DOI: 10.17117/na.2016.12.02.313

<http://ucom.ru/doc/na.2016.12.02.313.pdf>

Поступила (Received): 04.12.2016

**Бумагин Н.А., Поткин В.И., Петкевич С.К., Ливанцов М.В.,
Алексеев Р.С., Белов Д.С., Веселов И.С., Шредер К.С.
Высокоэффективные Pd-катализаторы на основе
изоксазол-1,2,3-триазольных лигандов
для катализа в водных средах**

**Bumagin N.A., Potkin V.I., Petkevich S.K., Livantsov M.V.,
Alekseev R.S., Belov D.S., Veselov I.S., Schroeder K.S.
High-turnover (isoxazol-1,2,3-triazole)-based Pd-
catalysts for aqueous media catalysis**

Разработаны методы синтеза и изучена каталитическая активность комплексов Pd с изоксазол-1,2,3-триазольными лигандами. Новые катализаторы проявляют очень высокую активность в реакциях кросс-сочетания в водных средах, что позволяет сократить количество дорогостоящего Pd до 10^{-2} - 10^{-4} мол%

Ключевые слова: палладий, изоксазол-1,2,3-триазольных лиганды, реакции кросс-сочетания, водные среды

We here reported the preparation and catalytic performance of (isoxazol-1,2,3-triazole)-based Pd-catalysts. It has been demonstrated that the novel catalysts exhibit very high activity in cross-coupling reactions in aqueous media, thus reducing the amount of expensive Pd to 10^{-2} - 10^{-4} mol%

Key words: palladium, isoxazol-1,2,3-triazole ligands, cross-coupling reactions, aqueous media

Бумагин Николай Александрович
Доктор химических наук, профессор
МГУ им. М.В. Ломоносова
г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Bumagin Nikolay Alexandrovich
Doctor of Chemical Sciences, Professor
Moscow state university named M.V. Lomonosov
Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Поткин Владимир Иванович
Доктор химических наук, профессор, зав. отделом
Институт физико-органической химии НАН
Беларуси, г. Минск

Potkin Vladimir Ivanovich
Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of
Department
Institute of physical organic chemistry NAS of
Belarus, Minsk

Петкевич Сергей Константинович
Кандидат химических наук, старший научный
сотрудник
Институт физико-органической химии НАН
Беларуси, г. Минск

Petkevich Sergey Konstantinovich
Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher
Institute of physical organic chemistry NAS of
Belarus, Minsk

Ливанцов Михаил Васильевич
Кандидат химических наук, доцент
МГУ им. М.В. Ломоносова
г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Livantsov Michail Vasilievich
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
Moscow state university named M.V. Lomonosov
Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Алексеев Роман Сергеевич

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник

МГУ им. М.В. Ломоносова

г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Alekseev Roman Sergeevich

Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher
Moscow state university named M.V. Lomonosov

Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Белов Дмитрий Сергеевич

Кандидат химических наук, научный сотрудник

МГУ им. М.В. Ломоносова

г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Belov Dmitry Sergeevich

Candidate of Chemical Sciences, Researcher
Moscow state university named M.V. Lomonosov

Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Веселов Иван Сергеевич

Кандидат химических наук, научный сотрудник

МГУ им. М.В. Ломоносова

г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Veselov Ivan Sergeevich

Candidate of Chemical Sciences, Researcher
Moscow state university named M.V. Lomonosov

Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Шредер Кирилл Сергеевич

Студент

МГУ им. М.В. Ломоносова

г. Москва, Ленинские Горы, 1/3

Schroeder Kirill Sergeevich

Student

Moscow state university named M.V. Lomonosov

Moscow, Lewinsky Gory, 1/3

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 16-58-00059-Бел_а и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант X16P-006

Катализируемые палладием реакции кросс-сочетания арилгалогенидов с арилборными кислотами (реакция Сузуки), олефинами (реакция Хека) и терминальными ацетиленами (реакция Соногаширы) находят самое широкое применение в современном органическом синтезе в качестве эффективных методов синтеза полифункциональных биарилов, арилированных олефинов, ацетиленов и их гетероциклических аналогов [1–4]. Соединения этого типа используются при получении современных лекарственных субстанций, для разработки новых материалов, входят в состав жидкокристаллических композиций [5–9].

