

Обзорная статья

УДК 544.47:661.898

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-108-121

**КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПАЛЛАДИЯ
КАК КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ РЕАКЦИЙ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ*****Часть 2. Реакции Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека**В.А. Кириллова¹, А.А. Леонов², Я.Б. Платонова¹, С.В. Савилов¹¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; dekanat@chem.msu.ru²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены каталитические системы на основе различных комплексов палладия для реакций Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека в гомогенном и гетерогенном вариантах. Показано, что использование селеноорганических и карбеновых лигандов позволяет достигать количественных выходов при сверхнизких загрузках катализатора. Рассмотрены подходы к иммобилизации комплексов на различные носители, обеспечивающие многократное использование катализаторов и минимальную потерю металла. Отмечена практическая значимость рассмотренных реакций для создания функциональных материалов с заданными характеристиками.

Ключевые слова: реакция Сузуки–Мияуры, реакция Мизороки–Хека, карбеновые комплексы, функциональные материалы, халькогенсодержащие лиганды, гетерогенный катализ, иммобилизация

Для цитирования: Кириллова В.А., Леонов А.А., Платонова Я.Б., Савилов С.В. Комплексные соединения палладия как катализаторы для реакций кросс-сочетания для получения функциональных материалов. Часть 2. Реакции Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 108–121. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-108-121.

Review article

**PALLADIUM COMPLEX COMPOUNDS
AS CATALYSTS FOR CROSS-COUPLING REACTIONS
FOR THE PREPARATION OF FUNCTIONAL MATERIALS
Part 2. Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck reactions**V.A. Kirillova¹, A.A. Leonov², Ya.B. Platonova¹, S.V. Savilov¹¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dekanat@chem.msu.ru²Federal 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 considers catalytic systems based on a variety of palladium complexes for Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck reactions in homogeneous and heterogeneous versions. It has been shown that the use of organoselenium and carbene ligands makes it possible to achieve quantitative yields at ultra-low catalyst loads. Approaches to the immobilization of complexes onto different carriers that enable repeated use of catalysts and minimal metal loss are considered. The practical significance of the considered reactions for the creation of functional materials with specified characteristics is noted.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (160), 2026.

Keywords: Suzuki–Miyaura reaction, Mizoroki–Heck reaction, carbene complexes, functional materials, chalcogen-containing ligands, heterogeneous catalysis, immobilization

For citation: Kirillova V.A., Leonov A.A., Platonova Ya.B., Savilov S.V. Palladium complex compounds as catalysts for cross-coupling reactions for the preparation of functional materials. Part 2. Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck reactions. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 108–121. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-108-121.

Введение

Вторая часть обзора посвящена реакциям Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека – двум фундаментальным методам палладий-катализируемых кросс-сочетаний, открытым соответственно в 1979 и 1972 гг. [1, 2]. В отличие от рассмотренной в первой части статьи реакции Соногаширы, требующей сокатализатора йодида меди (I) для образования тройной углерод-углеродной связи, реакции Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека (соответственно сочетание органических соединений бора и алкенов с арил- или винилгалогенидами) позволяют эффективно формировать одинарные и двойные углерод-углеродные связи. Получаемые в результате этих реакций арил- и винилпроизводные, а также замещенные алкены являются ключевыми структурными блоками множества природных соединений, фармацевтических препаратов и агрохимикатов. Более того, эти методы широко применяются для синтеза сопряженных полимеров – макромолекул с чередующимися одинарными и двойными связями, обладающих полупроводниковыми свойствами, высокой оптической активностью и электропроводностью [3, 4]. Благодаря уникальным характеристикам материалы, получаемые с помощью этих реакций, находят потенциальное применение в гибкой электронике, солнечных батареях, светодиодах, полевых транзисторах, а также в качестве химических датчиков [5], функциональных покрытий [6–8] и биомедицинских устройств для визуализации и терапии.

Реакция Сузуки–Мияуры Гомогенные катализаторы

В работе [9] в качестве катализаторов для реакции Сузуки–Мияуры использованы как хелатные комплексы палладия с селеноорганическими лигандами с различным размером хелатного кольца, так и пинцерные комплексы SeCSe-палладабициклов (рис. 1). Такой выбор лигандов, как объясняют авторы, связан с высоким сродством к Pd-центрам, что обеспечивает стабильную координацию и препятствует быстрому высвобождению палладия из цикла. Использование Se-содержащих хелатных комплексов позволило получить продукт кросс-сочетания с количественными выходами в течение 1–3 ч, причем содержание катализатора составило 0,1 % (мольн.). Уменьшение количества катализатора в 10 раз привело к увеличению продолжительности синтеза, в то время как выходы остались практически количественными.

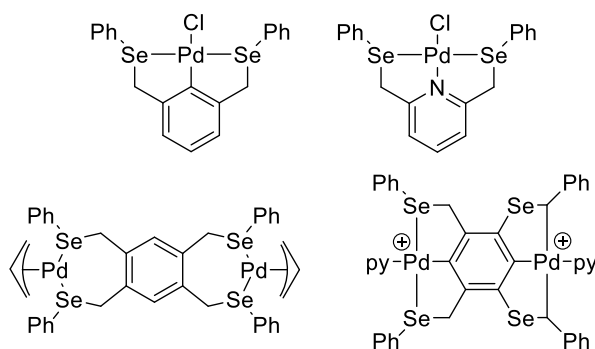


Рис. 1. SeCSe-палладабициклы: Ph – фенил; py – пиридин

Несимметричный NCN-карбеновый комплекс палладия (II) выступил в качестве катализатора в реакции кросс-сочетания Сузуки–Мияуры паразамещенных бромбензолов и продемонстрировал высокие выходы, достигающие количественных [10]. Каталитическая система, содержащая 0,1 % комплекса, карбонат натрия и диметилформамид (ДМФА), позволила получить высокие значения частоты оборотов (Turnover Frequency – TOF), причем для субстратов с электроноакцепторными группами этот параметр достиг максимального для всей серии значения ($\text{TOF} = 250 \text{ ч}^{-1}$), а выходы были количественными.

Как и в предыдущем исследовании, высокую каталитическую активность продемонстрировала серия несимметричных CNN-палладациклов с иминопиридиными лигандами [11]. Эти комплексы палладия в реакции Сузуки–Мияуры вторичных бензилбромидов и арилбороновых кислот позволили получить различные 1,1-диарилалканы с высокими выходами (70–95 %). Кроме того, количество оборотов катализатора (Turnover Number – TON) составило 47000 при загрузке катализатора 0,01 и 0,001 % (мольн.).

