

Посвящается 80-летию со дня рождения академика О. Н. Чупахина

О. В. Петрова¹, М. В. Маркова¹, И. А. Ушаков¹,
Л. Н. Собенина¹, Е. В. Третьяков², В. И. Овчаренко²,
А. И. Михалева¹, Б. А. Трофимов^{1*}

СИНТЕЗ 5-ТРИФТОРАЦЕТИЛПИРРОЛ-2-КАРБАЛЬДЕГИДОВ

5-Трифторацетилпиррол-2-карбальдегиды синтезированы низкотемпературным трифторацетилированием ацеталей пиррол-2-карбальдегидов трифторуксусным ангидридом с последующим снятием ацетальной защиты мягким кислотнокаталитическим гидролизом. Гидролиз сопровождается образованием минорного продукта – (1*E*,4*E*)-1,5-бис[5-(2,2,2-трифторацетил)-1*H*-пиррол-2-ил]-1,4-пентадиен-3-она, который выделен и идентифицирован.

Ключевые слова: ангидрид трифторуксусной кислоты, пиррол-2-карбальдегиды, 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегиды, ацетальная защита, трифторацетилирование.

В последние годы интенсивно развивается химия фторсодержащих гетероциклов [1–7], на основе которых созданы многие известные лекарства [8]: антибиотики (ципрофлоксацин, пefлоксацин, офлоксацин и другие фторхинолоны), фунгициды (флюконазол), цитостатики (фторурацил и его нуклеозиды), антидепрессант (фторбенз-1,4-дiazепин).

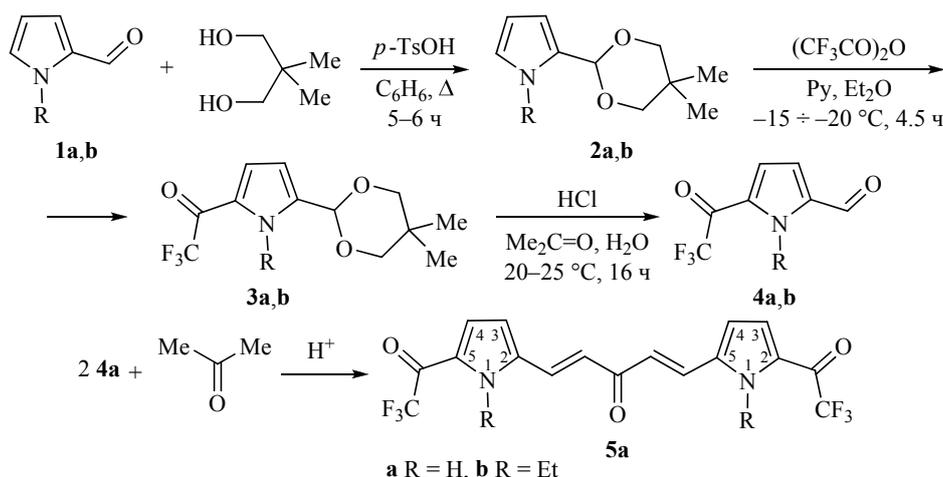
Методы синтеза фторсодержащих гетероциклических соединений большей частью основаны на введении фторорганических заместителей в гетероароматический цикл с использованием различных химических реакций. Одной из таких реакций является трифторацетилирование гетероциклов трифторуксусным ангидридом. Эта реакция в пиррольном ряду протекает легко (комнатная температура, 1 ч) и приводит с высокими выходами к 2-трифторацетилпирролам [9, 10]. Последние используются для синтеза трифторацетилпирролкарбоксамидов [11], 1-(пиррол-2-ил)-2,2,2-трифторэтанола [10, 12], оксимов [10], иминов [13] пиррольного ряда, а также производных пирролизина с трифторметильной группой [14]. На основе 2-трифторацетилпирролов получают *мезо*-CF₃-замещённые дипирролилметаны [12] – интермедиаты в синтезе *мезо*-CF₃-замещённых порфиринов [15] и флуоресцирующих в ближней инфракрасной области *мезо*-CF₃-замещённых дифторборадиазиндаценов [12, 16, 17].

