. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-118-128.

Review article

PALLADIUM COMPLEX COMPOUNDS AS CATALYSTS FOR CROSS-COUPPLING REACTIONS FOR OBTAINING FUNCTIONAL MATERIALS Part 1. Sonogashira reaction

Ya.B. Platonova¹, A.A. Leonov², V.A. Kirillova¹, S.V. Savilov¹

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dekanat@chem.msu.ru

²Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The review systematizes approaches to the development of homogeneous and heterogeneous catalytic systems on the basis of a multitude of palladium complexes for the Sonogashira reaction. Strategies for the controlled release of active metal particles that prevent the formation of inactive palladium black are thoroughly covered. The advantages of immobilization on magnetic supports are shown, allowing reactions to be carried out under mild conditions

with the possibility of repeated use of the catalyst. The potential of phthalocyanine complexes, which allow obtaining biologically active compounds with high products yields, is noted.

Keywords: Sonogashira reaction, biologically active compounds, pincer complexes, N-heterocyclic carbene complexes of palladium, phthalocyanines, controlled palladium release

For citation: Platonova Ya.B., Leonov A.A., Kirillova V.A., Savilov S.V. Palladium complex compounds as catalysts for cross-coupling reactions for obtaining functional materials. Part 1. Sonogashira reaction. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 118–128. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-118-128.

Введение

Синтез углерод-углеродных связей посредством реакций кросс-сочетания, таких как реакции Соногаширы, Мизороки–Хека и Сузуки–Мияуры (рис. 1), представляет собой один из фундаментальных инструментов современной органической химии [1, 2]. Основное значение для этих процессов традиционно имеют катализаторы на основе переходных металлов, в частности палладий. В ходе реакций из так называемых прекатализаторов в реакционную смесь выделяются «безлигандные» частицы палладия, которые являются активными. Свободный палладий в виде частиц Pd⁰ позволяет получать целевые продукты реакций, однако при этом необратимое высвобождение палладия и его осаждение в виде палладиевой черни приводят к снижению каталитической активности, загрязнению конечного продукта и даже потере катализатора в реакционной среде. Для решения этой проблемы предложена новая концепция: контролируемое и обратимое высвобождение палладия из макроциклических комплексов, что обеспечивает невысокую концентрацию металлических частиц, приводящих к образованию новых связей [3].

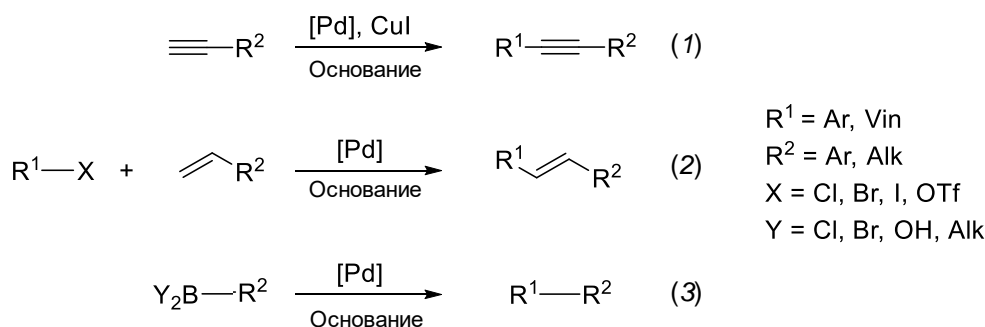


Рис. 1. Реакции Соногаширы (1), Мизороки–Хека (2) и Сузуки–Мияуры (3): Vin – винил; Alk – алкил; OTf – трифлат

В связи с этим актуальной задачей является разработка новых каталитических систем, обеспечивающих контролируемое высвобождение активных частиц палладия, высокую стабильность и возможность многократного использования. Современные исследования в этой области сосредоточены на двух основных стратегиях: создание высокостабильных гомогенных комплексов с прочной координацией металла и разработка эффективных гетерогенных катализаторов путем иммобилизации активных центров на различные носители.

В данном обзоре систематизированы и проанализированы последние достижения в области катализа реакций Сузуки–Мияуры, Мизороки–Хека и Соногаширы. Рассматриваются хелатные, пинцерные, N-гетероциклические карбеновые, порфириновые и фталоцианиновые комплексы палладия, анализируется влияние структуры лиганда и координационной сферы на каталитическую активность и стабильность. Оценивается

влияние иммобилизации на активность, селективность, возможность регенерации и минимизацию выщелачивания металла и проводится сопоставление эффективности гомогенных и гетерогенных катализаторов в разных типах реакций кросс-сочетания.

Цель обзора – выявление наиболее перспективных направлений в разработке эффективных и устойчивых палладиевых катализаторов, обеспечивающих проведение ключевых реакций образования углерод-углеродных связей в «мягких» условиях с высокими выходами продуктов и минимальным воздействием на окружающую среду.

