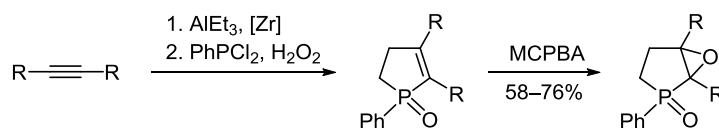


Эпоксицирование 4,5-диалкил-2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксидов

Владимир А. Дьяконов¹, Рина А. Аглиуллина¹, Алевтина Л. Махаматханова^{1*},
Татьяна В. Тюмкина¹, Усеин М. Джемилев¹

¹ Институт нефтехимии и катализа РАН,
пр. Октября, 141, Уфа 450075, Россия; e-mail: ink@anrb.ru

Поступило 28.07.2017
Принято после доработки 13.11.2017



Разработан метод синтеза 1,5-диалкил(циклоалкил,фенил)-2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов из алкинов, основанный на эпоксицировании *m*-хлорнадбензойной кислотой неопределенных циклических фосфорорганических соединений. Фосфорорганические соединения получены последовательными реакциями каталитического циклоалюминирования симметричных ацетиленов триэтилалюминием в присутствии катализатора дихлорида бис(циклопентадиенил)циркония(IV) с образованием 2,3-дизамещенных алуминациклопент-2-енов и взаимодействием последних *in situ* с фенилдихлоридом фосфора.

Ключевые слова: алуминациклопентены, алюминийорганические соединения, гетероциклические соединения, 2,3-дигидрофосфолы, цирконоцендихлорид, эпоксицирование, металлокомплексный катализ, циклоалюминирование, эпоксицирование.

Возрастающий интерес к эпоксицированным фосфоланам вызван возможностью их использования в качестве интермедиатов в синтезе производных нуклеозидов фосфосахаров, таких как AZT,¹ рибавирин,² 4'-тиодидезоксинуклеозид,³ аристеромицин,⁴ перспективных в качестве ингибиторов протеазы ВИЧ, противоопухолевых и антибактериальных препаратов. Кроме того, фосфорные соединения сами проявляют биологическую активность. Например, фосфорное соединение биалофос обладает противогрибковыми свойствами,⁵ соединение фосфономицин, содержащее в своей структуре и фосфонатную, и эпоксидную группы, является антибиотиком широкого спектра действия.^{5,6} Недавно Ямашита с соавторами⁷ показали, что замещенные фосфоланы проявляют противоопухолевую активность в отношении лейкозных клеток.

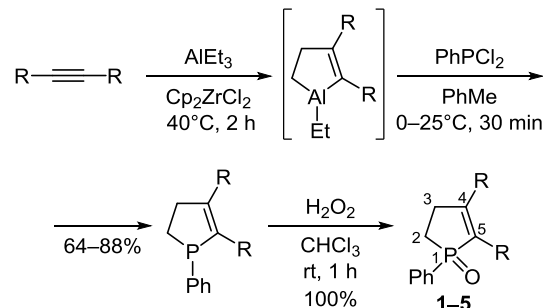
Учитывая высокий биомедицинский потенциал циклических соединений фосфора, химия фосфосахаров и их аналогов является одной из интересных и быстро развивающихся областей медицинских исследований, а модификация 2,3-дигидрофосфолов – эффективным инструментом в органическом синтезе, позволяющим синтезировать практически важные циклические фосфорорганические соединения (ФОС) заданной структуры.

В рамках проводимых нами исследований по разработке препаративных методов синтеза циклических ФОС мы изучили эпоксицирование полученных

нами соединений на примере 4,5-дизамещенных 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксидов в реакциях с известными эпоксицирующими агентами (надкислотами, пероксидами металлов).