В работе [12] получены различные бис-N-гетероциклические комплексы палладия и N-гетероциклические палладациклы, которые далее применяли в каталитических реакциях сочетания Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека. Системы с применением полученных соединений продемонстрировали высокую эффективность, причем выходы целевых продуктов в реакции Сузуки–Мияуры с применением палладациклов были выше, чем для бис-NHC-соединений палладия. Однако для реакций Мизороки–Хека подобная тенденция не сохранилась (т. е. оба вида каталитических систем показали схожую эффективность), а выходы продуктов составили 80–96 %, что превышает выходы в случае реакции сочетания Сузуки–Мияуры.

Порфириновый комплекс палладия (II) использовали в качестве катализатора для реакции Сузуки–Мияуры в водной среде и в атмосфере воздуха [13]. Реакцию проводили при температуре 100 °C в течение 4 ч в присутствии 0,1 % (мольн.) катализатора. Выходы целевых продуктов реакции составили >80 %, соединений, содержащих группы с электроноакцепторными свойствами, – на уровне 93–99 %. Кроме того, катализатор можно использовать повторно до трех циклов, но выход целевого продукта с каждым разом существенно уменьшается, вероятно, из-за снижения стабильности комплекса в реакционных условиях.

Авторы работы [14] сравнили активность катализаторов в виде различных комплексов палладия: комплекс типа Робсона, а также порфириновый и фталоцианиновый. На примере реакции Мизороки–Хека показано, что порфириновый комплекс палладия позволил получить продукты с низкими выходами в случае сочетания арилбромидов, а для арилхлоридов был неэффективен. При этом фталоцианин палладия продемонстрировал высокую активность, конверсия стирола в отдельных случаях превысила 50 %. Для реакции Сузуки–Мияуры активности комплекса I (рис. 2) и фталоцианина палладия оказались одинаково высокими.

Биметаллический Ni-замещенный аналог комплекса I получен в работе [15] и применен как катализатор реакций Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека. Для первой реакции кросс-сочетания в ходе оптимизации параметров, где варьировали как растворитель, так и количество катализатора, получен широкий набор данных, выходы составили от 16 до 96 %. Согласно данным газовой хроматографии–масс-спектрометрии, обнаружены молекулярные ионы, соответствующие натрий- и протонзамещенным со стороны никеля бициклическим комплексам, при этом палладий остался нетронутым. Это свидетельствует о большей подвижности никеля и доказывает прочную координацию палладия, чем обусловлена высокая каталитическая активность его комплексов.

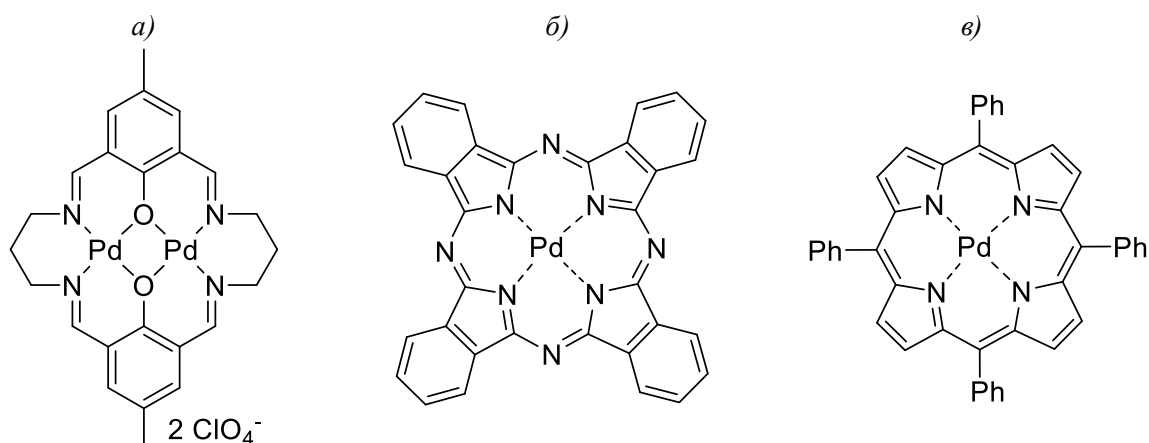


Рис. 2. Комплексы палладия типа Робсона (а), фталоцианиновый (б) и порфириновый (в): Ph – фенил

Комплексы палладия с тридентатными основаниями Шиффа и трифенилфосфином в качестве лигандов использованы как гомогенные катализаторы для реакции Сузуки–Мияуры. Пять различных оснований Шиффа синтезированы и использованы для получения комплексов. В модельной реакции кросс-сочетания, которая проведена в присутствии 0,01 ммоль катализатора, K_2CO_3 и толуола в течение 5 ч при 70 °С, выходы целевого продукта достигли 79–89 %. Для реакций веществ с заместителями различной природы выходы целевого продукта составили от 65 до 95 %, причем для бензолов с галогенами не наблюдался продукт гомосочетания, а для других соединений с электроноакцепторными группами его доля не превышала 35 % [16].

Хелатные комплексы палладия с лигандами в виде оснований Шиффа использовали в качестве гомогенных катализаторов для реакций Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека. Каталитические системы с их участием (в количестве 0,01 ммоль) в присутствии различных органических и неорганических оснований и растворителей показывают в модельной реакции удовлетворительные результаты с выходами от 35 до 89 %. Использование K_2CO_3 и смеси ДМФА с водой в качестве наиболее эффективных оснований и растворителя соответственно позволило достичь в реакциях с субстратами, содержащими как электронодонорные, так и электроноакцепторные заместители, высоких выходов (70–80 %) для каждого из пяти полученных комплексов [17].

Гетерогенные катализаторы

Несмотря на широкую применимость гомогенных катализаторов реакции Сузуки–Мияуры, нельзя обойти вниманием альтернативный подход – использование гетерогенных систем. Они обладают рядом преимуществ, благодаря которым существует отдельное направление исследований. Рассмотрим эти катализаторы, их свойства и специфику применения в тех же процессах кросс-сочетания.