В настоящее время в исследованиях реакций кросс-сочетания большое внимание уделяется решению проблемы замены дорогостоящих палладиевых катализаторов на более доступные переходные металлы, и в этом направлении достигнуты определенные успехи. Однако палладиевые катализаторы остаются вне конкуренции вследствие высоких скоростей, селективности и выходов целевых продуктов в сравнительно мягких условиях. По этим причинам весьма актуальной является задача по созданию палладиевых катализаторов, активно работающих даже в следовых количествах. Важнейшим параметром, определяющим эффективность катализа реакций кросс-сочетания, является природа лиганда в комплексе палладия, используемого в качестве катализатора. В настоящей работе вместо традиционных фосфинов нами разработаны новые эффективные изоксазол-1,2,3-триазольные лиганды (рис. 1).

Рис. 1. Схема синтеза изоксазол-1,2,3-триазольных конъюгатов

Синтез ранее неописанных изоксазол-1,2,3-триазольных конъюгатов **5**, **8–10** осуществляли по медь-катализируемой реакции азид-алкинового циклоприсоединения, исходя из полученного нами ранее 5-(*n*-толил)-3-азидометилизоксазола **7**. Реакцию проводили в спиртовой среде в присутствии сульфата меди (катализатор), аскорбата натрия [восстановитель Cu(II) в Cu(I)] и ТВТА {трис(1-бензил-1Н-1,2,3-триазол-4-ил)метил]амин}. В качестве алкиновой компоненты были использованы ацетиленовые спирты: пропаргиловый и 2-метилбут-3-ин-2-ол. В результате были получены изоксазол-1,2,3-триазолы с алкилгидроксигруппами в положении 4 триазольного гетероцикла **8**, **9**. Кроме того, нами был введен в реакцию азид-алкинового циклоприсоединения предварительно полученный изоксазолил-1,3,4-оксадиазол с бутинильным заместителем в оксадиазольном гетероцикле: 2-(бут-3-ин-1-ил)-5-(5-фенилизоксазол-3-ил)-1,3,4-оксадиазол **4**. В результате был синтезирован конъюгат **5**, содержащий четыре 1,2-азольных гетероцикла в одной молекуле – два изоксазольных, 1,3,4-оксадиазольный и 1,2,3-триазольный.

Общая методика синтеза изоксазолил-1,2,3-триазолов с алкилгидроксигруппой **8, **9**.** Смесь 0.072 г (0.136 ммоль) ТВТА и 0.017 г (0.068 ммоль) CuSO₄·5H₂O в 10 мл метанола перемешивают 5 мин и добавляют 0.054 г (0.273 ммоль) аскорбата натрия. Перемешивают еще 10 мин и приливают 10 мл раствора 0.37 г (1.73 ммоль) 5-(*n*-толил)-3-азидометилизоксазола **7** и 1.8 ммоль ацетиленового спирта. Реакционную смесь перемешивают при комнатной температуре 8 ч, выливают в 100 мл насыщенного раствора хлорида натрия, осадок отфильтровывают, промывают водой 3х30 мл, сушат в вакууме над P₂O₅ и перекристаллизовывают из хлористого метилена.

В случае синтеза конъюгата **5** с четырьмя гетероциклами при таком же количестве катализатора используют 0.22 г (1.03 ммоль) азида **7**, 2-(бут-3-ин-1-ил)-5-(5-фенилизоксазол-3-ил)-1,3,4-оксадиазола **4** и 0.26 г (0.98 ммоль) ацетилена, и реакцию проводили при 40°C.

Полученные соединения **5**, **8–10** были идентифицированы на основании данных ИК, ЯМР ^1H и ^{13}C спектров, в которых наблюдаются сигналы соответствующих молекулярных фрагментов.