Исходные 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксиды получали по разработанной методике.^{8–10} При взаимодействии алуминациклопент-2-енов, полученных *in situ* реакцией дизамещенных симметричных ацетиленов с AlEt₃, с PhPCl₂ в PhMe в течение 30 мин происходит замена атомов Al на атомы P с образованием соответствующих 2,3-дигидрофосфолов с выходами 64–88%. Полученные 2,3-дигидрофосфолы затем были переведены с помощью H₂O₂ в 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксиды 1–5 с количественными выходами (схема 1).

Схема 1

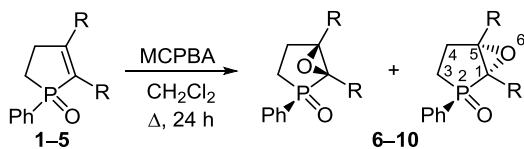


1 R = Et, 2 R = *n*-Pr, 3 R = *n*-Bu, 4 R = Ph, 5 R + R = (CH₂)₁₀

Первоначально в качестве эпоксилирующего агента выбрали Na_2O_2 .^{11,12} Однако взаимодействие 4,5-дизамещенных 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксидов **1–5** с избытком Na_2O_2 при различных температурах от 30 до 70 °С в EtOH за 6 ч не привело к целевым эпоксидам.

Применение более сильного эпоксилирующего агента MCPBA,¹³ широко используемого в реакциях эпоксирирования алкенов, было более успешным. Установили, что 4,5-дизамещенные 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксиды **1–5** вступают в реакцию эпоксирирования с 3-кратным избытком MCPBA при кипячении в CH_2Cl_2 (схема 2).

Схема 2



6 R = Et (69%), **7** R = *n*-Pr (74%), **8** R = *n*-Bu (76%)
9 R = Ph (70%), **10** R+R = $(\text{CH}_2)_{10}$ (58%)

Побочные продукты удаляли обработкой органического слоя раствором NaHCO_3 . Выделенные продукты представляют собой маслянистые жидкости светло-желтого цвета.

Структура новых 1,5-диалкил(циклоалкил,фенил)-2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов установлена методом спектроскопии ЯМР ^1H , ^{13}C и ^{31}P . Так, в спектрах ЯМР ^{13}C соединений **6–10** вместо сигналов sp^2 -гибридизованных атомов углерода присутствуют характерные сигналы в области 64.9–74.0 м. д., что свидетельствует о прошедшей реакции эпоксирирования (рис. 1). Кроме того, химический сдвиг атома ^{31}P в спектрах целевых продуктов смещен относительно химического сдвига атома ^{31}P в спектрах исходных 2,3-дигидрофосфол-1-оксидов (62–64 м. д.) в область сильного поля на 8–12 м. д. Полученные экспериментальные значения химических сдвигов, а также гетероядерные константы (J_{PC}) для углеродных атомов C-1 96.6–102.7 Гц согласуются с литературными спектральными данными структурно близких 2-метил(фенил)-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов.^{14–16}

Установлено, что реакция эпоксирирования 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксидов **1–5** не является стереоселективной, так как для всего ряда синтезированных соединений наблюдается образование диастереомеров в соотношении 1:2. Следует отметить, что в спектрах соединений **9** и **10** химические сдвиги атомов фосфора изомеров отличаются (рис. 2), в то время как в спектрах 1,5-диалкилпроизводных 2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов **6–8** они близки и сливаются в один сигнал – уширенный за счет взаимодействия с протонами цикла. С целью корректного определения значений химических сдвигов в спектрах ЯМР ^{31}P 1,5-диалкилпроизводных 2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов **6–8** спектры были записаны в режиме подавления протонов.