В исследовании [18] реакции Мизороки–Хека и Сузуки–Мияуры проводили в присутствии йодида тетраakis(4-N, N, N-триметиламмонийфенилен)порфиринапалладия (II) ($[Pd(TTMAPP)]I_4$), иммобилизованного на ионообменные смолы, такие как Dowex 50 WX8 и Amberlite IR-120. Катионный порфирин палладия закрепляли на смолах с помощью электростатических взаимодействий между кватернизованными азотами заместителей порфиринового цикла и анионными заместителями смолы. В реакциях кросс-сочетания катализаторы показали высокую активность, выходы целевых продуктов составили 77–99 % (0,43 и 0,59 % (мольн.) Pd при использовании смол Dowex 50 WX8

и Amberlit IR-120 соответственно) для реакции сочетания Сузуки–Мияуры и 56–97 % для реакции сочетания Мизороки–Хека, но количество катализаторов для второго сочетания увеличили в 1,5–2 раза. Более того, упомянутые материалы можно многократно использовать без существенной потери каталитической активности, при этом выщелачивание металла составило >1 и 0,1 % для реакций сочетания Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека соответственно.

Материал, представляющий собой наночастицы палладия, закоординированные в микропористом сален-порфириновом полимере, обладает превосходной каталитической активностью в реакциях сочетания Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека в водной среде или смеси на основе диоксана и воды [19]. Выходы при загрузке катализатора 0,3 % (мольн.) составили 78–99 %. Кроме того, катализатор также продемонстрировал исключительную стабильность в реакции йодбензола с фенилбороновой кислотой: его удалось использовать повторно до 10 раз без потери каталитической активности.

Еще одним примером гетерогенного катализатора на основе матрицы из тетрапиррольных соединений является материал, называемый ковалентным органическим каркасом на основе порфирина с иммобилизованным Pd [20]. Катализатор демонстрирует превосходную активность в реакции сочетания Сузуки–Мияуры, позволяя получить целевой продукт с количественными выходами для субстратов с заместителями разной природы. Авторы также сравнили эффективность систем, содержащих полученный материал, с системами, где в качестве катализатора выступал Pd/C. Палладий, иммобилизованный в органическом порфириновом каркасе, оказался уже в первом цикле в 1,5 раза активнее, чем Pd/C. Повторное использование материала на протяжении еще четырех циклов не привело к снижению каталитической активности, тогда как данная характеристика Pd/C к концу пятого цикла снизилась более чем в 10 раз. Согласно результатам исследований, проведенных до и после каталитических испытаний, материал является стабильным для фиксации ионов палладия, поскольку не выявлено ни образования агломератов, ни вымывания металла в реакционную среду.

Авторы работы [21] синтезировали макроциклический Pd-содержащий катализатор на основе полистирола. Макроциклический лиганд, хелатирующий атом палладия, иммобилизован на смоле Меррифилда и использован для проведения реакции Сузуки–Мияуры в водной среде. Полученные соединения (гомогенный и гетерогенный вариант) продемонстрировали умеренную каталитическую активность и хемоселективность. Так, в реакции сочетания 2,6-бромпиридина с 4-метоксифенилбороновой кислотой моноариллированное соединение было основным продуктом. Кроме того, гетерогенный катализатор способствовал протеканию реакции во втором цикле подряд без потери активности и селективности.

Порфириновый комплекс палладия, ковалентно привитый к поверхности оксида графена с помощью 3-хлорпропилтриметоксисилана, исследовали в качестве прекатализатора в реакциях Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека. Обнаружено, что каталитическая система с его участием обладает высокой активностью, а выход продуктов для различных реакций сочетания достигает 98 %. Кроме того, конъюгат можно регенерировать и использовать повторно вплоть до пяти циклов без существенной потери активности [22].

Палладиевый катализатор на основе полимера из порфирина использован в гетерогенной системе для реакции сочетания Сузуки–Мияуры в водной среде [23]. Результаты показали, что этот Pd-порфириновый полимер обладает высокой каталитической активностью даже в случае малоактивных арилхлоридов. Материал также можно использовать несколько раз без существенного снижения каталитической активности.

Реакция Мизороки–Хека

Шесть комплексов палладия с тетрадентатными лигандами в виде оснований Шиффа получены в работе [24] и исследованы в качестве гомогенных катализаторов для реакции Мизороки–Хека. Катализаторы проявили умеренную активность в реакции кросс-сочетания бромбензола со стиролом, выходы целевого продукта оказались в диапазоне 47–85 %. Значение TON составило $\sim(6000\text{--}10000)$, что, по мнению авторов, является стандартной величиной для таких комплексов и занимает промежуточное положение между значениями для фосфиновых комплексов и палладациклов.

Два новых шестичленных пинцерных NCN-комплекса палладия получены путем прямого металлизирования и исследованы в реакции Мизороки–Хека [25]. Оба комплекса обладают схожей высокой каталитической активностью в реакции сочетания арилбромидов с акрилатами и стиролом в системе, где N, N-диметилацетамид выступает в качестве растворителя и триэтиламин – в качестве основания. Выходы целевых продуктов составили 65–95 %.

Авторы работы [26] использовали пинцерные комплексы палладия CNC-типа в качестве катализаторов реакции Мизороки–Хека. Кросс-сочетание арилгалогенидов и *трет*-бутилакрилата в присутствии 1 % (мольн.) катализатора протекает с умеренными выходами в течение 24 ч. Проведен также качественный анализ с ртутью, результаты которого оказались «положительными». Это подтверждает, что данные комплексы не стабильны в условиях проведения реакции, благодаря чему происходит высвобождение частиц палладия в реакционную среду.

В работе [27] синтезированы тетраядерные комплексы палладия с лигандами аномальных N-гетероциклических карбенов (aNHC) на основе имидазольных и бензимидазольных фрагментов, содержащих орто-гидроксильные группы. Катализаторы испытаны в реакции Мизороки–Хека с использованием арилхлоридов, включая электронно-обогащенные и деактивированные субстраты. Тетраядерный комплекс (рис. 3) проявил исключительно высокую каталитическую активность при низком содержании палладия (0,2 % (мольн.)), обеспечивая количественные выходы продуктов при температуре $\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ионной жидкости (тетрабутиламмоний бромид). Значения TON достигали 500–1900, а TOF – до 470 ч^{-1} . Эффективность комплекса объясняется высокой электронной плотностью на центрах Pd, что облегчает окислительное присоединение арилхлоридов, определяющее скорость процесса. По активности тетраядерный комплекс превосходит моноядерные аналоги и представляет собой перспективную бесфосфиновую каталитическую систему для реакций кросс-сочетания.