Первая часть обзора посвящена реакции Соногаширы, открытой в 1975 г. [4], которая в общем случае при взаимодействии терминального алкина с арилгалогенидом в присутствии источника палладия как катализатора и, в отличие от реакций Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека, при наличии сокатализатора йодида меди (I) позволяет получить соединения, содержащие тройную углерод-углеродную связь. Арил- и винилацетилены являются структурными фрагментами многих природных веществ и биологически активных соединений [5, 6], а также ряда оптических и полупроводниковых материалов [7, 8]. Функциональные полимеры на их основе благодаря таким уникальным свойствам, как высокая оптическая активность и электропроводность, находят широкое применение в качестве «умных» материалов, химических датчиков, катализаторов различных процессов [9, 10]. Их используют для создания флуоресцентных узоров и функциональных покрытий [11–13], биовизуализации и в терапии [14].

Катализаторы реакции Соногаширы

Пинцерные комплексы

Пинцерные палладациклы, содержащие халькогены [15], изучены для реакции кросс-сочетания – реакции Соногаширы арилгалогенидов, содержащих заместители различной природы, с фенилацетиленом. Палладациклы с тридентатными CNX-лигандами оказались более эффективными катализаторами, чем комплексы с бидентатными NX-лигандами ($X = S, Se$). Снижение каталитической активности не наблюдали вплоть до восьмого цикла реакции сочетания. Отмечено образование наночастиц палладия *in situ* в процессе катализа, что свидетельствует о низкой стабильности комплексов в отсутствие сокатализатора йодида меди и инертной атмосферы при следующих условиях реакции: наличие диметилформаида (ДМФА) и карбоната калия, температура 90 °С.

Авторы работы [16] синтезировали палладиевые комплексы с несимметричными N, S/Se-пинцерными лигандами на основе 8-гидроксихинолина. Данные соединения проявили высокую каталитическую активность в реакции Соногаширы бромбензальдегида с фенилацетиленом в отсутствие йодида меди с загрузкой катализатора 0,5–1,0 % (мольн.) при 90 °С в ДМФА с карбонатом калия в качестве основания. Выходы целевых продуктов составили до 98 % для активированных арилбромидов и йодидов (4-бромбензонитрил, 4-бромнитробензол), а также до 72 % – для дезактивированных субстратов (4-броманизол). Комплекс с селеновым лигандом показал более высокую активность по сравнению с аналогом, содержащим атом серы, что подтверждено теорией функционала плотности (Density Functional Theory – DFT). Эксперименты с ртутной деактивацией и двухфазный тест подтвердили гомогенный механизм катализа через образование Pd⁰. Остальные два комплекса, содержащие серу, из-за низкой растворимости оказались неэффективными. Предложенный протокол отличается простотой, отсутствием токсичных сокатализаторов и материалов, возможностью проведения реакции на воздухе.

В работе [17] разработаны палладий-фосфин-илидные палладациклы в качестве высокоэффективных прекатализаторов для реакции кросс-сочетания арилгалогенидов с фенилацетиленом. Катализаторы демонстрируют высокие выходы продуктов

при экстремально низкой нагрузке (0,001 % (мольн.)) и работают в отсутствие сокатализатора (CuI), на воздухе, при 130 °С в ДМФА с карбонатом калия в качестве основания. Выходы целевых диарилацетиленов составили до 95 % для активированных арилйодидов и бромидов, 70–76 % – для электронодефицитных арилхлоридов (4-хлорбензальдегид, 4-хлорацетофенон), 58–73 % – для дезактивированных хлоридов при нагрузке катализатора 0,01 % (мольн.). Комплекс с объемным симметричным илидным лигандом проявил более высокую активность, чем с менее объемным лигандом. Циклическая вольтамперометрия подтвердила восстановление Pd (II) до Pd (0) в каталитическом цикле, причем ртутный тест указал на гомогенный характер катализа. Среди очевидных преимуществ разработанной каталитической системы можно отметить: сверхнизкое содержание палладия, отсутствие продуктов гомосочетания, устойчивость к воздуху и влаге, а также простоту использования.

Палладацикл, иммобилизованный на наночастицы магнетита, модифицированные олеиновой кислотой, использовали в качестве магнитного гетерогенного катализатора для реакции кросс-сочетания Соногаширы [18]. Применение данного материала позволило исключить соли меди (I) из каталитической системы и добиться оптимального количества катализатора 0,0005 ммоль (в пересчете на палладий), за счет чего снижается негативное влияние на окружающую среду. Кроме того, в ходе оптимизации параметров модельной реакции стало возможным проведение кросс-сочетания йодбензола с фенилацетиленом в этаноле и смесях воды с органическими растворителями. Установлено, что катализатор можно извлечь и повторно использовать без потери активности или выщелачивания палладия в реакционную среду.