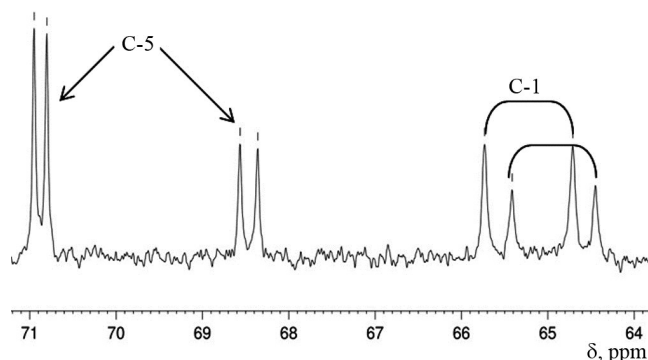


Рисунок 1. Фрагмент спектра ЯМР ^{13}C эпоксирированного фосфолана **10**.

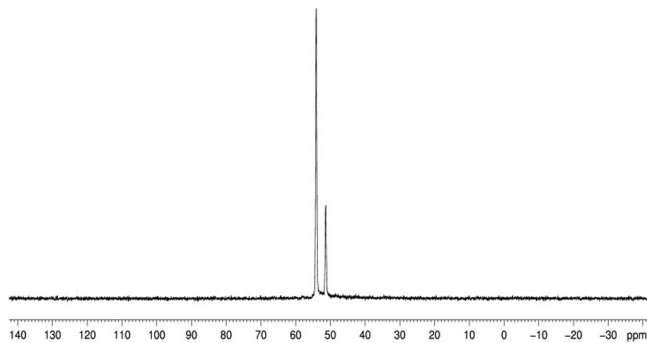


Рисунок 2. Спектр ЯМР ^{31}P эпоксирированного фосфолана **10**.

Таким образом, нами показано, что 4,5-дизамещенные 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксиды в реакции с избытком *m*-хлорнадбензойной кислоты образуют соответствующие эпоксидам с выходами 58–76%, представляющие значительный практический интерес.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H , ^{13}C и ^{31}P зарегистрированы на спектрометре Bruker Avance-400 (400, 100 и 162 МГц соответственно) в CDCl_3 . Двумерные гомоядерные (COSY) и гетероядерные (^1H – ^{13}C HSQC, ^1H – ^{13}C HMBC) спектры записаны по стандартным процедурам Bruker. Масс-спектр соединения **8** зарегистрирован на приборе MALDI TOF/TOF Autoflex-III Bruker с матрицей 2,5-дигидроксibenзойной кислоты и α -циано-4-гидроксикоричной кислоты в отражательном режиме с записью положительных ионов. Масс-спектры (ГХ-МС) остальных соединений записаны на хроматографе ShimadzuGC 2010 с масс-спектрометрическим детектором GCMS-QP2010 Ultra. Использована капиллярная колонка Supelco 5ms (60 м × 0.25 мм × 0.25 мкм); газ-носитель – гелий; температура инжектора – 260 °С, интерфейса – 260 °С, ионного источника – 200 °С. Элементный анализ выполнен на элементном анализаторе фирмы Karlo Erba, модель 1106. Хроматографический анализ выполнен на приборе Shimadzu GC-9A, колонка 2000 × 2 мм, неподвижная фаза – силикон SE-30 (5%) на Chromaton N-AW-HMDS (0.125–0.160 мм), газ-носитель – гелий (30 мл/мин), при программировании температуры от 50 до 300 °С со скоростью 8 °С/мин. Для колоночной хроматографии использован силикагель фирмы Acros (0.060–0.200 мм). Реакции с металлоорганическими соединениями прове-

денны в токе сухого аргона. Растворители осушены и использованы свежеперегранными. Используются коммерчески доступные Cr_2ZrCl_2 , фосфины (Acros) и 92% AlEt_3 (ОАО "Редкинский опытный завод").