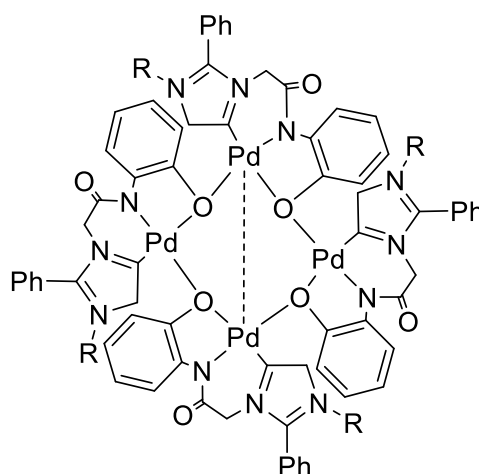


Рис. 3. N-гетероциклический карбеновый тетраядерный комплекс палладия: Ph – фенил

Нестандартная каталитическая система на основе порфиринового комплекса палладия для реакции кросс-сочетания Мизороки–Хека йодбензола с этилакрилатом создана авторами работы [28]. Порфирин палладия, содержащий кватернизованные пиридиниевые заместители и совмещенный с ионной жидкостью тетрафторборат *n*-бутилпиридиния ($[\text{Bpy}]\text{BF}_4$), продемонстрировал высокую каталитическую активность в реакции кросс-сочетания йодбензола и этилакрилата с $\text{TOF} = 56000 \text{ ч}^{-1}$ в аэробных условиях. Комбинация ионного порфирина с ионной жидкостью $[\text{Bpy}]\text{BF}_4$ не только привела к высокой эффективности, но и позволила повторно использовать катализатор.

Фталоцианиновый комплекс палладия (II) иммобилизовали для использования в качестве гетерогенного катализатора в реакции сочетания Мизороки–Хека и Соногашеры [29]. Материал на основе оксида графена и ковалентно привитого тетрасульфотфалоцианина палладия посредством кератина, извлеченного из шерсти, оказался высокоэффективным в реакциях кросс-сочетания, позволяя получать целевые продукты с выходами 85–99 %. Авторы показали, что палладий в конъюгате присутствует только в виде Pd^{2+} , а в ходе реакции извлекается из комплекса, однако в пренебрежимо малых количествах ($<0,1 \text{ ppm}$, согласно данным метода атомно-абсорбционной спектроскопии).

Уже известный прием иммобилизации комплекса палладия на полистирольный полимер также применен в работе [30]. Порфириновый комплекс палладия на основе полистирола показал себя эффективным гетерогенным катализатором для кросс-сочетания Мизороки–Хека арилийодидов с этилакрилатом. Реакция йодбензола и этилакрилата в атмосфере азота при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и загрузке катализатора 0,1 % (мольн.) Pd позволила получить продукт сочетания с количественным выходом, что значительно выше, чем при использовании в качестве гомогенного катализатора того же порфиринового комплекса палладия (II) (41,3 %). Гетерогенный катализатор повторно использовали 6 раз без существенной потери каталитической активности. Авторы сравнили полученный результат с аналогичными работами, где в качестве катализаторов применяли Pd/C, порфириновый комплекс палладия, иммобилизованный на мезопористый носитель SBA-15, а также комплекс палладия, привитый к диоксиду кремния, и обнаружили или значительное снижение каталитической активности на протяжении работы в нескольких последовательных циклах, или значительное выщелачивание металла.

В работе [31] синтезирована серия порфириновых комплексов палладия с различными заместителями. Катализаторы исследованы в модельной реакции Мизороки–Хека 1-бром-4-нитробензола и *трет*-бутилакрилата. Тетракис(*n*-сульфонатофенил)порфириновый комплекс палладия (II) проявил высокую каталитическую активность: при невысокой загрузке (0,05 % (мольн.)) за 1,5 ч протекания реакции обеспечил 95 % выделенного продукта сочетания при $100 \text{ }^\circ\text{C}$. После оптимизации параметров реакции данный катализатор позволил получить серию замещенных эфиров коричной кислоты с выходами 87–95 % и значениями TON до 1900.

В работе [32] описаны синтез и каталитическая активность фосфалладациклических комплексов, содержащих порфириновые лиганды с различными центральными металлами (рис. 4). Они исследованы в реакции Мизороки–Хека *p*-бромбензальдегида и бутилакрилата. Установлено, что активность катализаторов в значительной степени зависит от центрального металла: Ni-порфириновый комплекс проявил наибольшую эффективность ($\text{TOF} = 3900 \text{ ч}^{-1}$ при 0,005 % (мольн.)), превосходя Zn- и безметалльный аналоги.

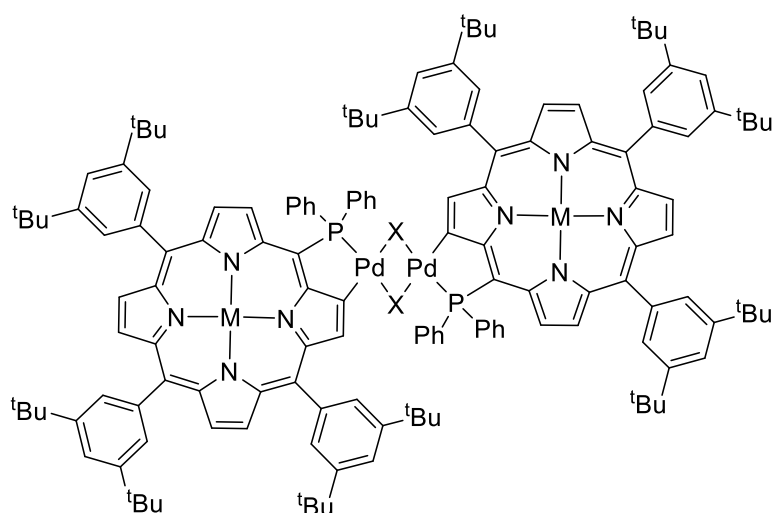


Рис. 4. Фосфаллладациклический комплекс, где $M = \text{Zn}, \text{Ni}, \text{H}_2$; $X = \text{Cl}$, ацетат; $t\text{Bu}$ – *трет*-бутил; Ph – фенил

Хлорид тетрааминпалладия (II) гетерогенизирован на гидрофильном оксиде графена. Два образца с содержанием палладия 2 и 5 % получены и испытаны в качестве катализаторов в реакции Мизороки–Хека. Полученные материалы оказались высокоэффективными, активными и селективными катализаторами, причем образец с содержанием 2 % Pd оказался более эффективен. Кроме того, исследовано влияние добавок, а именно четвертичных аммониевых солей (тетрабутиламмония бромид и тетрабутиламмония хлорид) и ионной жидкости (1-бутил-3-метилимидазолийбромид) на каталитическую активность. Результаты показали, что самые высокие показатели конверсии получены при использовании тетрабутиламмония хлорида. Селективность по образованию основного продукта (транс-стильбен) находилась в диапазоне 91–96 % [33].