Трифторацетилпирролы, содержащие в пиррольном цикле альдегидную группу, практически не известны. Исключение составляет 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегид (получен формилированием 2-трифторацетилпиррола), используемый в синтезе соединений с противоопухолевой активностью [18]. Кроме того, такие трифторацетилпирролкарбальдегиды предоставляют новые возможности для многоцелевого органического синтеза, в частности для получения полифункциональных стабильных органических, в том числе нитроксильных, радикалов и полирадикалов [19–21].

Однако оказалось, что трифторацетилирование пиррол-2-карбальдегидов в условиях [10], пригодных для многих других пирролов, не осуществляется. Это обусловлено сильным электроноакцепторным эффектом альдегидной группы, деактивирующим пиррольный цикл по отношению к электрофиль-

ной атаке. Не увенчались также успехом наши попытки ввести трифторацетильную группу в молекулу производного пиррола с защищённой альдегидной группой – 3-(пиррол-2-ил)-2-цианоакрилата, с успехом применяющегося для синтеза пиррол-2,5-дикарбальдегида [22].

В настоящем сообщении мы впервые описываем метод получения 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегидов, который включает: ацетальную защиту альдегидной группы пиррол-2-карбальдегидов **1a,b** 2,2-диметилпропандиолом в присутствии *n*-толуолсульфокислоты, введение трифторацетильной группы в пиррольный цикл полученных ацеталей **2a,b** реакцией с трифторуксусным ангидридом и снятие ацетальной защиты в 2-трифторацетилпирролах **3a,b** мягким кислотно-каталитическим гидролизом в водном ацетоне.



Защита альдегидной группы осуществлялась по методике, описанной в работе [23]. Соединения **2a,b** получены с выходами 45 и 44% соответственно. Трифторацетилирование пиррола **2a** в условиях, описанных в работах [9, 10], протекает с невысокой конверсией (соотношение соединений **2a:3a** \approx 1.5:1, по данным спектра ЯМР ^1H), которая при повышении температуры (30–33 °C) увеличивается незначительно (\sim 1:1). При температуре $-4 \div -6$ °C соотношение соединений **2a:3a** достигает 1:1.5. Дальнейшее снижение температуры ($-15 \div -20$ °C) приводит к пирролу **3a** с выходом 96%. Эти результаты можно объяснить тем, что с повышением температуры снижается равновесная концентрация промежуточного σ -комплекса (аддукта трифторацетильного катиона с исходным пирролом), а также ускоряются побочные реакции с участием пиррольного цикла. Соответствующее *N*-этилпроизводное **3b** в аналогичных условиях получено с выходом 51%.

Снятие ацетальной защиты (кислотно-каталитический гидролиз в водном ацетоне, комнатная температура, 4 М HCl) приводит к целевым 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегидам **4a,b**. В случае незамещённого производного **3a** (R = H), наряду с пиррол-2-карбальдегидом **4a**, нами выделен в незначительном количестве (3%) (1*E*,4*E*)-1,5-бис[5-(2,2,2-трифторацетил)-1*H*-пиррол-2-ил]пента-1,4-диен-3-он (**5a**). Это соединение является продуктом взаимодействия ацетона с двумя молекулами образующегося альдегида **4a**.

Попытка заменить ацетон на диоксан в качестве растворителя не приводит к удовлетворительным результатам: в реакционной смеси наряду с пирролами **3a** и **4a** присутствуют в значительном количестве неидентифицированные соединения, что затрудняет выделение целевых продуктов в чистом виде.

Таким образом, разработан метод синтеза новых 2-трифторацетилпирролов с акцепторной альдегидной группой – потенциальных прекурсоров фармакологических препаратов, а также перспективных материалов для получения полифункциональных стабильных органических радикалов и полирадикалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК спектры записаны на спектрометре Bruker IFS25 в таблетках KBr или тонком слое. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C зарегистрированы на приборе Bruker DPX-400 (400 и 100 МГц соответственно) в CDCl_3 (внутренний стандарт ГМДС: δ 0.05 м. д. для ядер ^1H и 2.0 м. д. для ядер ^{13}C), в DMSO-d_6 (внутренний стандарт – остаточные сигналы растворителя: δ 2.50 м. д. для ядер ^1H и 39.5 м. д. для ядер ^{13}C) и ацетоне- d_6 (внутренний стандарт – остаточные сигналы растворителя: 2.05 м. д. для ядер ^1H). Элементный анализ выполнен на элементном анализаторе Flash 2000. Содержание фтора определено спекрофотометрическим методом на приборе Spekol-11. Температуры плавления определены на приборе PolyTherm A. Коммерчески доступные пиррол-2-карбальдегиды **1a,b** использованы без дополнительной очистки.