Получение 4,5-дизамещенных 2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксидов 1–5 (общая методика). В круглодонную колбу в атмосфере сухого аргона при 0 °С и перемешивании последовательно загружают 0.15 г (0.5 ммоль) Cr_2ZrCl_2 , 10 ммоль алкина и 1.37 мл (10 ммоль) AlEt_3 . Температуру доводят до 40 °С и смесь перемешивают в течение 4 ч. Затем добавляют 20 мл PhMe, смесь охлаждают до –5 °С, прикапывают 1.36 мл (10 ммоль) PhPCl_2 и перемешивают при комнатной температуре еще 30 мин. Реакционную смесь обрабатывают насыщенным водным раствором NH_4Cl , продукты реакции экстрагируют Et_2O , сушат над MgSO_4 , растворитель упаривают. К остатку добавляют 10 мл CHCl_3 и при интенсивном перемешивании медленно прикапывают 0.08 мл (10 ммоль) 30 % H_2O_2 и перемешивают в течение 1 ч. Затем реакционную смесь промывают водой (3 × 10 мл), органический слой сушат над MgSO_4 . Растворитель упаривают. Продукты отделяют вакуумной перегонкой. Спектральные характеристики соединений 1–5 совпадают с описанными в литературе.^{8–10}

Получение 1,5-дизамещенных 2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксидов 6–10 (общая методика). К раствору 8 ммоль 4,5-диалкил(фенил, циклододecil)-2,3-дигидро-1*H*-фосфол-1-оксида 1–5 в 16 мл CH_2Cl_2 добавляют 4.14 г (24 ммоль) МСРВА и кипятят в колбе с обратным холодильником в течение 24 ч. Реакционную смесь нейтрализуют водным раствором NaHCO_3 (7 г в 35 мл воды) при энергичном перемешивании в течение 1 ч. Водный слой экстрагируют CHCl_3 , сушат над MgSO_4 . Продукт упаривают при пониженном давлении на роторном испарителе и очищают методом колоночной хроматографии (элюент гексан– EtOAc – MeOH , 5:3:1). Все эпоксиды получают в виде смесей диастереомеров в соотношении 1:2 (в спектрах ЯМР ^1H одной (*) звездочкой обозначается сигнал одного изомера, двумя (**)) звездочками – сигнал обоих изомеров).

2-Фенил-1,5-диэтил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксид (6). Выход 1.38 г (69%), желтое масло. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3058, 2960, 2932, 2602, 2486, 1715, 1466, 1437, 1270, 1168, 1150, 1134, 1070, 839, 745, 706, 505, 484. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 0.65–1.08 (12H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_3^{**}$); 1.51–1.79 (10H, м, CH_2CH_3 и 3- CH_2^{**}); 1.94–2.21 (4H, м, 3,4- CH_2^{**}); 2.24–2.46 (2H, м, 4- CH_2^*); 7.28–7.97 (10H, м, H Ph **). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д. (J , Гц): 13.4, 13.5, 13.7 и 13.8 (CH_3); 21.1 ($J = 70.7$) и 23.0 ($J = 69.5$, C-3); 25.4 ($J = 12.2$) и 26.0 ($J = 12.2$, C-4); 29.8 и 30.4 (CH_2CH_3); 65.2 ($J = 96.6$) и 65.6 ($J = 101.6$, C-1); 68.6 ($J = 20.1$) и 70.9 ($J = 15.1$, C-5); 128.5 ($J = 11.6$) и 129.0 ($J = 11.3$, C-3,5 Ph); 129.9 ($J = 10.0$, C-2,6 Ph); 129.9 ($J = 90.0$, C-1 Ph); 131.3 ($J = 9.8$, C-2,6 Ph); 132.2 ($J = 2.4$) и 132.3 ($J = 2.6$, C-4 Ph). Спектр ЯМР ^{31}P , δ , м. д.: 53.2; 53.5. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 250 [$\text{M}]^+$ (100). Найдено, %: C 67.15; H 7.66. $\text{C}_{14}\text{H}_{19}\text{O}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 67.19; H 7.65.

