

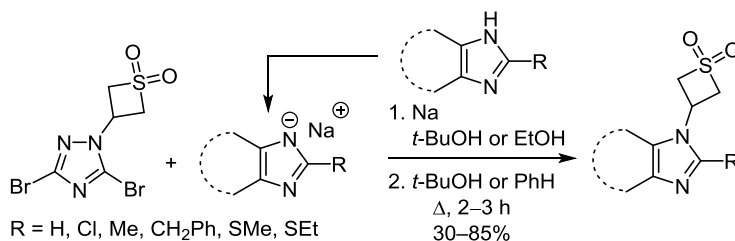
Диоксотетанилирование гетероциклов

2*. Имидазолы и бензимидазолы

Надежда Н. Макарова^{1*}, Елена Э. Клен¹, Феркат А. Халиуллин¹

¹ Башкирский государственный медицинский университет,
ул. Ленина, 3, Уфа 450008, Россия; e-mail: nnm16@yandex.ru

Поступило 25.01.2019
Принято после доработки 14.06.2019



Взаимодействием 3,5-дибром-1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-1,2,4-триазола с натриевыми солями имидазолов и бензимидазолов синтезированы 1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-имидазолы и 1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-бензимидазолы. Реакция протекает как присоединение азолов к генерируемому *in situ* 1,1-диоксиду тиета, выступающему в роли акцептора Михаэля. Показано влияние значений pK_a имидазолов и бензимидазолов на их реакционную способность.

Ключевые слова: бензимидазол, 1,1-диоксид тиетана, имидазол, 1,2,4-триазол, аза-реакция Михаэля, диоксотетанилирование.

Одним из распространенных способов синтеза соединений, содержащих 1,1-диоксотетрановый цикл, является окисление соответствующих тиетанов.² Данный способ требует предварительного введения в исходную молекулу тиетанового цикла и обладает рядом недостатков. Например, тиетанилирование соединений часто сопровождается образованием полимеров и приводит к небольшим выходам тиетанилпроизводных,³ а при окислении последних возможно образование побочных продуктов, что отрицательно влияет на чистоту и снижает выходы целевых 1,1-диоксидов тиетана.

Ранее нами был разработан новый способ синтеза 3-алкокси-⁴ и 3-арилокси-1,1-диоксидов тиетана⁵ и 3,5-дизамещенных 1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-1,2,4-триазолов,⁶ основанный на использовании 3,5-дибром-1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-1,2,4-триазола в качестве диоксотетанилирующего агента. В продолжение исследований изучены реакции этого 1,2,4-триазола с имидазолами и бензимидазолами, содержащими электроноакцепторные (Cl, Br, I, NO₂, CO₂Me, SO₂Me) и электронодонорные (Ph, Me, CH₂Ph, SAlk) заместители и значительно различающимися по нуклео-

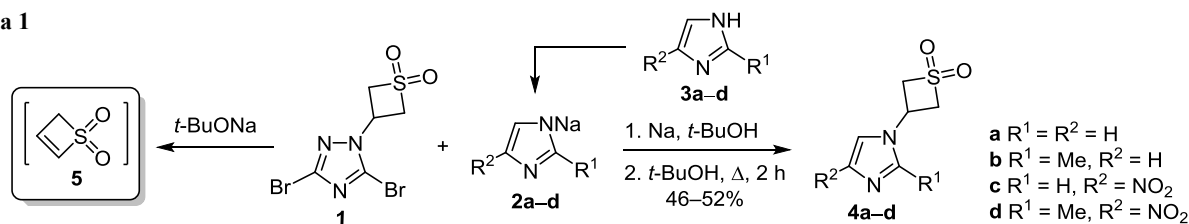
фильности и кислотности. Увеличение кислотности азола, образующего диоксотетанилирующий агент, и уменьшение его нуклеофильности способствует протеканию ретро-реакции Михаэля с образованием 1,1-диоксида тиета и 3,5-дибром-1H-1,2,4-триазола (pK_a 5.17).⁷

Реакция 3,5-дибром-1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-1,2,4-триазола (**1**) и замещенных имидазолов проводилась при кипячении натриевых солей имидазолов **2a–d**, полученных *in situ* из соответствующих имидазолов **3a–d**, в *t*-BuOH. Выбор *t*-BuOH в качестве растворителя обусловлен его низкой способностью конкурировать с нуклеофилами в качестве донора Михаэля вследствие стерических затруднений. В результате с умеренными выходами были выделены 1-(1,1-диоксотетрагидро-3-ил)-1H-имидазолы **4a–d**. Предполагаемый механизм реакции включает генерирование 1,1-диоксида тиета (**5**), который участвует в аза-реакции Михаэля (схема 1).

