

Реакции хинолин-2(6,8)-карбальдегидов с аренами под действием различных кислот Бренстеда или Льюиса: синтез диарилметилзамещенных хинолинов

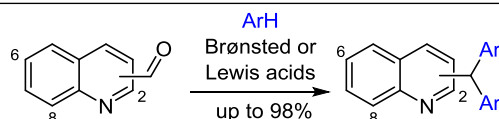
Марина А. Борисова¹, Дмитрий С. Рябухин¹, Александр В. Васильев^{1,2*}

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург 194021, Россия

² Институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург 199034, Россия; e-mail: aleksvasil@mail.ru

Поступило 5.05.2020

Принято 22.05.2020



Реакции хинолин-2(6,8)-карбальдегидов с аренами под действием сильных кислот Бренстеда (H_2SO_4 , $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$) или Льюиса (AlCl_3 , AlBr_3) приводят к получению замещенных диарилметилхинолинов с высокими выходами.

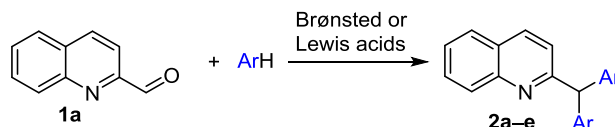
Ключевые слова: диарилметилхинолины, кислоты Бренстеда, кислоты Льюиса, хинолинкарбальдегиды, электрофильное ароматическое замещение.

Производные хинолина, вследствие проявляемых ими различных биологических свойств, используются в медицине и фармакологии, в частности хинин применяется для лечения малярии.¹ На основе хинолина созданы соединения с антибактериальной,² антиВИЧ^{3–5} и противораковой активностью.^{6–8} Поэтому разработке методов синтеза новых соединений хинолинового ряда и тестированию их биологически активных свойств уделяется особое внимание.^{9–14}

Одним из эффективных методов модификации боковых цепей в гетероциклических системах является электрофильная активация альдегидной группы в гетероциклах под действием различных кислот Бренстеда или Льюиса. Так, с помощью этого синтетического подхода были осуществлены каскадные реакции гидроксилкилирования–алкилирования аренов с помощью альдегидогетероциклов рядов: фурана,¹⁵ пиридина,^{16,17} имидазола,¹⁸ бензимидазола,¹⁹ пиразола,²⁰ хинолин-2-она²¹ и хинолина.^{17,22} При этом для хинолин-2-карбальдегида осуществлены реакции в TfOH ²² или в системе $\text{VF}_3\text{–H}_2\text{O}$ ¹⁷ только с двумя аренами – бензолом и хлорбензолом, приводящие к соответствующим 2-диарилметилхинолинам. Другие ароматические соединения и кислоты Бренстеда или Льюиса не изучали в этих взаимодействиях. Из гетероциклических субстратов в данные превращения вводили только хинолин-2(3,4)-карбальдегиды.^{17,22} Другие хинолины, содержащие альдегидную группу в бензольной части хинолиновой системы в положениях 5, 6, 7 или 8, не исследовали в этих электрофильных реакциях.

Мы решили расширить круг вовлекаемых в данное превращение хинолиновых альдегидов и аренов, а также кислот Бренстеда или Льюиса, для того чтобы изучить синтетический потенциал этой реакции. Цель данной работы состояла в исследовании взаимодействий хинолин-2(6,8)-карбальдегидов с разнообразными аренами в условиях электрофильной активации под действием различных кислот Бренстеда или Льюиса.