1,5-Дипропил-2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксид (7). Выход 1.64 г (74%), желтое масло. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3062, 2961, 2932, 2873, 2605, 2482, 1771, 1712, 1574, 1465, 1437, 1246, 1177, 1152, 1132, 1109, 750, 730, 705, 502, 482. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 0.67 (3H, т, $^3J = 7.2$, CH_2CH_3^*); 0.81 (3H, т, $^3J = 7.2$, CH_2CH_3^*); 0.90–1.00 (6H, м, CH_2CH_3^*); 1.04–1.22 (8H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_3^{**}$); 1.47–1.82 (10H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ и 3- CH_2^{**}); 1.93–2.18 (4H, м, 3,4- CH_2^{**}); 2.23–2.46 (2H, м, 4- CH_2^*); 7.24–8.01 (10H, м, H Ph **). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д. (J , Гц): 14.0, 14.2, 14.3 и 14.4 (CH_3); 18.5, 18.8, 19.1 и 19.3 (CH_2CH_3); 21.2 ($J = 70.7$) и 23.1 ($J = 69.5$, C-3); 26.5 и 26.7 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$); 28.0 ($J = 12.2$) и 28.5 ($J = 12.2$, C-4); 32.8 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$); 65.1 ($J = 97.0$) и 65.5 ($J = 101.3$, C-1); 68.3 ($J = 19.8$) и 70.8 ($J = 14.8$, C-5); 128.5 ($J = 11.7$) и 128.9 ($J = 11.2$, C-3,5 Ph); 130.0 ($J = 9.4$, C-2,6 Ph); 131.1 ($J = 92.5$, C-1 Ph); 131.3 ($J = 9.2$, C-2,6 Ph); 132.2 ($J = 2.4$) и 132.3 ($J = 2.7$, C-4 Ph). Спектр ЯМР ^{31}P , δ , м. д.: 53.1; 53.3. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 278 [$\text{M}]^+$ (100). Найдено, %: C 69.08; H 8.37. $\text{C}_{16}\text{H}_{23}\text{O}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 69.05; H 8.33.

1,5-Дибутил-2-фенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксид (8). Выход 1.86 г (76%), желтое масло. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3056, 2960, 2932, 2872, 2606, 2482, 1708, 1466, 1437, 1264, 1173, 1151, 1110, 838, 813, 740, 704, 507, 484. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 0.59 (3H, т, $^3J = 6.8$, CH_2CH_3^*); 0.72 (3H, т, $^3J = 7.2$, CH_2CH_3^*); 0.78–0.92 (6H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_3^{**}$); 1.00–1.37 (8H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_3^{**}$); 1.40–1.55 (8H, м, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3^{**}$); 1.57–1.75 (8H, м, $\text{CH}_2(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3^{**}$); 1.80–2.18 (6H, м, 3,4- CH_2^{**}); 2.27–2.47 (2H, м, 4- CH_2^*); 7.35–7.96 (10H, м, H Ph). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д. (J , Гц): 13.2, 13.3, 13.5 и 13.6 (CH_3); 20.6 ($J = 70.9$) и 22.5 ($J = 69.4$, C-3); 22.4, 22.5 и 22.6 (CH_2CH_3); 25.1 ($J = 12.2$) и 25.7 ($J = 11.9$, C-4); 26.3, 26.9, 27.3 и 27.5 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$); 30.1 и 30.7 ($\text{CH}_2(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$); 64.9 ($J = 97.2$) и 65.2 ($J = 102.7$, C-1); 68.5 ($J = 20.8$) и 70.9 ($J = 14.8$, C-5); 128.3 ($J = 11.8$) и 128.8 ($J = 11.3$, C-3,5 Ph); 131.1 ($J = 9.3$) и 132.1 ($J = 11.5$, C-2,6 Ph); 131.6 ($J = 90.0$, C-1 Ph); 132.2 и 133.9 (C-4 Ph). Спектр ЯМР ^{31}P , δ , м. д.: 53.2; 52.9; Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 307.18 [$\text{M}+\text{H}]^+$ (100). Найдено, %: C 70.58; H 8.92. $\text{C}_{18}\text{H}_{27}\text{O}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 70.56; H 8.88.