Авторы работы [19] изготовили магнитный катализатор, представляющий собой имидазол-фосфиновый пинцеровый лиганд, стабилизирующий палладий, закрепленный на частицах магнетита типа «ядро–оболочка» с помощью сшивки полиэтиленгликоля PEG 600 и модификанта поверхности частиц 3-(триэтоксисилил)пропилизотиоцианата (рис. 2). Катализатор продемонстрировал высокую активность при проведении реакции кросс-сочетания в водной среде, а также при каталитическом восстановлении 4-нитрофенола. Применение воды в качестве единственного растворителя позволило провести реакции в соответствии с принципами зеленой химии при 80–100 °С с выходами до 99 % и значениями частоты оборотов (Turnover Frequency – TOF) до 430 ч⁻¹. Катализатор сохранял активность в течение 8–10 циклов, обеспечивая высокие выходы целевых продуктов, а по окончании реакции легко выделялся с помощью магнита.

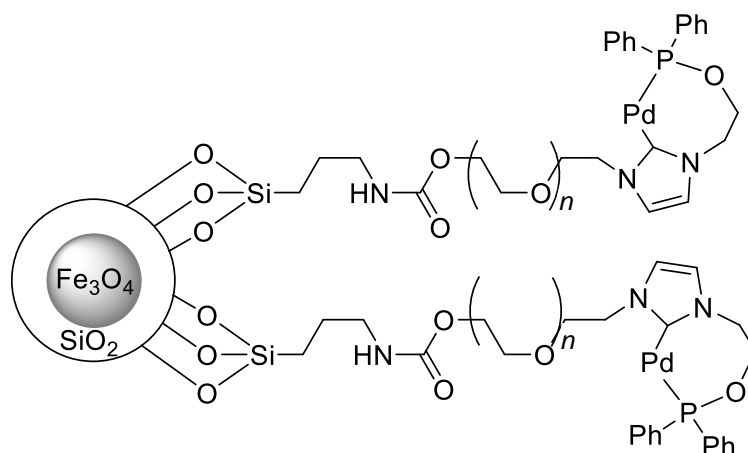


Рис. 2. Гетерогенный магнитный катализатор на основе имидазол-фосфинового пинцерового комплекса палладия: Ph – фенил

Гетерогенный катализатор на основе пинцерного комплекса палладия со связующим лигандом SeCSe, иммобилизованного на полистирольную матрицу, продемонстрировал высокую активность в реакции Соногаширы различных арилгалогенидов с терминальными алкинами в условиях, не требующих добавления меди [20]. Реакции проведены в среде N-метилпирролидона при 70 °С с использованием фторида тетрабутиламмония в качестве основания и 0,3 % (мольн.) катализатора, что позволило получить 1,2-дизамещенные алкины с выходами до 95 % для арилйодидов, до 91 % – для арилбромидов, до 56 % – для активированных арилхлоридов. Катализатор также успешно применялся для стереоселективного синтеза 1,3-енинов из β-бромстирола с преобладанием транс-изомера (рис. 3). Важным преимуществом является возможность легкого отделения катализатора и его повторного использования без значительной потери активности в течение не менее 6 циклов.

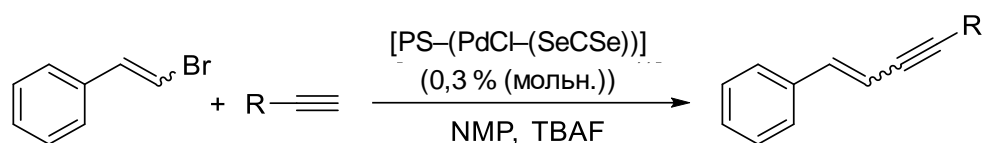


Рис. 3. Синтез 1,3-енинов из β-бромстирола: PS – полистирол; NMP – N-метил-2-пирролидон; TBAF – фторид тетрабутиламмония

Синтезированы три серии пинцерных комплексов палладия (II) на основе NCN-дииминных лигандов с различными заместителями в четвертом положении ароматического кольца: *трет*-бутилом (^tBu), водородом и нитрогруппой [21]. Каталитическая активность комплексов исследована в реакции Соногаширы на примере модельной реакции 3-нитробромбензола и фенилацетилена. Установлено, что каталитическая активность комплексов снижается в ряду NO₂ > H > ^tBu, причем комплекс с нитрогруппой в четвертом положении и метильными группами в анилиновых фрагментах проявил максимальную активность, обеспечив выход продукта 92 %. Рентгеноструктурный анализ нитро- и *трет*-бутилзамещенных комплексов выявил, что электроноакцепторная NO₂-группа приводит к укорочению связи Pd–C и усилению координации азота с палладием, что, по мнению авторов, облегчает стадию окислительного присоединения арилгалогенида в каталитическом цикле и объясняет более высокую активность нитрозамещенных комплексов. Наиболее оптимальные условия реакции, позволившие добиться наибольшего выхода, включали использование 1 % (мольн.) катализатора, ацетата калия в качестве основания, CuI в качестве сокатализатора и N, N-диметилацетамида в качестве растворителя при 90 °С.