В табл. 1 представлены результаты реакций хинолин-2-карбальдегида **1a** с аренами, приводящих к соответствующим 2-диарилметилхинолинам **2a–e**. Данная реакция хорошо протекает в TfOH при комнатной температуре с бензолом, *орто*-, *мета*-, *пара*-ксилолами, 1,2-дихлорбензолом (опыты 5, 7–11). При этом время реакции составляет 0.15–2 ч в случае бензола и электронодонорных ксилолов и 21 ч в случае слабо нуклеофильного 1,2-дихлорбензола (опыт 11). Кроме TfOH , хорошие результаты в реакции с бензолом показали H_2SO_4 (опыт 4) и такие сильные кислоты Льюиса, как галогениды алюминия AlX_3 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}$, опыты 12, 13). Однако использование H_2SO_4 и галогенидов алюминия ограничено только реакцией с бензолом. Более донорные, чем бензол, арены могут подвергаться в H_2SO_4 сульфированию, а реакция с *пара*-ксилолом под действием AlBr_3 дает сложную смесь соединений (опыт 14). Аналогично олигомерные соединения получены в реакциях под действием кислотных цеолитов CBV-720, CBV-500 (опыты 15, 16), $\text{CF}_3\text{CO}_2\text{H}$ (опыт 3) или в более сильной кислотной системе

Таблица 1. Реакции хинолин-2-карбальдегида (**1a**) с аренами под действием различных кислот Бренстеда или Льюиса, приводящие к соответствующим 2-(диарил)метилхинолинам **2a–e**

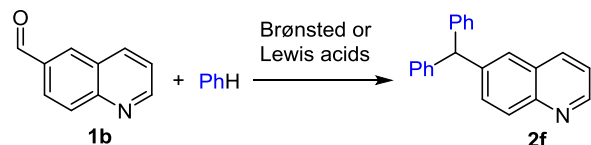
Опыт	ArH	Условия реакции			Продукт (выход)
		Кислота	Температура, °C	Время, ч	
1	PhH	Гексафторпропан-2-ол	70	2	Непрореагировавшее исходное соединение 1a
2	PhH	HCl	20	22	Непрореагировавшее исходное соединение 1a
3	PhH	CF ₃ CO ₂ H	20	1	Сложная смесь соединений
4	PhH	H ₂ SO ₄	20	2	2a Ar = Ph (77%)
5	PhH	TfOH	20	2	2a Ar = Ph (84%)
6	PhH	TfOH–SbF ₅ (25 моль. %)	20	1	Сложная смесь соединений
7	<i>орто</i> -Ксилол	TfOH	20	0.15	2b Ar = 3,4-Me ₂ C ₆ H ₃ (54%)
8	<i>орто</i> -Ксилол	TfOH	20	20	2b Ar = 3,4-Me ₂ C ₆ H ₃ (97%)
9	<i>мета</i> -Ксилол	TfOH	20	0.15	2c Ar = 2,4-Me ₂ C ₆ H ₃ (86%)
10	<i>пара</i> -Ксилол	TfOH	20	2	2d Ar = 2,5-Me ₂ C ₆ H ₃ (98%)
11	1,2-Дихлорбензол	TfOH	20	21	2e Ar = 3,4-Cl ₂ C ₆ H ₃ (68%)
12	PhH	AlCl ₃	20	0.5	2a Ar = Ph (78%)
13	PhH	AlBr ₃	20	2	2a Ar = Ph (85%)
14	<i>пара</i> -Ксилол	AlBr ₃	20	2	Сложная смесь соединений
15	PhH	Цеолит CBV-720	100	1	Сложная смесь соединений
16	PhH	Цеолит CBV-500	130	24	Сложная смесь соединений

TfOH–SbF₅ (опыт 6). Тогда как HCl (опыт 2) и гексафторпропан-2-ол (опыт 1) недостаточно сильные кислоты для электрофильной активации альдегида **1a**. После проведения соответствующих реакций непрореагировавшее исходное соединение **1a** было количественно регенерировано.

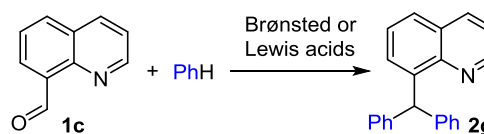
В табл. 2 и 3 представлены результаты реакций хинолин-6- и хинолин-8-карбальдегидов **1b,c** с бензолом под действием различных кислотных реагентов, приводящих к дифенилметилхинолинам **2f,g** соответственно. Как и для альдегида **1a**, хорошие результаты получены при использовании TfOH (табл. 2, опыт 4;

табл. 3, опыт 3) или галогенидов алюминия AlX₃ (X = Cl, Br, табл. 2, опыт 5; табл. 3, опыты 4 и 5).