1,2,5-Трифенил-6-окса-2-фосфабицикло[3.1.0]гексан-2-оксид (9). Выход 1.60 г (58%), желтое масло. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3056, 2960, 2927, 2853, 1768, 1713, 1648, 1603, 1567, 1394, 1265, 1200, 1160, 1113, 1072, 1026, 904, 745, 698, 544, 527, 481. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 2.13–2.38 (4H, м, 3- CH_2^{**}); 2.58–2.96 (2H, м, 4- CH_2^*); 3.01–3.16 (2H, м, 4- CH_2^*); 6.87–8.06 (30H, м, H Ph **). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д. (J , Гц): 21.2 ($J = 68.9$) и 23.0 ($J = 69.2$, C-3); 28.6 и 29.4 (C-4); 67.8 ($J = 100.4$) и 69.4 ($J = 96.8$, C-1); 70.2 ($J = 21.1$) и 74.0 ($J = 15.0$, C-5); 126.3 и 127.1 (C-4 Ph); 127.5 (C-3,5 Ph); 127.8 ($J = 11.2$, C-3,5 PPh); 128.2 ($J = 2.4$, C-4 PPh); 129.6 ($J = 90.0$, C-1 PPh); 131.0 ($J = 9.4$, C-2,6 PPh); 132.2 (C-1 Ph); 134.4 ($J = 67.8$, C-1 Ph). Спектр ЯМР ^{31}P , δ , м. д.: 50.9; 51.9. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 346 [$\text{M}]^+$ (100). Найдено, %: C 76.34; H 5.55. $\text{C}_{22}\text{H}_{19}\text{O}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 76.29; H 5.53.

1-Фенилдодекагидро-3а,13-эпоксиклододека[b]-фосфол-1-оксид (10). Выход 1.86 г (70%), желтое масло. ИК спектр, ν , см^{-1} : 3056, 2929, 2860, 1764, 1469, 1438, 1258, 1195, 1183, 1111, 820, 748, 724, 541, 516, 452. Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (J , Гц): 0.84–1.76 (45H, м, 4,5,6,7,8,9,10,11,12,13- CH_2 и 2,3- CH_2^{**}); 1.99–2.55 (3H, м, 3- CH_2^{**}); 7.22–7.74 (10H, м H Ph **). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д. (J , Гц): 21.7 ($J = 15.5$), 21.9, 22.0, 22.1 и 22.9 (C-4,7,8); 23.0 ($J = 68.6$) и 23.1 ($J = 53.3$, C-2); 23.3, 23.5 ($J = 5.6$), 25.1, 25.4, 25.7, 25.9, 26.1 ($J = 2.0$), 26.2, 26.4, 26.8 и 27.0 (C-5,6,9,10,11,12,13); 27.4 ($J = 17.2$, C-3); 65.4 ($J = 99.1$) и 65.9 ($J = 95.5$, C-13a); 69.5 ($J = 21.5$) и 71.7 ($J = 15.6$, C-3a); 128.4 ($J = 11.6$) и 128.7 ($J = 11.3$, C-3,5 Ph); 129.9 ($J = 9.6$, C-2,6 Ph); 130.0 ($J = 92.3$, C-1 Ph); 131.3 ($J = 9.1$, C-2,6 Ph); 132.1 ($J = 2.4$) и 132.2 ($J = 2.6$, C-4 Ph). Спектр ЯМР ^{31}P , δ , м. д.: 51.3; 54.1. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 332 [$\text{M}]^+$ (100). Найдено, %: C 72.39; H 8.84. $\text{C}_{20}\text{H}_{29}\text{O}_2\text{P}$. Вычислено, %: C 72.26; H 8.79.