Авторы работы [34] получили комплексы палладия (II) с тридентатным (ONO) и бидентатным (NO) лигандами. Исследования показали, что комплексы имеют плоскую структуру. Данные соединения проявили высокую каталитическую активность в реакции Мизороки–Хека: при загрузке катализатора 0,01 ммоль за 2 ч протекания реакции при 80 °C выходы продуктов составили 70–87 %.

Применение реакций кросс-сочетания

Анализ последних публикаций показывает, что палладий-катализируемые реакции кросс-сочетания, такие как реакции Сузуки–Мияура и Мизороки–Хека, вышли за рамки классического органического синтеза и стали удобными инструментами для создания функциональных материалов для различного применения.

В работе [35] разработана стратегия синтеза ковалентных органических каркасов (COF), использующая реакцию Сузуки–Мияуры. Авторам удалось получить кристаллические COF с kgm -топологией с выходами до 81 %. Материалы обладают высокой пористостью (удельная площадь поверхности до 1038 $\text{m}^2/\text{г}$), термической стабильностью до 533 °C и устойчивостью в широком диапазоне pH. Данные каркасные структуры продемонстрировали возможность эффективного разделения смеси этилена и пропилена: в динамических условиях C_2H_4 элюировался первым с высокой чистотой, тогда как C_3H_6 задерживался в колонке.

Авторы работы [36] разработали подход, позволяющий получить 24 π -сопряженных полимера с высокими молекулярными массами и выходами до 99 %. Полимеры, полученные при комнатной температуре с помощью реакции Сузуки–Мияуры

с использованием палладиевого комплекса, демонстрируют более высокую структурную регулярность, невысокие коэффициенты полидисперсности и значительно лучшие электрофизические свойства по сравнению с аналогами, синтезированными традиционными методами. Все это делает полученные материалы потенциально применимыми в оптоэлектронных устройствах. Кроме того, показана возможность масштабирования производства по разработанной методике.

В работе [37] применен эффективный метод синтеза новых ферроценированных сопряженных диенов посредством реакции Мизороки–Хека с использованием селенированного пинцерного комплекса NHC-Pd(II) в качестве катализатора. Реакция протекает в отсутствие растворителя и инертной атмосферы при 100 °C в течение 3 ч с участием фосфата калия в качестве основания и тетрабутиламмоний бромида в качестве межфазного катализатора. Метод позволяет получать целевые продукты с выходами до 80 % для 22 различных субстратов, включая производные стирола (в том числе с электронодонорными и электроноакцепторными заместителями), акрилаты, а также внутренние алкены (циклогептатриен, циклогексадиен).

Заключения

В данном обзоре обобщены исследования по реакциям кросс-сочетания Сузуки–Мияуры и Мизороки–Хека за последние 20 лет, связанные с катализаторами на основе комплексных соединений палладия (II). Следует отметить высокую эффективность комплексов палладия с селеноорганическими, NCN-карбеновыми и CNN-иминопиридильными лигандами для реакции Сузуки–Мияуры, позволяющих добиваться количественных выходов при сверхнизких загрузках катализатора (0,01–0,10 % (мольн.)). Важно отметить преимущества гетерогенных систем. Так, иммобилизация порфириновых и фталоцианиновых комплексов на полимеры, оксид графена или смолы значительно повышает их эффективность, позволяет проводить процесс в водной среде и дает возможность многократного использования (до 10 циклов), минимизируя выщелачивание металла. Эта тенденция сохраняется для всех типов реакций кросс-сочетания.

Реакции кросс-сочетания являются важной составляющей органической химии, признанной во всем мире, и позволяют в одну стадию получать сложные молекулы, обладающие рядом активностей. Разработка катализаторов для подобных реакций на протяжении еще долгих лет будет оставаться важной задачей химического сообщества.

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

Список источников

1. Miyaura N., Yamada K., Suzuki A. A new stereospecific cross-coupling by the palladium-catalyzed reaction of 1-alkenylboranes with 1-alkenyl or 1-alkynyl halides // *Tetrahedron Letters*. 1979. Vol. 20. No. 36. P. 3437–3440. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)95429-2.
2. Heck R.F., Nolley Jr J.P. Palladium-catalyzed vinylic hydrogen substitution reactions with aryl, benzyl, and styryl halides // *The Journal of organic chemistry*. 1972. Vol. 37. No. 14. P. 2320–2322. DOI: 10.1021/jo00979a024.
3. Uddin A., Pandey K., Plunkett K.N. Indacenodipyrene containing small molecules and ladder polymers // *Tetrahedron Chem*. 2022. Vol. 2. P. 100019. DOI: 10.1016/j.tchem.2022.100019.
4. Zhu X., Liu F., Ba X., Wu Y. Synthesis of Ladder-Type 9,9'-Bifluorenylidene-Based Conjugated Oligomers via a Pd-Catalyzed Tandem Suzuki Coupling/Heck Cyclization Approach // *Organic letters*. 2022. Vol. 24. No. 31. P. 5851–5854. DOI: 10.1021/acs.orglett.2c02418.