2-(5,5-Диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1H-пиррол (2a) получают по методике [23] с выходом 45%. Спектральные характеристики совпадают с литературными [23].

2-(5,5-Диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1-этил-1H-пиррол (2b). Смесь 5.0 г (41.3 ммоль) 1-этилпиррол-2-карбальдегида (**1b**) и 8.5 г (81.2 ммоль) 5,5-диметилпропандиола в 200 мл бензола кипятят в колбе с насадкой Дина–Старка в течение 30 мин, отгоняя азеотроп воды с бензолом. Затем в реакционную смесь дробно добавляют *n*-TsOH (0.2–0.3 г, 4–6 вес. % от массы пиррола **1b**) и кипятят в течение 5–6 ч, отгоняя образующуюся воду. Реакционную смесь охлаждают и промывают 5% раствором NaHCO_3 (3 \times 30 мл), сушат поташом. После удаления бензола продукт очищают колоночной хроматографией (SiO_2 , элюент – гексан). Выход 4.3 г (44%), светло-коричневое густое масло. ИК спектр (микрослой), ν , cm^{-1} : 3105 (=CH), 2955, 2870 (CH_3 , CH_2), 1097 (O–C–O). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д. (*J*, Гц): 0.77 (3H, с, CH_3); 1.27 (3H, с, CH_3); 1.40 (3H, т, $J = 7.3$, NCH_2CH_3); 3.58 (2H, д, $J = 11.2$) и 3.73 (2H, д, $J = 11.2$, 2CH_2); 4.13 (2H, к, $J = 7.3$, NCH_2); 5.42 (1H, с, CH); 6.03–6.05 (1H, м, H-4); 6.18–6.20 (1H, м, H-3); 6.62–6.64 (1H, м, H-5). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), δ , м. д.: 16.3 (NCH_2CH_3); 17.6 (CH_3); 22.7 (CH_3); 30.3 ($\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 42.5 (NCH_2); 77.8 (CH_2); 98.1 (CH); 107.1 (C-3); 108.7 (C-4); 121.9 (C-5); 128.6 (C-2). Найдено, %: C 68.67; H 9.06; N 6.83. $\text{C}_{12}\text{H}_{19}\text{NO}_2$. Вычислено, %: C 68.87; H 9.15; N 6.69.

Трифторацетилирование 2-(5,5-диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1H-пирролов 2a,b (общая методика). К смеси 5.0 ммоль соединения **2a,b** и 0.99 г (12.5 ммоль) пиридина в 25 мл сухого диэтилового эфира при перемешивании в течение 1.5 ч по каплям добавляют 2.63 г (12.5 ммоль) раствора трифторуксусного ангидрида в 8 мл сухого диэтилового эфира при $-15 \div -20$ °C и перемешивают в течение 3 ч при указанной температуре. Реакционную смесь выливают в 30–35 мл насыщенного раствора NaHCO_3 , отделяют органический слой, водный слой экстрагируют диэтиловым эфиром (3 \times 15 мл), эфирные экстракты промывают водой (5 \times 15 мл), сушат поташом. После удаления эфира продукт очищают колоночной хроматографией (Al_2O_3 , элюент – гексан).

1-[5-(5,5-Диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1H-пиррол-2-ил]-2,2,2-трифторэтанон (3a). Выход 1.33 г (96%), светло-оранжевые кристаллы, т. пл. 86–87 °C. ИК спектр (KBr), ν , cm^{-1} : 3315 (NH), 1656 (C=O), 1189, 1136, 1111 (O–C–O). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д. (*J*, Гц): 0.72 (3H, с, CH_3); 1.22 (3H, с, CH_3); 3.61 (2H, д, $J = 11.2$) и 3.74 (2H, д, $J = 11.2$, 2CH_2); 5.50 (1H, с, CH); 6.37 (1H, д, $J = 2.6$, $J = 4.2$, H-4); 7.12–7.14 (1H, м, H-3); 9.79 (1H, уш. с, NH). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), δ , м. д. (*J*, Гц): 21.8 (CH_3); 23.0 (CH_3); 30.5 ($\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 77.4 (CH_2); 95.5 (CH); 110.1 (C-4); 116.9 (к, $J_{\text{C-F}} = 289.0$, CF_3); 121.9 (C-3); 125.1 (C-5); 140.1 (C-2); 170.3 (к, $J_{\text{C-F}} = 36.5$, C=O). Найдено, %: C 52.09; H 4.96; F 20.76; N 5.23. $\text{C}_{12}\text{H}_{14}\text{F}_3\text{NO}_3$. Вычислено, %: C 51.99; H 5.09; F 20.56; N 5.05.