Файл сопроводительных материалов, содержащий спектры ЯМР ^1H , ^{13}C и ^{31}P соединений **7–10**, доступен на сайте журнала <http://hgs.osi.lv>.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-33-00193) и Совета по грантам президента РФ (грант НШ-5240.2018.3). Структурные исследования полученных соединений были выполнены с использованием оборудования Регионального центра коллективного пользования "Агидель".

Список литературы

- Mitsuya, H.; Weinhold, K. J.; Furman, P. A.; St. Clair, M. H.; Lehrman, S. N.; Gallo, R. C.; Bolognesi, D.; Barry, D. W.; Broder, S. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1985**, 82, 7096.
- Mccormick, J. B.; Mitchell, S. W.; Getchell, J. P.; Hicks, D. R. *Lancet* **1984**, 324, 1367.
- Secrist III, J. A.; Riggs, R. M.; Tiwari, K. N.; Montgomery, J. A. *J. Med. Chem.* **1992**, 35, 533.
- Shealy Y. F.; Clayton, J. D. *J. Am. Chem. Soc.* **1966**, 88, 3885.
- Seto, H.; Kuzuyama, T. *Nat. Prod. Rep.* **1999**, 16, 589.
- Hendlin, D.; Stapley, D. O.; Jackson, M.; Wallick, H.; Miller, A. K.; Wolf, F. J.; Miller, T. W.; Chaiet, L.; Kahan, F. M.; Foltz, E. L.; Woodruff, H. B.; Hernandez, S.; Mochales, S. *Science* **1969**, 166, 122.
- Yamaoka, M.; Yamashita, M.; Yamada, M.; Fujie, M.; Kiyofuji, K.; Ozaki, N.; Asai, K.; Niimi, T.; Suyama, T.; Yamashita, J.; Sawada, A.; Makita, R.; Sugiyama, M.; Toda, M.; Nakamura, S.; Ohnishi, K. *Pure Appl. Chem.* **2012**, 84, 37.
- D'yakonov, V. A.; Makhamatkhanova, A. L.; Agliullina, R. A.; Tyumkina, T. V.; Dzhemilev, U. M. *Tetrahedron Lett.* **2014**, 55, 3913.
- D'yakonov, V. A.; Makhamatkhanova, A. L.; Dilmukhametova, L. K.; Agliullina, R. A.; Tyumkina, T. V.; Dzhemilev, U. M. *Organometallics* **2015**, 34, 221.
- D'yakonov, V. A.; Makhamatkhanova, A. L.; Agliullina, R. A.; Dilmukhametova, L. K.; Tyumkina, T. V.; Dzhemilev, U. M. *Beilstein J. Org. Chem.* **2016**, 12, 406.
- Yamashita, M.; Reddy, V. K.; Rao, L. N.; Haritha, B.; Maeda, M.; Suzuki, K.; Totsuka, H.; Takahashi, M.; Oshikawa, T. *Tetrahedron Lett.* **2003**, 44, 2339.
- Ito, S.; Yamashita, M.; Niimi, T.; Fujie, M.; Reddy, V. K.; Totsuka, H.; Haritha, B.; Maddali, K.; Nakamura, S.; Asai, K.; Suyama, T.; Yamashita, J.; Iguchi, Y.; Yu, G.; Oshikawa, T. *Heterocycl. Commun.* **2009**, 15, 23.
- Hussain, H.; Al-Harrasi, A.; Green, I. R.; Ahmed, I.; Abbas, G.; Rehman, N. U. *RSC Adv.* **2014**, 4, 12882.
- Quin, L. D.; Wu, X.-P. *Heteroat. Chem.* **1991**, 2, 359.
- Quin, L. D.; Symmes, C.; Middlemas, E. D.; Lawson, H. F. *J. Org. Chem.* **1980**, 45, 4688.
- Reddy, V. K.; Haritha, B.; Oshikawa, T.; Yamashita, M. *Tetrahedron Lett.* **2004**, 45, 2851.