5. Devanshi Das S., Koul N., Cherwoo L. et al. Conjugated Polymer-Based Smart Biosensors for Pathogen Detection in Food Sector // *Food Analytical Methods*. 2025. Vol. 18. No. 6. P. 946–962. DOI: 10.1007/s12161-025-02764-4.
6. 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.
7. Ширякина Ю.М., Китаева Н.С., Афанасьева Е.А., Бутузов А.В. Амфифильные соединения и гидрофобизация (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 99–115. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-99-115.
8. 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: 03.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
9. Sigeev A.S., Peregudov A.S., Cheprakov A.V., Beletskaya I.P. The Palladium Slow-Release Pre-Catalysts and Nanoparticles in the «Phosphine-Free» Mizoroki–Heck and Suzuki–Miyaura Reactions // *Advanced Synthesis & Catalysis*. 2015. Vol. 357. P. 417–429.
10. Avila-Sorrosa A., Jimenez-Vazquez H.A., Reyes-Arellano A. et al. Novel synthesis of a non-symmetric N1CN2 Pd(II) pincer complex by a tandem reaction using a meta-hydroxylated imine ligand // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2016. Vol. 819. P. 69–75. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2016.06.019.
11. Jin L., Wei W., Sun N. et al. Unsymmetrical CNN-palladacycles with geometry-constrained iminopyridyl ligands: an efficient precatalyst in Suzuki coupling for accessing 1,1-diarylalkanes from secondary benzylic bromides // *Organic Chemistry Frontiers*. 2018. Vol. 5. P. 2484–2491. DOI: 10.1039/C8QO00517F.
12. Kılınçarslan R., Günay M.E., Fırıncı R. et al. New palladium(II)–N-heterocyclic carbene complexes containing benzimidazole-2-ylidene ligand derived from menthol: synthesis, characterization and catalytic activities // *Applied Organometallic Chemistry*. 2016. Vol. 30. P. 268–272.
13. Kostas I.D., Coutselos A.G., Charalambidis G., Skondra A. The first use of porphyrins as catalysts in cross-coupling reactions: a water-soluble palladium complex with a porphyrin ligand as an efficient catalyst precursor for the Suzuki–Miyaura reaction in aqueous media under aerobic conditions // *Tetrahedron Letters*. 2007. Vol. 48. P. 6688–6691. DOI: 10.1016/j.tetlet.2007.07.141.
14. 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.
15. Mieczynska E., Lisowski J., Trzeciak A.M. A macrocyclic Pd(II)–Ni(II) complex in Heck and Suzuki reactions // *Inorganica Chimica Acta*. 2015. Vol. 431. P. 145–149. DOI: 10.1016/j.ica.2014.11.008.
16. Beigi Z., Kianfar A.H., Mohammadnezhad G. et al. Palladium(II) complexes with diaminomaleonitrile-based Schiff-base ligands: synthesis, characterization and application as Suzuki–Miyaura coupling catalysts // *Polyhedron*. 2017. Vol. 134. P. 65–72. DOI: 10.1016/j.poly.2017.06.009.
17. Turan N., Buldurun K., Bursal E., Mahmoudi G. Pd(II)-Schiff base complexes: Synthesis, characterization, Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck cross-coupling reactions, enzyme inhibition and antioxidant activities // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2022. Vol. 970. P. 122370. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2022.122370.
18. Sadegh F., Bagheri O., Moghadam M. et al. Palladium(II) tetrakis(4-N, N, N-trimethylammoniumphenylene) porphyrin supported on ion-exchange resins as efficient and reusable catalysts for C–C coupling reactions // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2014. Vol. 759. P. 46–57. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2014.02.006.
19. Ju P., Wu S., Su Q. et al. Salen–porphyrin-based conjugated microporous polymer supported Pd nanoparticles: highly efficient heterogeneous catalysts for aqueous C–C coupling reactions // *Journal of Materials Chemistry A*. 2019. Vol. 7. P. 2660–2666. DOI: 10.1039/C8TA11330K.

20. Hou Y., Zhang X., Sun J. et al. Good Suzuki-coupling reaction performance of Pd immobilized at the metal-free porphyrin-based covalent organic framework // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015. Vol. 214. P. 108–114. DOI: 10.1016/j.micromeso.2015.05.002.
21. Yamamoto K., Nameki R., Sogawa H., Takata T. Synthesis of polystyrenesupported Pd(II)-containing macrocyclic complex as a reusable catalyst for chemoselective Suzuki–Miyaura coupling reaction // *Tetrahedron Letters*. 2020. Vol. 61. P. 151870–151873. DOI: 10.1016/j.tetlet.2020.151870.
22. Bahrami K., Kamrani S.N. Synthesis, characterization and application of graphene palladium porphyrin as a nanocatalyst for the coupling reactions such as: Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck // *Applied Organometallic Chemistry*. 2018. Vol. 32. No. 2. P. e4102. DOI: 10.1002/aoc.4102.
23. Chen J., Zhang J., Zhu D., Li T. Porphyrin-based polymer-supported palladium as an excellent and recyclable catalyst for Suzuki–Miyaura coupling reaction in water // *Applied Organometallic Chemistry*. 2018. Vol. 32. No. 2. P. e3996. DOI: 10.1002/aoc.3996.
24. Andrade A.P.S., Arantes L.M., Kadooca J.Y. et al. Palladium Complexes with Tetradentate Schiff Bases or their Corresponding Amines: Synthesis and Application in Heck Reactions // *ChemistrySelect*. 2016. Vol. 5. P. 886–890. DOI: 10.1002/slct.201600244.
25. Yang L., Zhang X., Mao P. et al. NCN pincer palladium complexes based on 1,3-dipicolyl-3,4,5,6-tetrahydropyrimidin-2-ylidenes: synthesis, characterization and catalytic activities // *RSC Advanced*. 2015. Vol. 5. P. 25723–25729. DOI: 10.1039/c5ra01706h.
26. Wang H., Zhang B., Yan X., Guo S. Palladium pincer-type complexes and zwitterionic sulfur adducts of pyridine-bridged bis(1,2,3-triazolin-5-ylidenes): syntheses, characterizations and catalytic applications // *Dalton Transactions*. 2018. Vol. 47. P. 528–537. DOI: 10.1039/c7dt03687f.
27. Lee J.-Y., Su Y.-S., Wang Y.-S., Lee H.M. Tetranuclear Palladium Complexes of Abnormal N-Heterocyclic Carbene Ligands and their Catalytic Activities in Mizoroki–Heck Coupling Reaction of Electron-Rich Aryl Chlorides // *Advanced Synthesis & Catalysis*. 2019. Vol. 361. P. 4714–4726. DOI: 10.1002/adsc.201900805.
28. Wan Q., Liu Y. The Ionic Palladium Porphyrin as a Highly Efficient and Recyclable Catalyst for Heck Reaction in Ionic Liquid Solution Under Aerobic Conditions // *Catalysis Letters*. 2009. Vol. 128. P. 487–492. DOI: 10.1007/s10562-008-9780-2.
29. Hezarkhani Z., Shaabani A. Palladium(II) tetrasulfophthalocyanine covalently immobilized on keratin protein grafted graphene oxide nanosheets as a new highperformance catalyst for C–C coupling reactions // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. P. 98956–98967. DOI: 10.1039/c6ra18814a.
30. Huang Y., Yang L., Huang M. et al. Polystyrene microsphere-immobilized palladium(II) porphyrin as mild, reusable, and highly efficient catalyst for Heck reaction // *Particuology*. 2015. Vol. 22. P. 128–133. DOI: 10.1016/j.partic.2014.08.003.
31. Rao K.U., Lakshmidhevi J., Appa R.M. et al. Palladium(II)-Porphyrin Complexes as Efficient and Eco-Friendly Catalysts for Mizoroki–Heck Coupling // *ChemistrySelect*. 2017. Vol. 2. P. 7394–7398. DOI: 10.1002/slct.201701413.
32. Matano Y., Matsumoto K., Shibano T., Imahori H.J. Porphyrin-appended phosphapalladacycle precatalysts: effects of central metals on the catalytic activity in a high-temperature Heck reaction // *Journal of Porphyrins & Phthalocyanines*. 2011. Vol. 15. P. 1172–1182. DOI: 10.1142/S1088424611004087.
33. Mastalir A., Hancsárik M., Szabó T. Immobilization of a Pd(II) complex on hydrophilic graphite oxide and its catalytic investigation in the Heck coupling reaction // *Applied Organometallic Chemistry*. 2020. Vol. 34. No. 4. P. e5565. DOI: 10.1002/aoc.5565 2020.
34. Akdeniz A., Turan N. Synthesis, characterization, Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck cross-coupling reactions of Schiff base-Pd(II) complexes // *Journal of Molecular Structure*. 2023. Vol. 1287. P. 135724. DOI: 10.1016/j.molstruc.2023.135724.
35. Han X.H., Gong K., Huang X. et al. Syntheses of covalent organic frameworks via a one-pot Suzuki coupling and Schiff's base reaction for C₂H₄/C₃H₆ separation // *Angewandte Chemie International Edition*. 2022. Vol. 61. No. 25. P. e202202912. DOI: 10.1002/anie.202202912.
36. Xiong H., Lin Q., Lu Y. et al. General room-temperature Suzuki–Miyaura polymerization for organic electronics // *Nature Materials*. 2024. Vol. 23. No. 5. P. 695–702. DOI: 10.1038/s41563-023-01794-9.