Карбеновые комплексы

В работе [22] показана высокая активность N-гетероциклического карбенового комплекса палладия (II) на основе тетраденатного лиганда с бензимидазольными и пиридиновыми фрагментами в реакции Соногаширы в среде, содержащей диоксан и воду, при 100 °С на воздухе. Использование низкой загрузки катализатора (0,1 % (мольн.)) в сочетании с основанием K₃PO₄·3H₂O позволило достичь высоких выходов диарилацетиленов – до 96 и 83 % для арилбромидов и активированных арилхлоридов соответственно. Вместо стандартного сокатализатора в виде соли меди (I) использован тетрабутиламмоний бромид, что делает синтез экологически чище. Сочетание низкой загрузки катализатора, «мягких» условий, возможности работы на воздухе и использования водосодержащего растворителя делает данный комплекс перспективным и практичным для применения в каталитических системах.

Поли(N-гетероциклический карбеновый Pd (II) комплекс), иммобилизованный на наночастицы диоксида кремния (рис. 4), исследовали в трех реакциях кросс-сочетания – Сузуки–Мияуры, Мизороки–Хека и Соногаширы [23]. Выходы реакции сочетания арилгалогенидов с фенилацетиленом без йодида меди в присутствии основания триэтиламина в водной среде при 90 °С достигли 83–92 %, более того, продолжительность реакций составила 9–22 мин. Полученный материал удалось использовать в реакции йодбензола с фенилацетиленом до 8 раз без существенной потери каталитической активности. Вещество извлекали из реакционной среды и промывали перед последующим использованием, причем вымывание палладия суммарно составило 4,5 % за все 8 циклов использования.

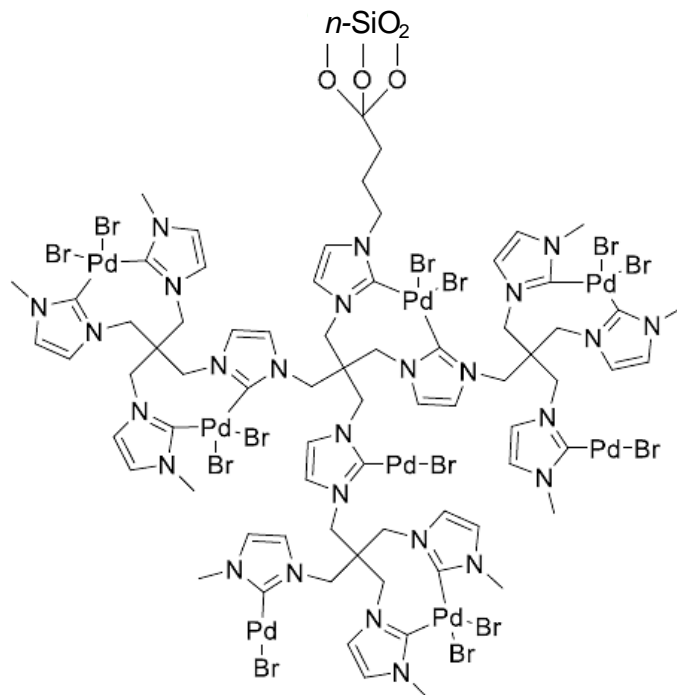


Рис. 4. Гетерогенный поли(N-гетероциклический карбеновый комплекс палладия)

Фталоцианиновые комплексы

Впервые в качестве гомогенных катализаторов реакции Соногаширы применены палладиевые комплексы фталоцианинов [24]. Изучены четыре октаалкокси- и октафеноксизамещенных фталоцианиновых комплекса, а также тетрафенилпорфирин. Наибольшую активность проявил палладиевый комплекс октафеноксифталоцианина, который в сочетании с CuI в качестве сокатализатора и триэтиламина в качестве основания в среде тетрагидрофурана при комнатной температуре обеспечивал кросс-сочетание различных пара-замещенных арилбромидов с фенилацетиленом с выходами до 72 % всего за 8 ч. Ключевым преимуществом данной каталитической системы является реализация процесса в исключительно «мягких» условиях (25 °С) без использования трифенилфосфина или высоких температур. Авторы объясняют высокую эффективность макроциклических комплексов фталоцианинов новой концепцией «медленного высвобождения» палладия из координационно-насыщенного макроцикла, что предотвращает агломерацию металла в неактивные частицы палладия и обеспечивает постоянное присутствие в растворе низких концентраций высокоактивных видов палладия.

Та же группа авторов получила и предложила в качестве высокоэффективных катализаторов реакции Соногаширы палладиевые комплексы тетраakis-*трет*-бутил- и несимметричных АЗВ-фталоцианинов [25]. Наибольшую активность проявил палладиевый комплекс нитро-три-*трет*-бутилзамещенного фталоцианина (рис. 5), который при комнатной температуре обеспечил кросс-сочетание различных пара-замещенных арилбромидов с фенилацетиленом с выходами до 98 % всего за 6 ч. Примечательно, что высокая активность катализаторов сохранялась и для менее активных арилхлоридов, что ранее не демонстрировалось для аналогичных систем.