{1-[5-(*n*-Толил)изоксазол-3-ил]метил-1*H*-1,2,3-триазол-4-ил}метанол **8.** Выход 99%, т. пл. 150–152°C. ИК спектр, см^{-1} : 3289, 3147, 3132, 3123, 3059, 3037, 2992, 2958, 2921, 2853, 1619, 1598, 1568, 1515, 1470, 1436, 1376, 1368, 1319, 1226, 1132, 1116, 1063, 1049, 1038, 1017, 949, 842, 820, 810, 790, 737, 629, 503. Спектр ЯМР ^1H (500 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 2.33 с (3H, Me), 4.56 д (2H, CH_2O , J 5 Гц), 5.29 т (1H, OH, J 5 Гц), 5.78 с (2H, CH_2N), 6.93 с (1H, $\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 7.31 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 7.73 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 8.14 с (1H, $\text{CH}_{\text{триазол}}$). Спектр ЯМР ^{13}C (125 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 21.57 (Me), 45.24 (CH_2N), 55.62 (CH_2O), 99.74 ($\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 124.01 ($\text{CH}_{\text{триазол}}$), 126.19 (2CH_{аром.}), 130.40 (2CH_{аром.}), 124.39, 141.21, 149.09, 160.80, 170.65 (5C_{четв.}). $[M]^+$ 270. $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$. M 270.29.

{1-[5-(*n*-Толил)изоксазол-3-ил]метил-1*H*-1,2,3-триазол-4-ил}пропан-2-ол **9.** Выход 95%, т. пл. 152–153°C. ИК спектр, см^{-1} : 3355, 3129, 3075, 3038, 3001, 2970, 2930, 2874, 1619, 1600, 1568, 1515, 1469, 1441, 1368, 1355, 1301, 1218, 1181, 1135, 1116, 1062, 1047, 1019, 967, 949, 837, 825, 808, 779, 743, 722, 678, 502.. Спектр ЯМР ^1H (500 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 1.47 с (6H, 2Me_{алиф.}), 2.35 с (3H, Me_{аром.}), 5.13 с (1H, OH), 5.74 с (2H, CH_2), 6.95 с (1H, $\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 7.33 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 7.75 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 8.00 с (1H, $\text{CH}_{\text{триазол}}$). Спектр ЯМР ^{13}C (125 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 21.56 (Me_{аром.}), 31.22 (2Me_{алиф.}), 45.09 (CH_2), 99.82 ($\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 121.66 ($\text{CH}_{\text{триазол}}$), 126.17 (2CH_{аром.}), 130.38 (2CH_{аром.}), 67.62, 124.36, 141.19, 156.84, 160.71, 170.59 (6C_{четв.}). M 298.35.

{1-[5-(*n*-Толил)изоксазол-3-ил]метил-1*H*-1,2,3-триазол-4-ил}метил-5-(*n*-толил)изоксазол-3-карбоксилат **10.** Выход 87%, т. пл. 182–183°C (с разл.). ИК спектр, см^{-1} : 3119, 3109, 3073, 3029, 2996, 2948, 2919, 2853, 1736, 1620, 1600, 1573, 1511, 1457, 1446, 1428, 1381, 1260, 1238, 1224, 1139, 1126, 1114, 1052, 1027, 1005, 949, 923, 856, 820, 806, 789, 731, 718, 503. Спектр ЯМР ^1H (500 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 2.33 с (3H, Me), 2.34 с (3H, Me), 5.52 с (2H, CH_2), 5.85 с (2H, CH_2), 6.96 с (1H, $\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 7.31 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 7.33 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 7.40 с (1H, $\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 7.73 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 7.81 д (2H_{аром.}, J 8 Гц), 8.46 с (1H, $\text{CH}_{\text{триазол}}$). Спектр ЯМР ^{13}C (125 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 21.56 (Me), 21.59 (Me), 45.45 (CH_2N), 59.20 (CH_2O), 99.76 ($\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 100.76 ($\text{CH}_{\text{изокс.}}$), 126.18 (2CH_{аром.}), 126.35 (2CH_{аром.}), 126.64 ($\text{CH}_{\text{триазол}}$), 130.37 (2CH_{аром.}), 130.40 (2CH_{аром.}), 123.91, 124.34, 141.20, 141.65, 142.03, 157.04, 159.73, 160.56, 170.72, 171.99 (10C_{четв.}). M 455.47.