37. Soni A., Sharma C., Negi L., Joshi R.K. NHC-Pd(II) full pincer catalyzed Mizoroki–Heck type cross-coupling of vinyl chloride and alkenes: Synthesis of novel ferrocenylated conjugated dienes // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2023. Vol. 983. P. 122550. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2022.122550.

References

1. Miyaura N., Yamada K., Suzuki A. A new stereospecific cross-coupling by the palladium-catalyzed reaction of 1-alkenylboranes with 1-alkenyl or 1-alkynyl halides. *Tetrahedron Letters*, 1979, vol. 20, no. 36, pp. 3437–3440. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)95429-2.
2. Heck R.F., Nolley Jr J.P. Palladium-catalyzed vinylic hydrogen substitution reactions with aryl, benzyl, and styryl halides. *The Journal of organic chemistry*, 1972, vol. 37, no. 14, pp. 2320–2322. DOI: 10.1021/jo00979a024.
3. Uddin A., Pandey K., Plunkett K.N. Indacenodipyrene containing small molecules and ladder polymers. *Tetrahedron Chem*, 2022, vol. 2, p. 100019. DOI: 10.1016/j.tchem.2022.100019.
4. Zhu X., Liu F., Ba X., Wu Y. Synthesis of Ladder-Type 9,9'-Bifluorenylidene-Based Conjugated Oligomers via a Pd-Catalyzed Tandem Suzuki Coupling/Heck Cyclization Approach. *Organic letters*, 2022, vol. 24, no. 31, pp. 5851–5854. DOI: 10.1021/acs.orglett.2c02418.
5. Devanshi Das S., Koul N., Cherwoo L. et al. Conjugated Polymer-Based Smart Biosensors for Pathogen Detection in Food Sector. *Food Analytical Methods*, 2025, vol. 18, no. 6, pp. 946–962. DOI: 10.1007/s12161-025-02764-4.
6. Bepalov 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.
7. Shiriakina Yu.M., Kitaeva N.S., Afanaseva E.A., Butuzov A.V. Amphiphilic compounds and hydrophobization (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), pp. 99–115. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-99-115.
8. 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 03, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
9. Sigeev A.S., Peregudov A.S., Cheprakov A.V., Beletskaya I.P. The Palladium Slow-Release Pre-Catalysts and Nanoparticles in the «Phosphine-Free» Mizoroki–Heck and Suzuki–Miyaura Reactions. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 2015, vol. 357, pp. 417–429.
10. Avila-Sorrosa A., Jimenez-Vazquez H.A., Reyes-Arellano A. et al. Novel synthesis of a non-symmetric N1CN2 Pd(II) pincer complex by a tandem reaction using a meta-hydroxylated imine ligand. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2016, vol. 819, pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2016.06.019.
11. Jin L., Wei W., Sun N. et al. Unsymmetrical CNN-palladacycles with geometry-constrained iminopyridyl ligands: an efficient precatalyst in Suzuki coupling for accessing 1,1-diarylalkanes from secondary benzylic bromides. *Organic Chemistry Frontiers*, 2018, vol. 5, pp. 2484–2491. DOI: 10.1039/C8QO00517F.
12. Kılınçarslan R., Günay M.E., Fırıncı R. et al. New palladium(II)–N-heterocyclic carbene complexes containing benzimidazole-2-ylidene ligand derived from menthol: synthesis, characterization and catalytic activities. *Applied Organometallic Chemistry*, 2016, vol. 30, pp. 268–272.
13. Kostas I.D., Coutselos A.G., Charalambidis G., Skondra A. The first use of porphyrins as catalysts in cross-coupling reactions: a water-soluble palladium complex with a porphyrin ligand as an efficient catalyst precursor for the Suzuki–Miyaura reaction in aqueous media under aerobic conditions. *Tetrahedron Letters*, 2007, vol. 48, pp. 6688–6691. DOI: 10.1016/j.tetlet.2007.07.141.
14. 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.