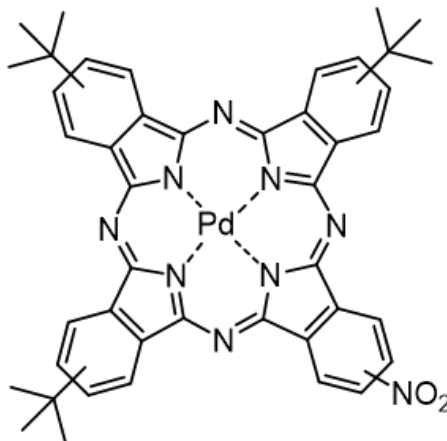


Рис. 5. 2(3)-нитро-9(10), 16(17), 23(24)-три-*трет*-бутилфталоцианин палладия (II)

Известен пример использования фталоцианиновых комплексов палладия (II) для получения биологически активных веществ [26]. Новые 5-алкинилзамещенные производные уридина проявляют высокую антимикобактериальную активность. Тетраakis-*трет*-бутилзамещенный фталоцианин палладия (0,5 % (мольн.)) позволил получить серию соединений с выходами 71–80 % при комнатной температуре. Данная работа демонстрирует перспективы для эффективного синтеза биологически активных соединений в «мягких» условиях за счет применения фталоцианинов в качестве катализаторов реакций кросс-сочетания.

Заключения

Проведенный анализ научно-технической литературы позволяет сделать ряд обобщающих выводов и выявить современные тренды применения палладиевых комплексов различной природы в реакции кросс-сочетания Соногаширы. За последние 10 лет произошла эволюция каталитических систем в сторону зеленой химии. Современные исследования демонстрируют устойчивую тенденцию к отказу от токсичных сокатализаторов (солей меди), использованию экологически безопасных растворителей (вода, этанол, смеси с водой) и проведению реакций на воздухе.

Важно отметить, что на каталитическую активность влияет структура лиганда. Введение электроноакцепторных заместителей (например, нитрогруппы) облегчает стадию окислительного присоединения за счет усиления координации металла с лигандом, что закономерно повышает выход целевых продуктов.

Существуют проблемы со стабильностью и рециклизацией катализаторов, которые решаются гетерогенизацией комплексов, причем подложка также может иметь функциональные особенности, например обладать магнитными свойствами. Имобилизация палладиевых пинцерных и карбеновых комплексов на магнитные наночастицы

(образование структур «ядро–оболочка» с магнетитом) или полистирольную матрицу обеспечивает легкое отделение катализатора от реакционной смеси с помощью магнита или фильтрации, а также его многократное использование (до 8–10 циклов) без существенной потери активности.

Показана уникальность фталоцианиновых комплексов палладия (II), которые впервые применены в качестве гомогенных катализаторов реакции Соногаширы, что позволило провести процесс в исключительно «мягких» условиях (25 °С, без фосфиновых лигандов). Высокая эффективность этих систем объясняется концепцией «медленного высвобождения» палладия из координационно-насыщенного макроцикла, что предотвращает агломерацию металла.

Направленное варьирование структуры лиганда (пинцерные, карбеновые, фталоцианиновые), а также выбор подходящей стратегии иммобилизации позволяют гибко настраивать каталитическую систему реакции Соногаширы, достигая высокой активности, стабильности и соответствия требованиям зеленой химии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 24-73-00147).