2-(5-Фенилизоксазол-3-ил)-5-{2-[1-(5-(*n*-толил)изоксазол-3-ил)метил-1*H*-1,2,3-триазол-4-ил]этил}-1,3,4-оксадиазол **5.** Выход 91%, т. пл. 183–184°C (с разл.). ИК спектр, см^{-1} : 3144, 3125, 3116, 3064, 3034, 2992, 2923, 2853, 1619, 1600, 1566, 1493, 1462, 1447, 1427, 1353, 1222, 1120, 1050, 995, 950, 816, 765, 688, 679, 498. Спектр ЯМР ^1H (500 МГц, DMSO-d_6), δ , м.д.: 2.32 с (3H, Me), 3.22 т (2H, CH_2 , J 7.2 Гц), 3.22 т (2H, CH_2 , J 7.2 Гц), 5.75 с (2H, CH_2N), 6.85 с (1H, $\text{CH}_{\text{изокс.}}$),

7.30 д ($2H_{\text{аром.}}$, J 8 Гц), 7.55–7.61 м ($3H_{\text{аром.}}$), 7.71 д ($2H_{\text{аром.}}$, J 8 Гц), 7.73 с ($1H$, $CH_{\text{изокс.}}$), 7.95–8.03 м ($2H_{\text{аром.}}$), 8.10 с ($1H$, $CH_{\text{триазол}}$). Спектр ЯМР ^{13}C (125 МГц, $DMSO-d_6$), δ , м.д.: 21.52 (Me), 22.45 (CH_2), 25.09 (CH_2), 45.24 (CH_2N), 99.58 ($CH_{\text{изокс.}}$), 100.05 ($CH_{\text{изокс.}}$), 123.75 ($CH_{\text{триазол}}$), 126.11 ($2CH_{\text{аром.}}$), 126.52 ($2CH_{\text{аром.}}$), 129.93 ($2CH_{\text{аром.}}$), 130.33 ($2CH_{\text{аром.}}$), 131.78 ($1CH_{\text{аром.}}$), 124.31, 126.37, 141.13, 151.32, 157.21, 160.71, 167.81, 170.57, 171.73 ($9C_{\text{четв.}}$). M 479.50.

Следует отметить, что лиганды **5**, **8–10** плохо растворимы в метаноле и ацетонитриле, которые использовались ранее для получения 1,2-азольных комплексов палладия. Поэтому синтез комплексов проводили в смеси метанола и ДМФА, в котором азолы **5**, **8–10** растворимы. При добавлении к раствору тетрагидропалладата натрия в метаноле (0.1 М) растворов **5** (L^1) или **8–10** (L^2 – L^4) в ДМФА (0.025 М) характерная темно-коричневая окраска Na_2PdCl_4 мгновенно переходит в желто-оранжевую, и в реакционных смесях полностью исчезают исходные лиганды ($L: Pd=1:1$). По данным элементного анализа полученные комплексы имеют состав $LPdCl_2$.

Для испытания комплексов L^1PdCl_2 – L^4PdCl_2 в качестве катализаторов реакции Сузуки были использованы их суспензии в смеси метанола и ДМФА (1:4) (0.025 М). Исходя из стоящих перед нами задач по адаптации новых катализаторов к водным средам и разработке основ экологически безопасных процессов, при выборе растворителей для реакции мы ориентировались на воду и водно-спиртовые среды. В качестве модельной реакции Сузуки была выбрана реакция 4-метоксифенилборной кислоты с 3-бромбензойной кислотой. Испытания проводили в 50% водном метаноле при 20°C и 75°C или в воде при 35°C и 100°C в присутствии 0.1 мол% комплексов палладия и карбоната калия в качестве основания на воздухе в отсутствие инертной атмосферы. Результаты испытания каталитической активности комплексов представлены в табл. 1.