15. Mieczynska E., Lisowski J., Trzeciak A.M. A macrocyclic Pd(II)–Ni(II) complex in Heck and Suzuki reactions. *Inorganica Chimica Acta*, 2015, vol. 431, pp. 145–149. DOI: 10.1016/j.ica.2014.11.008.
16. Beigi Z., Kianfar A.H., Mohammadnezhad G. et al. Palladium(II) complexes with diaminomaleonitrile-based Schiff-base ligands: synthesis, characterization and application as Suzuki–Miyaura coupling catalysts. *Polyhedron*, 2017, vol. 134, pp. 65–72. DOI: 10.1016/j.poly.2017.06.009.
17. Turan N., Buldurun K., Bursal E., Mahmoudi G. Pd(II)-Schiff base complexes: Synthesis, characterization, Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck cross-coupling reactions, enzyme inhibition and antioxidant activities. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2022, vol. 970, p. 122370. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2022.122370.
18. Sadegh F., Bagheri O., Moghadam M. et al. Palladium(II) tetrakis(4-N, N, N-trimethylammoniumphenylene) porphyrin supported on ion-exchange resins as efficient and reusable catalysts for C–C coupling reactions. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2014, vol. 759, pp. 46–57. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2014.02.006.
19. Ju P., Wu S., Su Q. et al. Salen–porphyrin-based conjugated microporous polymer supported Pd nanoparticles: highly efficient heterogeneous catalysts for aqueous C–C coupling reactions. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, vol. 7, pp. 2660–2666. DOI: 10.1039/C8TA11330K.
20. Hou Y., Zhang X., Sun J. et al. Good Suzuki-coupling reaction performance of Pd immobilized at the metal-free porphyrin-based covalent organic framework. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, vol. 214, pp. 108–114. DOI: 10.1016/j.micromeso.2015.05.002.
21. Yamamoto K., Nameki R., Sogawa H., Takata T. Synthesis of polystyrenesupported Pd(II)-containing macrocyclic complex as a reusable catalyst for chemoselective Suzuki–Miyaura coupling reaction. *Tetrahedron Letters*, 2020, vol. 61, pp. 151870–151873. DOI: 10.1016/j.tetlet.2020.151870.
22. Bahrami K., Kamrani S.N. Synthesis, characterization and application of graphene palladium porphyrin as a nanocatalyst for the coupling reactions such as: Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck. *Applied Organometallic Chemistry*, 2018, vol. 32, no. 2, p. e4102. DOI: 10.1002/aoc.4102.
23. Chen J., Zhang J., Zhu D., Li T. Porphyrin-based polymer-supported palladium as an excellent and recyclable catalyst for Suzuki–Miyaura coupling reaction in water. *Applied Organometallic Chemistry*, 2018, vol. 32, no. 2, p. e3996. DOI: 10.1002/aoc.3996.
24. Andrade A.P.S., Arantes L.M., Kadooca J.Y. et al. Palladium Complexes with Tetradentate Schiff Bases or their Corresponding Amines: Synthesis and Application in Heck Reactions. *ChemistrySelect*, 2016, vol. 5, pp. 886–890. DOI: 10.1002/slct.201600244.
25. Yang L., Zhang X., Mao P. et al. NCN pincer palladium complexes based on 1,3-dipicolyl-3,4,5,6-tetrahydropyrimidin-2-ylidenes: synthesis, characterization and catalytic activities. *RSC Advanced*, 2015, vol. 5, pp. 25723–25729. DOI: 10.1039/c5ra01706h.
26. Wang H., Zhang B., Yan X., Guo S. Palladium pincer-type complexes and zwitterionic sulfur adducts of pyridine-bridged bis(1,2,3-triazolin-5-ylidenes): syntheses, characterizations and catalytic applications. *Dalton Transactions*, 2018, vol. 47, pp. 528–537. DOI: 10.1039/c7dt03687f.
27. Lee J.-Y., Su Y.-S., Wang Y.-S., Lee H.M. Tetranuclear Palladium Complexes of Abnormal N-Heterocyclic Carbene Ligands and their Catalytic Activities in Mizoroki–Heck Coupling Reaction of Electron-Rich Aryl Chlorides. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 2019, vol. 361, pp. 4714–4726. DOI: 10.1002/adsc.201900805.
28. Wan Q., Liu Y. The Ionic Palladium Porphyrin as a Highly Efficient and Recyclable Catalyst for Heck Reaction in Ionic Liquid Solution Under Aerobic Conditions. *Catalysis Letters*, 2009, vol. 128, pp. 487–492. DOI: 10.1007/s10562-008-9780-2.
29. Hezarkhani Z., Shaabani A. Palladium(II) tetrasulfophthalocyanine covalently immobilized on keratin protein grafted graphene oxide nanosheets as a new highperformance catalyst for C–C coupling reactions. *RSC Advances*, 2016, vol. 6, pp. 98956–98967. DOI: 10.1039/c6ra18814a.
30. Huang Y., Yang L., Huang M. et al. Polystyrene microsphere-immobilized palladium(II) porphyrin as mild, reusable, and highly efficient catalyst for Heck reaction. *Particuology*, 2015, vol. 22, pp. 128–133. DOI: 10.1016/j.partic.2014.08.003.

31. Rao K.U., Lakshmidhevi J., Appa R.M. et al. Palladium(II)-Porphyrin Complexes as Efficient and Eco-Friendly Catalysts for Mizoroki–Heck Coupling. *ChemistrySelect*, 2017, vol. 2, pp. 7394–7398. DOI: 10.1002/slct.201701413.
32. Matano Y., Matsumoto K., Shibano T., Imahori H.J. Porphyrin-appended phosphapalladacycle precatalysts: effects of central metals on the catalytic activity in a high-temperature Heck reaction. *Journal of Porphyrins & Phthalocyanines*, 2011, vol. 15, pp. 1172–1182. DOI: 10.1142/S1088424611004087.
33. Mastalir A., Hancsárik M., Szabó T. Immobilization of a Pd(II) complex on hydrophilic graphite oxide and its catalytic investigation in the Heck coupling reaction. *Applied Organometallic Chemistry*, 2020, vol. 34, no. 4, p. e5565. DOI: 10.1002/aoc.5565 2020.
34. Akdeniz A., Turan N. Synthesis, characterization, Suzuki–Miyaura and Mizoroki–Heck cross-coupling reactions of Schiff base-Pd(II) complexes. *Journal of Molecular Structure*, 2023, vol. 1287, p. 135724. DOI: 10.1016/j.molstruc.2023.135724.
35. Han X.H., Gong K., Huang X. et al. Syntheses of covalent organic frameworks via a one-pot Suzuki coupling and Schiff's base reaction for C₂H₄/C₃H₆ separation. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, vol. 61, no. 25, p. e202202912. DOI: 10.1002/anie.202202912.
36. Xiong H., Lin Q., Lu Y. et al. General room-temperature Suzuki–Miyaura polymerization for organic electronics. *Nature Materials*, 2024, vol. 23, no. 5, pp. 695–702. DOI: 10.1038/s41563-023-01794-9.
37. Soni A., Sharma C., Negi L., Joshi R.K. NHC-Pd(II) full pincer catalyzed Mizoroki–Heck type cross-coupling of vinyl chloride and alkenes: Synthesis of novel ferrocenylated conjugated dienes. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2023, vol. 983, p. 122550. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2022.122550.

Информация об авторах

Кириллова Валерия Арамовна, аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru
Леонов Александр Андреевич, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Платонова Яна Борисовна, научный сотрудник, к.х.н., 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

Valeria A. Kirillova, Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru
Aleksandr A. Leonov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yana B. Platonova, Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), 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.