Список источников

1. Wang D., Gao S. Sonogashira coupling in natural product synthesis // *Organic Chemistry Frontiers*. 2014. Vol. 1. No. 5. P. 556–566. DOI: 10.1039/C3QO00086A.
2. Yan F., Zhang X., Li D. et al. Recent applications of the Sonogashira reaction in the synthesis of drugs and their derivatives: A review // *Applied Organometallic Chemistry*. 2025. Vol. 39. No. 1. P. e7932. DOI: 10.1002/aoc.7932.
3. Röhlich C., Köhler K. Macrocyclic Palladium(II) Complexes in C–C Coupling Reactions: Efficient Catalysis by Controlled Temporary Release of Active Species // *Advanced Synthesis & Catalysis*. 2010. Vol. 352. No. 13. P. 2263–2274. DOI: 10.1002/adsc.201000458.
4. Sonogashira K., Tohda Y., Hagihara N. A convenient synthesis of acetylenes: catalytic substitutions of acetylenic hydrogen with bromoalkenes, iodoarenes and bromopyridines // *Tetrahedron letters*. 1975. Vol. 16. No. 50. P. 4467–4470. DOI: 10.1016/S0040-4039(00)91094-3.
5. Johar M., Manning T., Tse C. et al. Growth Inhibition of *Mycobacterium bovis*, *Mycobacterium tuberculosis* and *Mycobacterium avium In Vitro*: Effect of 1- α -D-2'-Arabinofuranosyl and 1-(2'-Deoxy-2'-fluoro- α -D-2'-ribofuranosyl) Pyrimidine Nucleoside Analogs // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2007. Vol. 50. P. 3696–3705. DOI: 10.1021/jm0703901.
6. Shakya N., Srivastav N.C., Desroches N. et al. 3'-Bromo Analogues of Pyrimidine Nucleosides as a New Class of Potent Inhibitors of *Mycobacterium tuberculosis* // *Journal of Medicinal Chemistry*. 2010. Vol. 53. P. 4130–4140. DOI: 10.1021/jm100165w.
7. Долгова Е.В. Применение материалов на основе циановых эфиров (обзор). Часть 2. Микроэлектроника, 3D-печать, защита от ионизирующего излучения // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). С. 139–156. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-139-156.
8. Seri M., Marrocchi A. The carbon–carbon triple bond as a tool to design organic semiconductors for photovoltaic applications: an assessment of prospects and challenges // *Journal of Materials Chemistry C*. 2021. Vol. 9. No. 45. P. 16164–16186. DOI: 10.1039/D1TC02958D.
9. Любимова А.С., Ткачук А.И., Кузнецова П.А. Полимеры с памятью формы на основе эпоксидных смол // *Труды ВИАМ*. 2024. № 4 (134). С. 50–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-50-63.
10. Беспалов А.С., Салимов И.Э., Юдин А.В. Придание высоких гидрофобных свойств высокопористому керамическому материалу низкоконтрированными растворами фторпарафина в среде сверхкритического диоксида углерода // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). С. 39–48. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.

11. Silvestri F., Marrocchi A. Acetylene-based materials in organic photovoltaics // *International journal of molecular sciences*. 2010. Vol. 11. No. 4. P. 1471–1508. DOI: 10.3390/ijms11041471.
12. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Применение и модификация частиц для создания супергидрофобных покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 5 (123). С. 94–110. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
13. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А., Тимошина Е.А. Зависимость адгезии льда от гидрофобных свойств полимерных покрытий, нанесенных способом пневматического распыления // *Труды ВИАМ*. 2024. № 2 (132). С. 76–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-76-83.
14. He B., Huang J., Liu X. et al. Polymerizations of activated alkynes // *Progress in Polymer Science*. 2022. Vol. 126. P. 101503. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2022.101503.
15. Bhaskar R., Sharma A.K., Yadav M.K., Singh A.K. Sonogashira (Cu and amine free) and Suzuki coupling in air catalyzed via nanoparticles formed in situ from Pd(II) complexes of chalcogenated Schiff bases of 1-naphthaldehyde and their reduced forms // *Dalton Transactions*. 2017. Vol. 46. P. 15235–15248. DOI: 10.1039/c7dt02701j.
16. Kumar S., Saleem F., Mishra M.K., Singh A.K. Oxine based unsymmetrical (O, N, S/Se) pincer ligands and their palladium(II) complexes: synthesis, structural aspects and applications as a catalyst in amine and copper-free Sonogashira coupling // *New Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 41. P. 2745–2755. DOI: 10.1039/c7nj00067g.
17. Sabounchei S.J., Ahmadi M., Nasri Z. et al. Palladium(II) phosphine–ylide complexes as highly efficient pre-catalysts in additive- and amine-free Sonogashira coupling reactions performed under aerobic and low Pd loading conditions // *Tetrahedron Letters*. 2013. Vol. 54. P. 4656–4660. DOI: 10.1016/j.tetlet.2013.06.064.
18. Karami K., Najvani S.D., Naeini N.H., Herve P. Palladium particles from oxime-derived palladacycle supported on Fe₃O₄/oleic acid as a catalyst for the copper-free Sonogashira cross-coupling reaction // *Chinese Journal of Catalysis*. 2015. Vol. 36. P. 1047–1053. DOI: 10.1016/S1872-2067(15)60837-3.
19. Bahadorikhalili S., Ma'mani L., Mahdavi H., Shafiee A. Palladium catalyst supported on PEG-ylated imidazolium based phosphinite ionic liquid-modified magnetic silica core–shell nanoparticles: a worthy and highly water-dispersible catalyst for organic reactions in water // *RSC Advanced*. 2015. Vol. 5. P. 71297–71305. DOI: 10.1039/C5RA12747E.
20. Mohammadi E., Movassagh B. A polystyrene supported [PdCl–(SeCSe)] complex: a novel, reusable and robust heterogeneous catalyst for the Sonogashira synthesis of 1,2-disubstituted alkynes and 1,3-enynes // *New Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 42. P. 11471–11479. DOI: 10.1039/c8nj01042k.
21. Zhang J.-H., Li P., Hu W.-P., Wang H.-X. Substituent effect of diiminopalladium(II) pincer complexes on the catalysis of Sonogashira coupling reaction // *Polyhedron*. 2015. Vol. 96. P. 107–112. DOI: 10.1016/j.poly.2015.04.031.
22. Liu Q.-X., Cai K.-Q., Zhao Z.-X. Synthesis, structure and catalysis of a NHC–Pd(II) complex based on a tetradentate mixed ligand // *RSC Advanced*. 2015. Vol. 5. P. 85568–85578. DOI: 10.1039/C5RA11089K.
23. Khajehzadeh M., Moghadam M. A new poly(N-heterocyclic carbene Pd complex) immobilized on nano silica: An efficient and reusable catalyst for Suzuki–Miyaura, Sonogashira and Heck–Mizoroki C–C coupling reactions // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2018. Vol. 863. P. 60–69. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2018.03.030.
24. Platonova Y.B., Volov A.N., Tomilova L.G. Palladium(II) octaalkoxy- and octaphenoxyphtalocyanines: Synthesis and evaluation as catalysts in the Sonogashira reaction // *Journal of Catalysis*. 2019. Vol. 373. P. 222–227. DOI: 10.1016/j.jcat.2019.04.003.
25. Platonova Y.B., Volov A.N., Tomilova L.G. Palladium(II) phthalocyanines efficiently promote phosphine-free Sonogashira cross-coupling reaction at room temperature // *Journal of Catalysis*. 2020. Vol. 391. P. 224–228. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.08.019.
26. Volov A.N., Volov N.A., Platonova Y.B. Design and synthesis of novel 5-alkynyl pyrimidine nucleosides derivatives: Influence of C-6-substituent on antituberculosis activity // *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 2021. Vol. 48. P. 128261. DOI: 10.1016/j.bmcl.2021.128261.