Как следует из полученных данных, все изоксазол-1,2,3-триазольных комплексы $LPdCl_2$ проявляют очень высокую каталитическую активность в широком интервале температур. Например, в присутствии всего 0.1 мол% комплекса L^2PdCl_2 реакция завершается полностью за 15 мин при комнатной температуре, давая с количественным выходом продукт кросс-сочетания – 4'-метокси-[1,1'-бифенил]-3-карбоновую кислоту (опыт 5). При повышенной температуре в водной среде при уменьшении количества катализатора в 10–100 раз продолжительность реакции не превышает 4–5 мин (TON до 10^5 , TOF до $1.2 \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$) (опыты 9 и 10). При использовании в реакции вместо арилбромидов соответствующих иодпроизводных количество катализатора можно сократить до **10⁻⁴ мол% (1 ppm)**, не влияя при этом на продолжительность и эффективность катализа (TON до 10^6 , TOF до $1.2 \cdot 10^7 \text{ ч}^{-1}$) (опыт 12).

Таблица 1. Данные по испытанию изоксазол-1,2,3-триазольных комплексов палладия $LPdCl_2$ в реакции 3-бромбензойной кислоты с 4-метоксифенилборной кислотой^а

Опыт	"Pd"	T ^б , °C	Время, мин	Выход ^в , %
1	L ¹ PdCl ₂	20	30	93
2	L ^{1'} PdCl ₂	75	10	96
3	L ¹ PdCl ₂	35	20	95
4	L ¹ PdCl ₂	100	5	100
5	L ² PdCl ₂	20	15	100
6	L ² PdCl ₂	75	2	100
7	L ² PdCl ₂	35	15	100
8	L ² PdCl ₂	100	2	100
9	L ² PdCl ₂ 0.01 мол%	100	4	100
10	L ² PdCl ₂ 0.001 мол%	100	5	100
11 ^г	L ² PdCl ₂ 0.0001 мол%	100	5	100
12	L ³ PdCl ₂	20	15	98
13	L ³ PdCl ₂	100	2	99
14	L ⁴ PdCl ₂	20	20	97
15	L ⁴ PdCl ₂	100	3	100
16	Na ₂ PdCl ₄	20	10	89
			4 ч	92
17 ²	Na ₂ PdCl ₄	100	5	99

^а ArBr (0.50 ммоль), Ar'B(OH)₂ (0.60 ммоль), K₂CO₃ (1.25 ммоль), по 2.5 мл H₂O и

MeOH (или 5 мл H₂O); ^б Указаны данные при 20 °C и 75 °C в водном метаноле, при 35 °C и 100 °C в воде; ^в Выход по данным спектров ЯМР ¹H относительно 0.5 ммоль тетрахлорэтана; ^г Опыт 11- реакция с **3-иодбензойной кислотой**

Необходимо также отметить, что во всех реакциях образуется небольшое количество продукта гомосочетания арилборной кислоты – 4,4'-диметокси-1,1'-бифенила (1–2%), однако вклад этого процесса незначителен.

В сравнительном эксперименте при использовании 0.1 мол % Na₂PdCl₄ в отсутствие 1,2-азольных лигандов сразу после прибавления катализатора реакционная смесь окрашивается в темный цвет, и через 5 мин наблюдается образование хорошо различимых агрегатов палладиевой черни. Выход продукта сочетания через 10 мин составил 89% (опыт 11). После образования черни реакция практически затормозилась, и за 4 ч выход увеличился всего до 92%. При повышенной температуре в водной среде продукт кросс-сочетания образуется с количественным выходом в течение 5 мин (опыт 12).

По предварительным данным изоксазол-1,2,3-триазольный комплекс L²PdCl₂ проявляет также высокую каталитическую активность в реакции Хека 3-бромбензойной кислоты с акриловой кислотой и в реакции Соногаширы 3-бромбензойной кислоты с фенилацетиленом (рис. 2). Применение в реакции Соногаширы в качестве сокатализатора вместо CuI иодида серебра позволило проводить процесс кросс-сочетания в отсутствие инертной атмосферы на воздухе.

Анализ полученных результатов показывает, что палладиевые катализаторы с изоксазол-1,2,3-триазольными лигандами по своим технико-экономическим показателям намного превосходят известные комплексы на основе никеля. Однако стоимость PdCl_2 по данным каталога фирмы Sigma-Aldrich составляет примерно 5500 EUR/мол, а NiCl_2 всего 100 EUR/мол. Поскольку разработанные Pd-катализаторы обеспечивают эффективный катализ даже в следовых количествах (10^{-1} – 10^{-4} мол%), элементарные расчеты показывают, что максимальная стоимость палладия на синтез 1 моля продукта не будет превышать такую для никеля.