Следует отметить, что электрофильная активация альдегидов **1b,c** не происходит в H₂SO₄ (табл. 2, опыты 1 и 2; табл. 3, опыты 1 и 2; после проведения этих опытов непрореагировавшие исходные соединения были количественно выделены), в отличие от хинолин-2-карбальдегида (**1a**) (табл. 1, опыт 4). То есть, по сравнению с альдегидом **1a**, хинолин-6- и хинолин-8-карбальдегиды **1b,c** требуют более сильных кислот для своей активации. Это также сказывается на увеличении времени их реакций – для TfOH до 24 ч (табл. 2, опыт 4) и

Таблица 2. Реакции хинолин-6-карбальдегида (**1b**) с бензолом под действием кислот Бренстеда или Льюиса, приводящие к 6-(дифенилметил)хинолину (**2f**)

Опыт	Условия реакции			Продукт (выход)
	Кислота	Температура, °C	Время, ч	
1	H ₂ SO ₄	20	2	Непрореагировавшее исходное соединение 1b
2	H ₂ SO ₄	20	24	Непрореагировавшее исходное соединение 1b
3	TfOH	20	2	2f (24%)
4	TfOH	20	24	2f (98%)
5	AlCl ₃	20	120	2f (98%)

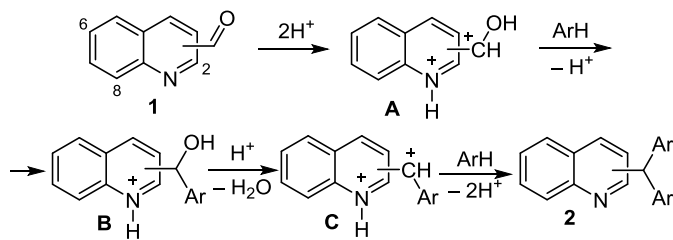
Таблица 3. Реакции хинолин-8-карбальдегида (**1c**) с бензолом под действием кислот Бренстеда или Льюиса, приводящие к 8-(дифенилметил)хинолину (**2g**)

Опыт	Условия реакции			Продукт (выход)
	Кислота	Температура, °C	Время, ч	
1	H ₂ SO ₄	20	2	Непрореагировавшее исходное соединение 1c
2	H ₂ SO ₄	20	24	Непрореагировавшее исходное соединение 1c
3	TfOH	20	1	2g (98%)
4	AlCl ₃	20	120	2g (72%)
5	AlBr ₃	20	30	2g (51%)

для AlX_3 ($X = Cl, Br$) до 120 ч (табл. 2, опыт 5; табл. 3, опыты 4 и 5). По-видимому, в условиях электрофильной активации из всех изомерных хинолинкарбальдегидов наиболее реакционноспособные катионные интермедиаты образует хинолин-2-карбальдегид (**1a**). В структуре последнего максимально сближены атом азота и альдегидная группа, протонирование которых в кислотах Бренстеда (или координация с кислотами Льюиса) приводит к генерированию активных частиц.

Предполагаемый механизм данной реакции включает на первой стадии генерирование высокоэлектрофильного дикатиона **A**, образующегося в результате протонирования в кислоте Бренстеда атома азота гетероциклической системы и атома кислорода альдегидной группы (схема 1). Под действием кислот Льюиса AlX_3 ($X = Cl, Br$) происходит их координационное взаимодействие с атомами азота и кислорода альдегида **1**, что также дает реакционноспособную электрофильную частицу. Далее дикатион **A** вступает в электрофильное ароматическое замещение с молекулой арена, приводя к катиону **B**. Протонирование в кислотах Бренстеда (или координационное взаимодействие с кислотами Льюиса) атома кислорода гидроксильной группы в катионе **B** с последующей дегидратацией (или дегидроксилированием) дает дикатион **C**. Взаимодействие последнего со второй молекулой арена заканчивается образованием хинолина **2**.