References

1. Wang D., Gao S. Sonogashira coupling in natural product synthesis. *Organic Chemistry Frontiers*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 556–566. DOI: 10.1039/C3QO00086A.
2. Yan F., Zhang X., Li D. et al. Recent applications of the Sonogashira reaction in the synthesis of drugs and their derivatives: A review. *Applied Organometallic Chemistry*, 2025, vol. 39, no. 1, p. e7932. DOI: 10.1002/aoc.7932.
3. Röhlich C., Köhler K. Macrocyclic Palladium(II) Complexes in C–C Coupling Reactions: Efficient Catalysis by Controlled Temporary Release of Active Species. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 2010, vol. 352, no. 13, pp. 2263–2274. DOI: 10.1002/adsc.201000458.
4. Sonogashira K., Tohda Y., Hagihara N. A convenient synthesis of acetylenes: catalytic substitutions of acetylenic hydrogen with bromoalkenes, iodoarenes and bromopyridines. *Tetrahedron letters*, 1975, vol. 16, no. 50, pp. 4467–4470. DOI: 10.1016/S0040-4039(00)91094-3.
5. Johar M., Manning T., Tse C. et al. Growth Inhibition of *Mycobacterium bovis*, *Mycobacterium tuberculosis* and *Mycobacterium avium In Vitro*: Effect of 1- α -D-2'-Arabinofuranosyl and 1-(2'-Deoxy-2'-fluoro- α -D-2'-ribofuranosyl) Pyrimidine Nucleoside Analogs. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2007, vol. 50, pp. 3696–3705. DOI: 10.1021/jm0703901.
6. Shakya N., Srivastav N.C., Desroches N. et al. 3'-Bromo Analogues of Pyrimidine Nucleosides as a New Class of Potent Inhibitors of *Mycobacterium tuberculosis*. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2010, vol. 53, pp. 4130–4140. DOI: 10.1021/jm100165w.
7. Dolgova E.V. Application of cyanate ester materials. Part 2. Microelectronics, 3D printing, radiation protection. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), pp. 139–156. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 06, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-139-156.
8. Seri M., Marrocchi A. The carbon–carbon triple bond as a tool to design organic semiconductors for photovoltaic applications: an assessment of prospects and challenges. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, vol. 9, no. 45, pp. 16164–16186. DOI: 10.1039/D1TC02958D.
9. Lyubimova A.S., Tkachuk A.I., Kuznetsova P.A. Shape memory epoxy polymers. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), pp. 50–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 06, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-50-63.
10. Bespalov A.S., Salimov I.E., Yudin A.V. Imparting highly hydrophobic properties to a high-porous ceramic material with low-concentration solutions of fluoroparaffin in a supercritical carbon dioxide environment. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 39–48. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 06, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
11. Silvestri F., Marrocchi A. Acetylene-based materials in organic photovoltaics. *International journal of molecular sciences*, 2010, vol. 11, no. 4, pp. 1471–1508. DOI: 10.3390/ijms11041471.
12. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Application and modification of particles to create superhydrophobic coatings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), pp. 94–110. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 06, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
13. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A., Timoshina E.A. Dependence of ice adhesion on the hydrophobic properties of polymer coatings, applied of pneumatic spraying method. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), pp. 76–83. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 06, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-76-83.
14. He B., Huang J., Liu X. et al. Polymerizations of activated alkynes. *Progress in Polymer Science*, 2022, vol. 126, p. 101503. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2022.101503.
15. Bhaskar R., Sharma A.K., Yadav M.K., Singh A.K. Sonogashira (Cu and amine free) and Suzuki coupling in air catalyzed via nanoparticles formed in situ from Pd(II) complexes of chalcogenated Schiff bases of 1-naphthaldehyde and their reduced forms. *Dalton Transactions*, 2017, vol. 46, pp. 15235–15248. DOI: 10.1039/c7dt02701j.
16. Kumar S., Saleem F., Mishra M.K., Singh A.K. Oxine based unsymmetrical (O, N, S/Se) pincer ligands and their palladium(II) complexes: synthesis, structural aspects and applications as a catalyst in amine and copper-free Sonogashira coupling. *New Journal of Chemistry*, 2017, vol. 41, pp. 2745–2755. DOI: 10.1039/c7nj00067g.