1-[5-(5,5-Диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1-этил-1H-пиррол-2-ил]-2,2,2-трифторэтанон (3b). Выход 0.78 г (51%), белые игольчатые кристаллы, т. пл. 52–54 °C.

ИК спектр (KBr), ν , см^{-1} : 2962, 2932, 2850 (CH_2 , CH_3), 1675 ($\text{C}=\text{O}$), 1190, 1183, 1144 ($\text{O}-\text{C}-\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д. (J , Гц): 0.80 (3H, с, CH_3); 1.27 (3H, с, CH_3); 1.35 (3H, т, $J = 7.1$, NCH_2CH_3); 3.62 (2H, д, $J = 10.9$) и 3.77 (2H, д, $J = 10.9$, 2CH_2); 4.50 (2H, к, $J = 7.1$, NCH_2); 5.49 (1H, с, CH); 6.40 (1H, д, $J = 4.4$, H-4); 7.16–7.19 (1H, м, H-3). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), δ , м. д. (J , Гц): 16.2 (NCH_2CH_3); 21.9 (CH_3); 23.1 (CH_3); 30.4 ($\text{C}(\text{CH}_3)_2$); 42.4 (NCH_2); 77.9 (CH_2), 96.3 (CH); 110.4 (C-4); 117.1 (к, $J_{\text{C-F}} = 289.0$, CF_3); 123.5 (C-3); 124.9 (C-5); 141.2 (C-2); 169.8 (к, $J_{\text{C-F}} = 35.0$, $\text{C}=\text{O}$). Найдено, %: C 55.36; H 5.82; F 18.43; N 4.63. $\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{F}_3\text{NO}_3$. Вычислено, %: C 55.08; H 5.94; F 18.67; N 4.59.

5-(2,2,2-Трифторацетил)-1H-пиррол-2-карбальдегид (4a) и (1E,4E)-1,5-бис-[5-(2,2,2-трифторацетил)-1H-пиррол-2-ил]пента-1,4-диен-3-он (5a). Раствор 2.08 г (7.5 ммоль) соединения **3a** в 150 мл ацетона добавляют к 16.5 мл смеси 4 M водного раствора HCl и 45 мл ацетона и перемешивают при комнатной температуре в течение 16 ч. К реакционной смеси добавляют 100 мл насыщенного раствора NaCl и экстрагируют диэтиловым эфиром (3 \times 50 мл), органические экстракты промывают 5% раствором NaHCO_3 , водой и сушат поташом. После удаления эфира остаток (2.50 г) промывают хлороформом (3 \times 8 мл) и сушат. Получают 0.53 г (37%, 48% с учётом конверсии исходного пиррола **3a**) 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегида (**4a**). Хлороформ удаляют, остаток наносят на колонку (Al_2O_3) и выделяют (элюент – гексан) 0.48 г исходного пиррола **3a** (23%), затем (элюент – хлороформ) – 0.25 г смеси, которую растворяют при кипячении в 2–3 мл хлороформа. После охлаждения отфильтровывают выпавший жёлтый мелкокристаллический осадок, сушат и получают 0.10 г (3%) (1E,4E)-1,5-бис[5-(2,2,2-трифторацетил)-1H-пиррол-2-ил]-1,4-пентадиен-3-она (**5a**).

5-(2,2,2-Трифторацетил)-1H-пиррол-2-карбальдегид (4a). Тёмно-оранжевые мелкие кристаллы, т. пл. 190–192 °C. ИК спектр (KBr), ν , см^{-1} : 3318 (NH), 1671 ($\text{C}=\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (DMCO-d_6), δ , м. д. (J , Гц): 6.67 (1H, д, $J = 3.7$, H-3); 6.95 (1H, д, $J = 3.7$, H-4); 9.61 (1H, с, HCO). Спектр ЯМР ^{13}C (DMCO-d_6), δ , м. д. (J , Гц): 113.7 (C-3); 118.4 (к, $J_{\text{C-F}} = 292.7$, CF_3); 119.8 (C-4); 139.6 (C-2); 150.1 (C-5); 172.0 (к, $J_{\text{C-F}} = 30.3$, COCF_3); 187.5 (HCO). Найдено, %: C 44.19; H 2.01; F 29.69; N 7.13. $\text{C}_7\text{H}_4\text{F}_3\text{NO}_2$. Вычислено, %: C 43.99; H 2.11; F 29.82; N 7.33.