Схема 1. Предполагаемый механизм реакции хинолинкарбальдегидов **1** с аренами в кислотах Бренстеда



Таким образом, показано, что хинолин-2-(6,8)-карбальдегиды эффективно взаимодействуют с различными аренами в трифторметансульфоновой кислоте или (в случае взаимодействия с бензолом) под действием галогенидов алюминия с образованием соответствующих диарилметилхинолинов с высокими выходами.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР 1H и ^{13}C записаны на спектрометре Bruker AM 500 (500 и 125 МГц соответственно) в $CDCl_3$. Внутренний стандарт – остаточные сигналы растворителя (7.24 м. д. для ядер 1H , 77.2 м. д. для ядер ^{13}C). Хромато-масс-спектральный анализ выполнен на приборе Agilent Technology G 2570A GC/MSD (ионизация ЭУ, 70 эВ). Масс-спектры высокого разрешения записаны на приборе Bruker Maxis ESI-TOF. Контроль за ходом реакций осуществлен методом ТСХ на пластинках Silufol UV-254 с УФ индикатором. Колоночная хроматография проведена на силикагеле Chemapol 40/100 (0.04–0.10 мм), элюент петролейный эфир – Et_2O . Препаративная ТСХ осуществлена на стеклянной пластине с использованием силикагеля Chemapol 5/40

(0.005–0.04 мм) с УФ индикатором, элюент петролейный эфир – Et_2O .

Синтез 2-(диарилметил)хинолинов 2a–g взаимодействием хинолинкарбальдегидов 1a–c с аренами в TfOH (общая методика). При комнатной температуре 31 мг (0.2 ммоль) хинолинкарбальдегида **1a–c** при перемешивании добавляют к смеси 1 мл TfOH и арена (0.1 мл (1 ммоль, 5 экв.) бензола, 0.44 ммоль (2.2 экв.) других аренов). Реакционную смесь перемешивают при комнатной температуре в течение 0.15–24 ч (время реакций в табл. 1–3). Затем выливают в 50 мл H_2O , добавляют твердый $NaHCO_3$ до pH 8–10. Экстрагируют продукты реакции CH_2Cl_2 (3 × 30 мл), объединенные экстракты сушат Na_2SO_4 , растворитель отгоняют при пониженном давлении, остаток подвергают хроматографическому разделению на силикагеле методами колоночной или тонкослойной хроматографии. Аналогичным образом проводят реакции с другими кислотами Бренстеда (табл. 1, опыты 1–4, 6; табл. 2, опыты 1, 2; табл. 3, опыты 1, 2).

Синтез дифенилметилхинолинов 2a,f,g взаимодействием хинолинкарбальдегидов 1a–c с PhH в присутствии AlX_3 ($X = Cl, Br$) (общая методика). При комнатной температуре 20 мг (0.13 ммоль) хинолинкарбальдегида **1a–c** при перемешивании добавляют к смеси 2 мл бензола и галогенида алюминия (93 мг (0.7 ммоль, 5.4 экв.) $AlCl_3$, 273 мг (1 ммоль, 7.7 экв.) $AlBr_3$). Реакционную смесь перемешивают при комнатной температуре в течение 0.5–120 ч (время реакций в табл. 1–3). Затем выливают в 50 мл H_2O , добавляют твердый $NaHCO_3$ до pH 8–10. Экстрагируют продукты реакции CH_2Cl_2 (3 × 30 мл), объединенные экстракты сушат Na_2SO_4 , растворитель отгоняют при пониженном давлении, остаток подвергают хроматографическому разделению на силикагеле методами колоночной или тонкослойной хроматографии. Аналогичным образом проводят реакции хинолин-2-карбальдегида (**1a**) с кислотными цеолитами CBV-720 и CBV-500 в стеклянном автоклаве (табл. 1, опыты 15, 16).