17. Sabounchei S.J., Ahmadi M., Nasri Z. et al. Palladium(II) phosphine–ylide complexes as highly efficient pre-catalysts in additive- and amine-free Sonogashira coupling reactions performed under aerobic and low Pd loading conditions. *Tetrahedron Letters*, 2013, vol. 54, pp. 4656–4660. DOI: 10.1016/j.tetlet.2013.06.064.
18. Karami K., Najvani S.D., Naeini N.H., Herves P. Palladium particles from oxime-derived palladacycle supported on Fe₃O₄/oleic acid as a catalyst for the copper-free Sonogashira cross-coupling reaction. *Chinese Journal of Catalysis*, 2015, vol. 36, pp. 1047–1053. DOI: 10.1016/S1872-2067(15)60837-3.
19. Bahadorikhalili S., Ma'mani L., Mahdavi H., Shafiee A. Palladium catalyst supported on PEG-ylated imidazolium based phosphinite ionic liquid-modified magnetic silica core–shell nanoparticles: a worthy and highly water-dispersible catalyst for organic reactions in water. *RSC Advanced*, 2015, vol. 5, pp. 71297–71305. DOI: 10.1039/C5RA12747E.
20. Mohammadi E., Movassagh B. A polystyrene supported [PdCl–(SeCSe)] complex: a novel, reusable and robust heterogeneous catalyst for the Sonogashira synthesis of 1,2-disubstituted alkynes and 1,3-enynes. *New Journal of Chemistry*, 2018, vol. 42, pp. 11471–11479. DOI: 10.1039/c8nj01042k.
21. Zhang J.-H., Li P., Hu W.-P., Wang H.-X. Substituent effect of diiminopalladium(II) pincer complexes on the catalysis of Sonogashira coupling reaction. *Polyhedron*, 2015, vol. 96, pp. 107–112. DOI: 10.1016/j.poly.2015.04.031.
22. Liu Q.-X., Cai K.-Q., Zhao Z.-X. Synthesis, structure and catalysis of a NHC–Pd(II) complex based on a tetradentate mixed ligand. *RSC Advanced*, 2015, vol. 5, pp. 85568–85578. DOI: 10.1039/C5RA11089K.
23. Khajehzadeh M., Moghadam M. A new poly(N-heterocyclic carbene Pd complex) immobilized on nano silica: An efficient and reusable catalyst for Suzuki–Miyaura, Sonogashira and Heck–Mizoroki C–C coupling reactions. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2018, vol. 863, pp. 60–69. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2018.03.030.
24. Platonova Y.B., Volov A.N., Tomilova L.G. Palladium(II) octaalkoxy- and octaphenoxypthalocyanines: Synthesis and evaluation as catalysts in the Sonogashira reaction. *Journal of Catalysis*, 2019, vol. 373, pp. 222–227. DOI: 10.1016/j.jcat.2019.04.003.
25. Platonova Y.B., Volov A.N., Tomilova L.G. Palladium(II) phthalocyanines efficiently promote phosphine-free Sonogashira cross-coupling reaction at room temperature. *Journal of Catalysis*, 2020, vol. 391, pp. 224–228. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.08.019.
26. Volov A.N., Volov N.A., Platonova Y.B. Design and synthesis of novel 5-alkynyl pyrimidine nucleosides derivatives: Influence of C-6-substituent on antituberculosis activity. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2021, vol. 48, p. 128261. DOI: 10.1016/j.bmcl.2021.128261.

Информация об авторах

Платонова Яна Борисовна, научный сотрудник, к.х.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Леонов Александр Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кириллова Валерия Арамовна, аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Савилов Сергей Вячеславович, ведущий научный сотрудник, д.х.н., доцент, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Information about the authors

Yana B. Platonova, Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Aleksandr A. Leonov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valeria A. Kirillova, Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Sergey V. Savilov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Chem.), Associate Professor, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.05.2026.

The article was submitted 05.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 08.05.2026.