(1E,4E)-1,5-Бис[5-(2,2,2-трифторацетил)-1H-пиррол-2-ил]пента-1,4-диен-3-он (5a). Мелкие тёмно-жёлтые кристаллы, т. пл. 260 °C (возг.). ИК (KBr), ν , см^{-1} : 3322, 3247 (NH), 1662 ($\text{C}=\text{O}$), 1618 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ЯМР ^1H (ацетон- d_6), δ , м. д. (J , Гц): 6.96–6.98 (2H, м, H-4); 7.26–7.29 (2H, м, H-3); 7.42 (2H, д, $J = 16.0$, $=\text{CH}$); 7.75 (2H, д, $J = 16.0$, $=\text{CH}$); 11.94 (2H, уш. с, NH). Спектр ЯМР ^{13}C (DMCO-d_6), δ , м. д. (J , Гц): 115.0 (C-4); 116.8 (к, $J_{\text{C-F}} = 290.1$, CF_3); 122.4 (C-3); 127.2 (C-2); 127.9 ($\text{CH}=\text{CHCO}$); 130.7 (C-5); 139.3 ($\text{CH}=\text{CHCO}$); 168.6 (к, $J_{\text{C-F}} = 35.3$, COCF_3); 187.6 (CO). Найдено, %: C 50.81; H 2.78; F 27.88; N 6.64. $\text{C}_{17}\text{H}_{10}\text{F}_6\text{N}_2\text{O}_3$. Вычислено, %: C 50.51; H 2.49; F 28.20; N 6.93.

1-Этил-5-(2,2,2-трифторацетил)-1H-пиррол-2-карбальдегид (4b). В аналогичных условиях (см. получение соединения **4a**) из 1.80 г (5.9 ммоль) 1-[5-(5,5-диметил-1,3-диоксан-2-ил)-1-этил-1H-пиррол-2-ил]-2,2,2-трифторэтанона (**3b**) после обработки, описанной для альдегида **4a**, получают 1.50 г сырца, который наносят на колонку (Al_2O_3 , элюент – гексан) и выделяют 0.64 г исходного пиррола **3b** (36%) и 0.50 г 5-трифторацетилпиррол-2-карбальдегида **4b** (38%, 60% с учётом конверсии пиррола **3b**) в виде коричневого масла. ИК спектр (микрослой), ν , см^{-1} : 3143, 3100 ($=\text{CH}$), 2992, 2938, 2877, 2837 (CH_2 , CH_3), 1704, 1682 ($\text{C}=\text{O}$). Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3), δ , м. д. (J , Гц): 1.37 (3H, т, $J = 7.0$, NCH_2CH_3); 4.82 (2H, к, $J = 7.0$, NCH_2); 6.97 (1H, д, $J = 4.5$, H-4); 7.18–7.22 (1H, м, H-3); 9.86 (1H, с, HCO). Спектр ЯМР ^{13}C (CDCl_3), δ , м. д. (J , Гц): 16.3 (NCH_2CH_3); 42.8 (NCH_2); 116.4 (к, $J_{\text{C-F}} = 289.2$, CF_3); 121.7 (C-3); 122.0 (C-4); 128.5 (C-5); 137.2 (C-2); 172.5 (к, $J_{\text{C-F}} = 36.0$, $\text{C}=\text{O}$); 181.7 (HCO). Найдено, %: C 49.42; H 3.62; F 26.09; N 6.40. $\text{C}_9\text{H}_8\text{F}_3\text{NO}_2$. Вычислено, %: C 49.32; H 3.68; F 26.01; N 6.39.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения Российской академии наук (совместный проект СО РАН, УрО РАН и ДВО РАН № 1).