2-(Дифенилметил)хинолин (2a). Выход 49 мг (84%), твердое вещество, т. пл. 133–135 °С (т. пл. 105–107 °С²²). Спектр ЯМР 1H , δ , м. д. (J , Гц): 5.96 (1H, с, CH); 7.22–7.24 (5H, м, H Ph, H Hetar); 7.27–7.31 (6H, м, H Ph); 7.50 (1H, т, $J = 7.6$, H Hetar); 7.68 (1H, т, $J = 7.6$, H Hetar); 7.76 (1H, д, $J = 8.4$, H Hetar); 8.06 (1H, д, $J = 8.4$, H Hetar); 8.10 (1H, д, $J = 8.4$, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 60.0; 122.0; 126.4; 126.7; 126.9; 127.6; 128.1; 128.5; 129.3; 129.5; 129.7; 136.6; 142.6; 163.1. Найдено, m/z : 296.1428 $[M+H]^+$. $C_{22}H_{18}N$. Вычислено, m/z : 296.1434.

2-[Бис(3,4-диметилфенил)метил]хинолин (2b). Выход 68 мг (97%), маслообразное вещество. Спектр ЯМР 1H , δ , м. д. (J , Гц): 2.20 (6H, с, 2CH₃); 2.23 (6H, с, 2CH₃); 5.80 (1H, с, CH); 6.94 (2H, д, $J = 7.8$, H Ar); 7.02 (2H, с, H Ar); 7.05 (2H, д, $J = 7.8$, H Ar); 7.30 (1H, д, $J = 8.5$, H Hetar); 7.50 (1H, т, $J = 7.5$, H Hetar); 7.68 (1H, т, $J = 7.8$, H Hetar); 7.77 (1H, д, $J = 8.0$, H Hetar); 8.04–8.09 (2H, м, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 19.2; 19.7; 59.4; 121.8; 125.9; 126.6; 127.3; 128.1; 129.2; 129.5; 130.6; 132.2; 134.5; 136.0; 136.4; 140.1; 147.8; 163.7. Найдено, m/z : 352.2059 $[M+H]^+$. $C_{26}H_{26}N$. Вычислено, m/z : 352.2060.

2-[Бис(2,4-диметилфенил)метил]хинолин (2c). Выход 60 мг (86%), твердое вещество, т. пл. 130–135 °С. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 2.15 (6H, с, 2CH₃); 2.29 (6H, с, 2CH₃); 6.02 (1H, с, CH); 6.64 (2H, д, $J = 7.8$, H Ar); 6.88 (2H, д, $J = 6$, H Ar); 7.00 (2H, с, H Ar); 7.13 (1H, д, $J = 8.2$, H Hetar); 7.50 (1H, т, $J = 7.5$, H Hetar); 7.66–7.69 (1H, м, H Hetar); 7.78 (1H, д, $J = 8.2$, H Hetar); 8.03 (1H, д, $J = 8.7$, H Hetar); 8.07 (1H, д, $J = 8.7$, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 19.6; 20.8; 53.7; 122.0; 125.9; 126.4; 126.6; 127.4; 128.8; 129.2; 129.5; 130.3; 130.7; 131.3; 135.9; 136.7; 138.0; 162.6. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 351 [M]⁺ (100), 336 (67), 244 (27), 232 (96), 217 (20), 193 (23), 143 (27), 130 (16). Найдено, m/z : 352.2060 [M+H]⁺. C₂₆H₂₆N. Вычислено, m/z : 352.2060.

2-[Бис(2,5-диметилфенил)метил]хинолин (2d). Выход 69 мг (98%), маслообразное вещество. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 2.13 (6H, с, 2CH₃); 2.19 (6H, с, 2CH₃); 6.02 (1H, с, CH); 6.57 (2H, с, H Ar); 6.96 (2H, д, $J = 7.6$, $J = 1.0$, H Ar); 7.05 (2H, д, $J = 7.6$, H Ar); 7.15 (1H, д, $J = 8.5$, H Hetar); 7.50–7.54 (1H, м, H Hetar); 7.67–7.71 (1H, м, H Hetar); 7.80 (1H, д, $J = 7.0$ H Hetar); 8.04–8.10 (2H, м, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 19.2; 21.1; 54.3; 122.2; 125.9; 126.6; 127.1; 127.2; 129.1; 129.2; 129.4; 130.2; 133.7; 135.0; 135.9; 140.6; 147.9; 162.3. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 351 [M]⁺ (100), 336 (73), 321 (13), 244 (27), 232 (99), 193 (16), 143 (40), 130 (19). Найдено, m/z : 352.2060 [M+H]⁺. C₂₆H₂₆N. Вычислено, m/z : 352.2060.