Рис. 2. Катализ изоксазол-1,2,3-триазольным комплексом L^2PdCl_2 реакций 3-бромбензойной кислоты с акриловой кислотой и фенилацетиленом

Высокая каталитическая активность изоксазол-1,2,3-триазольных комплексов палладия, количественные выходы и применение воды или водного метанола в качестве растворителей позволяют максимально упростить процедуру выделения продуктов и сделать процесс кросс-сочетания более экологически безопасными. Для получения аналитически чистых образцов реакционную смесь после завершения реакции фильтруют для освобождения от незначительного количества палладиевой черни и продукта гомосочетания, водный метанол отгоняют (регенерируемость растворителя в препаративных экспериментах достигает 96%), затем прибавляют 10–15% водный спирт, нагревают практически до кипения и медленно подкисляют 10% HCl при перемешивании. В результате получается мелкокристаллический, хорошо фильтрующийся осадок бифенилкарбоновой кислоты.

Таким образом, нами разработаны катализаторы на основе изоксазол-1,2,3-триазольных лигандов, которые позволяют эффективно вести катализ реакций Сузуки, Хека и Соногаширы в мягких условиях в водных средах при использовании следовых количеств палладия. На новых катализаторах реакции протекают с практически количественными выходами, что позволяет максимально упростить процедуру выделения целевых соединений и делает предложенный подход весьма перспективным для разработки экономичных и экологически безопасных технологий синтеза практически значимых соединений.

Список используемых источников:

1. *Transition Metal-Catalyzed Cross-Coupling Reactions: monograph*. Ed. F. Diederich, P.J. Stang. New York: Wiley-VCH, 1998. P. 1-229.
2. *Topics in Current Chemistry – Cross-Coupling Reactions: monograph*. Ed N. Miyaura. Heidelberg: Springer, 2002. Vol. 219. P. 1-241.
3. *Handbook of Organopalladium Chemistry for Organic Synthesis: monograph*. Ed E-i. Negishi. New York: John Wiley and Sons, 2002. Vol. 1. P. 213-589.
4. I. P. Beletskaya, A. V. Cheprakov. *The Heck Reaction as a Sharpening Stone of Palladium Catalysis* // *Chem. Rev.* 2000. Vol. 100. № 8. P. 3009-3066.
5. H.-U. Blaser, A. Indolese, A. Schnyder, H. Steiner, M. Studer. *Supported palladium catalysts for fine chemicals synthesis* // *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2001. Vol. 173, № 1. P. 3-18.
6. *Organometallics in Process Chemistry: monograph*. Ed. R. D. Larsen. Berlin: Springer, 2004. P. 205-245.
7. R. Chinchilla, C. Najera. *The Sonogashira Reaction: A Booming Methodology in Synthetic Organic Chemistry* // *Chem. Rev.* 2007. Vol. 107. № 3. P. 874-922.
8. J. G. de Vries. *The Heck reaction in the production of fine chemicals* // *Can. J. Chem.* 2001. Vol. 79. № 5-6. P. 1086-1092.
9. C. Barnard. *Challenges in Catalysis for Pharmaceuticals and Fine Chemicals* // *Platinum Metals Rev.* 2008. Vol. 52. № 2. P. 110-113.

© 2016, Бумагин Н.А., Поткин В.И., Петкевич С.К.,
Ливанцов М.В., Алексеев Р.С., Белов Д.С., Веселов И.С.,
Шредер К.С.

Высокоэффективные Pd-катализаторы на основе
изоксазол-1,2,3-триазольных лигандов для катализа
в водных средах

© 2016, Bumagin N.A., Potkin V.I., Petkevich S.K.,
Livantsov M.V., Alekseev R.S., Belov D.S., Veselov I.S.,
Schroeder K.S.

High-turnover (isoxazol-1,2,3-triazole)-based Pd-
catalysts for aqueous media catalysis