Основные результаты были получены при использовании оборудования Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. М. Ягупольский, *Ароматические и гетероциклические соединения с фтор-содержащими заместителями*, Наукова думка, Киев, 1988.
2. Г. Г. Фурин, *Фторсодержащие гетероциклические соединения: синтез и применение*, Наука, Новосибирск, 2001.
3. *Fluorinated Heterocycles*, A. Gakh, K. L. Kirk (Eds.), Oxford University Press, Washington, 2009.
4. *Fluorinated Heterocyclic Compounds: Synthesis, Chemistry, and Applications*, V. A. Petrov (Ed.), Wiley, Hoboken, 2009.
5. Э. В. Носова, Г. Н. Липунова, В. Н. Чарушин, О. Н. Чупахин, *Фторсодержащие азины и бензазины*, Изд-во УрО РАН, Екатеринбург, 2011.
6. М. Д. Машковский, *Лекарственные средства*, Новая волна, Москва, 2008.
7. В. Н. Чарушин, Э. В. Носова, Г. Н. Липунова, О. Н. Чупахин, *Фторхинолоны: синтез и применение*, Физматлит, Москва, 2013.
8. O. N. Churakhin, V. P. Krasnov, G. L. Levit, V. N. Charushin, M. A. Korolyova, E. V. Tsoi, H. S. Lee, J. H. Park, M. H. Kim, K. S. Kim, Jap. Pat. Appl. 10357910.
9. Б. А. Трофимов, А. И. Михалева, *N-Винилпирролы*, Наука, Новосибирск, 1984.
10. Б. А. Трофимов, А. И. Михалева, Е. Ю. Шмидт, Л. Н. Собенина, *Химия пиррола. Новые страницы*, под ред. Г. А. Толстикова, Наука, Новосибирск, 2012.
11. R. Scarpelli, A. Di Marco, F. Ferrigno, R. Laufer, I. Marcucci, E. Muraglia, J. M. Ontoria, M. Rowley, S. Serafini, C. Steinkühler, P. Jones, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **18**, 6078 (2008).
12. L. N. Sobenina, A. M. Vasil'tsov, O. V. Petrova, K. B. Petrushenko, I. A. Ushakov, G. Clavier, R. Meallet-Renault, A. I. Mikhaleva, B. A. Trofimov, *Org. Lett.*, **13**, 2524 (2011).
13. M. Abid, M. Savolainen, S. Landge, J. Hu, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, B. Török, *J. Fluorine Chem.*, **128**, 587 (2007).
14. M. Kalantari, M. R. Islami, Z. Hassani, K. Saidi, *ARKIVOC*, x, 55 (2006).
15. T. P. Wijesekera, *Can. J. Chem.*, **74**, 1868 (1996).
16. S. Choi, J. Bouffard, Y. Kim, *Chem. Sci.*, **5**, 751 (2014).
17. S. G. Awuah, S. K. Das, F. D'Souza, Y. You, *Chem. Asian J.*, **8**, 3123 (2013).
18. C. L. Sun, X. Li, Y. Zhu, Int. Pat. Appl. WO 2009139834; *Chem. Abstr.*, **151**, 1431104 (2009).
19. E. Tretyakov, G. Romanenko, A. Podoplelov, V. Ovcharenko, *Eur. J. Org. Chem.*, 2695 (2006).
20. Е. В. Третьяков, В. И. Овчаренко, *Успехи химии*, **78**, 1051 (2009). [*Russ. Chem. Rev.*, **78**, 971 (2009).]
21. *Stable Radicals: Fundamentals and Applied Aspects of Odd-Electron Compounds*, R. G. Hicks (Ed.), J. Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2010.
22. В. А. Книжников, Н. Е. Борисова, Н. Я. Юрашевич, Л. А. Попова, А. Ю. Чернядьев, З. П. Зубрейчук, М. Д. Решетова, *Журн. орган. химии*, **43**, 858 (2007). [*Russ. J. Org. Chem.*, **43**, 855 (2007).]
23. C. E. Loader, H. J. Anderson, *Synthesis*, 295 (1978).

¹Иркутский институт химии
им. А. Е. Фаворского СО РАН,
ул. Фаворского, 1, Иркутск 664033, Россия
e-mail: boris_trofimov@iriioch.irk.ru

Поступило 30.04.2014

²Институт "Международный томографический центр" СО РАН,
ул. Институтская, 3А, Новосибирск 630090, Россия
e-mail: itc@tomo.nsc.ru