2-[Бис(3,4-дихлорфенил)метил]хинолин (2e). Выход 59 мг (68%), маслообразное вещество. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 5.81 (1H, с, CH); 7.07 (2H, д, $J = 8.2$, $J = 1.4$, H Ar); 7.23 (1H, д, $J = 8.0$, H Hetar); 7.31 (2H, д, $J = 1.4$, H Ar); 7.38 (2H, д, $J = 8.2$, H Ar); 7.56 (1H, т, $J = 7.5$, H Hetar); 7.74 (1H, т, $J = 7.7$, H Hetar); 7.82 (1H, д, $J = 8$, H Hetar); 8.10 (1H, д, $J = 7.8$, H Hetar); 8.16 (1H, д, $J = 8.4$, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 57.8; 121.6; 127.2; 127.8; 128.5; 128.9; 129.1; 130.5; 130.7; 131.3; 131.5; 133.0; 137.8; 141.7; 160.5. Найдено, m/z : 431.9880 [M+H]⁺. C₂₂H₁₄Cl₄N. Вычислено, m/z : 431.9875.

6-(Дифенилметил)хинолин (2f). Выход 57 мг (98%), твердое вещество, т. пл. 110–115 °С. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 5.67 (1H, с, CH); 7.08 (4H, д, $J = 7.3$, H Ph); 7.17–7.19 (2H, м, H Ar, H Hetar); 7.23–7.26 (4H, м, H Ph, H Hetar); 7.31 (1H, д, $J = 8.2$, $J = 4.2$, H Hetar); 7.38 (1H, с, H Hetar); 7.50 (1H, д, $J = 8.7$, H Hetar); 8.00 (2H, т, $J = 7.3$, H Ph); 8.81 (1H, с, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 56.8; 121.3; 126.8; 127.7; 128.3; 128.6; 129.0; 129.6; 132.2; 136.7; 142.9; 143.3; 146.8; 149.8. Найдено, m/z : 296.1430 [M+H]⁺. C₂₂H₁₈N. Вычислено, m/z : 296.1434.

8-(Дифенилметил)хинолин (2g). Выход 57 мг (98%), твердое вещество, т. пл. 128–132 °С. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 7.19 (1H, с, CH); 7.24–7.26 (6H, м, H Ph, H Hetar); 7.32 (4H, т, $J = 7.5$, H Ph); 7.38–7.42 (2H, м, H Ph, H Hetar); 7.52 (1H, т, $J = 7.7$, H Hetar); 7.75 (1H, д, $J = 8.1$, H Hetar); 8.17 (1H, д, $J = 8.2$, $J = 1.5$, H Hetar); 8.93–8.95 (1H, м, H Hetar). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 50.1; 121.1; 126.1; 126.2; 126.7; 128.3; 128.5; 129.8;

130.6; 136.4; 142.8; 144.6; 146.3; 149.7. Найдено, m/z : 296.1431 [M+H]⁺. C₂₂H₁₈N. Вычислено, m/z : 296.1434.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-03-00074).

Список литературы

- Achan, J.; Talisuna, A. O.; Erhart, A.; Yeka, A.; Tibenderana, J. K.; Baliraine, F. N.; Rosenthal, P. J.; D'Alessandro, U. *Malar. J.* **2011**, *10*, 144.
- Samosorn, S.; Bremner, J. B.; Ball, A.; Lewis, K. *Bioorg. Med. Chem.* **2006**, *14*, 857.
- Maignan, S.; Guilloteau, J.; Zhou-Liu, Q.; Clement-Mella, C.; Mikol, V. *J. Mol. Biol.* **1998**, *282*, 359.
- Zouhiri, F.; Desmaele, D.; d'Angelo, J.; Ourevitch, M.; Mouscadet, J.-F.; Leh, H.; Le Bret, M. *Tetrahedron Lett.* **2001**, *42*, 8189.
- McCormick, J. L.; McKee, T. C.; Cardellina II, J. H.; Boyd, M. R. *J. Nat. Prod.* **1996**, *59*, 469.
- Yadav, D. K.; Rai, R.; Kumar, N.; Singh, S.; Misra, S.; Sharma, P.; Shaw, P.; Perez-Sanchez, H.; Mancera, R. L.; Choi, E. H.; Kim, M.-h.; Pratap, R. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, article number 38128.
- Matsuno, K.; Masuda, Y.; Uehara, Y.; Sato, H.; Muroya, A.; Takahashi, O.; Yokotagawa, T.; Furuya, T.; Okawara, T.; Otsuka, M.; Ogo, N.; Ashizawa, T.; Oshita, C.; Tai, S.; Ishii, H.; Akiyama, Y.; Asai, A. *ACS Med. Chem. Lett.* **2010**, *1*, 371.
- Aly, R. M.; Serya, R. A. T.; El-Motwally, A. M.; Esmat, A.; Abbas, S.; El Ella, D. A. A. *Bioorg. Chem.* **2017**, *75*, 368.
- Khusnutdinov, R. I.; Bayguzina, A. R.; Dzhemilev, U. M. *J. Organomet. Chem.* **2014**, *768*, 75.
- Madapa, S.; Tusi, Z.; Batra, S. *Curr. Org. Chem.* **2008**, *12*, 1116.
- Ryabukhin, D. S.; Vasilyev, A. V. *Russ. Chem. Rev.* **2016**, *85*, 637.
- Njoroge, M.; Njuguna, N. M.; Mutai, P.; Ongarora, D. S. B.; Smith, P. W.; Chibale, K. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 11138.
- Teixeira, C.; Vale, N.; Perez, B.; Gomes, A.; Gomes, J. R. B.; Gomes, P. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 11164.
- Barnett, D. S.; Guy, R. K. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 11221.
- Ryabukhin, D. S.; Zakusilo, D. N.; Kompanets, M. O.; Tarakanov, A. A.; Boyarskaya, I. A.; Artamonova, T. O.; Khohodorkovskiy, M. A.; Opeida, I. O.; Vasilyev, A. V. *Beilstein J. Org. Chem.* **2016**, *12*, 2125.
- Klumpp, D. A.; Lau, S. *J. Org. Chem.* **1999**, *64*, 7309.
- Prakash, G. K. S.; Paknia, F.; Chacko, S.; Mathew, T.; Olah, G. A. *Heterocycles* **2008**, *76*, 783.
- Sheets, M. R.; Li, A.; Bower, E. A.; Weigel, A. R.; Abbott, M. P.; Gallo, R. M.; Mitton, A. A.; Klumpp, D. A. *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 2502.
- Ryabukhin, D. S.; Turdakov, A. N.; Soldatova, N. S.; Kompanets, M. O.; Ivanov, A. Yu.; Boyarskaya, I. A.; Vasilyev, A. V. *Beilstein J. Org. Chem.* **2019**, *15*, 1962.
- Klumpp, D. A.; Kindelin, P. J.; Li, A. *Tetrahedron Lett.* **2005**, *46*, 2931.
- Gurskaya, L. Y.; Belyanskaya, D. S.; Ryabukhin, D. S.; Nilov, D. I.; Boyarskaya, I. A.; Vasilyev, A. V. *Beilstein J. Org. Chem.* **2016**, *12*, 950.
- Klumpp, D. A.; Jones, A.; Lau, S.; de Leon, S.; Garza, M. *Synthesis* **2000**, 1117.