Установлено, что в реакцию вступают имидазолы, обладающие NH-кислотностью в диапазоне pK_a 9.30–15.1 (имидазол (**3a**) pK_a 14.4, 2-метилимидазол (**3b**) pK_a 15.1, 4(5)-нитроимидазол (**3c**) pK_a 9.30 и 2-метил-4(5)-нитроимидазол (**3d**) pK_a 9.75).⁷ Применение несимметричных 4(5)-нитро- и 2-метил-4(5)-нитроимидазолов **3c,d** может привести к образованию двух

* Сообщение 1 см.¹

Схема 1



изомеров (рис. 1). Спектры ^1H - ^{13}C HMBC и HSQC соединений **4c,d**, а также спектр ^1H - ^{15}N HMBC соединения **4c** свидетельствуют об образовании в исследуемой реакции только 4-нитроимидазолов **4c,d**, что согласуется с литературными данными.⁸

С помощью эксперимента ^1H - ^{15}N HMBC для соединения **4c** была установлена корреляция сигналов протонов Н-2,5 имидазольного цикла и протонов 2,4- CH_2 1,1-диоксидотиетанового цикла с сигналами атомов N-1,3 имидазола (рис. 1). Наиболее информативными являются кросс-пики Н-2/N-1, Н-2/N-3 и Н-5/N-1. Отсутствие в спектре кросс-пики Н-4/N-3 свидетельствует об образовании 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-4-нитро-1H-имидазола (**4c**). Согласно литературным данным,⁹ в спектрах ЯМР ^1H 1,4-дизамещенных имидазолов значение константы спин-спинового взаимодействия (KCCB) $J_{\text{H-2,H-5}}$ обычно составляет 1.1–1.5 Гц, а в спектрах 1,5-дизамещенных имидазолов значения $J_{\text{H-2,H-4}}$ находятся в диапазоне 0.9–1.0 Гц. Значения KCCB 1.4 и 1.5 Гц, полученные для протонов продукта взаимодействия 4(5)-нитроимидазола (**3c**) с 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазолом **1**, также подтверждают предложенную структуру соединения **4c**. Спектры ^1H - ^{13}C HMBC соединений **4c,d** показали корреляцию сигналов протонов Н-2,5 имидазольного цикла с сигналами атомов С-3 1,1-диоксидотиетанового и С-2,4 имидазольного циклов (рис. 2).

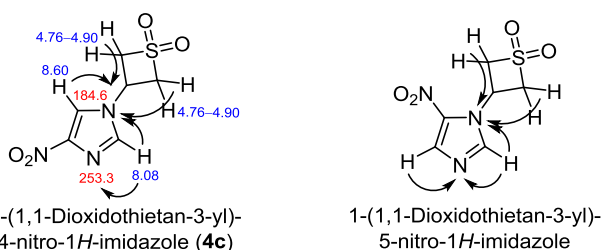


Рисунок 1. Основные корреляции в спектре ^1H - ^{15}N HMBC соединения **4c** и ожидаемые корреляции в структуре 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-5-нитро-1H-имидазола.

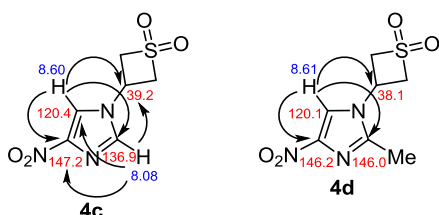
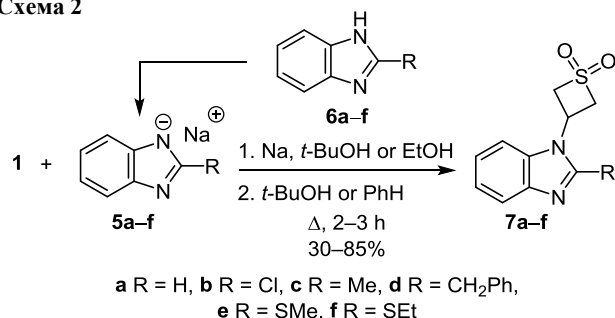


Рисунок 2. Основные корреляции в спектрах ^1H - ^{13}C HMBC соединений **4c,d**.

В случае 2,4,5-трибромимидазола (pK_a 6.9) и 2,4,5-триодимидазола (pK_a 8.0),¹⁰ обладающих высокой кислотностью и низкой нуклеофильностью, продукты *N*-диоксотетанилирования не образуются. Также в реакцию не удалось ввести имидазол-4,5-(диметил)дикарбоксилат (pK_a 9.26)¹¹ и 4,5-дифенилимидазол (pK_a 12.80).⁷ По-видимому, это объясняется стерическими препятствиями, вносимыми заместителями в положениях 4 и 5 имидазольного цикла.

Аналогичная реакция 3,5-дибром-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазола (**1**) и натриевых солей бензимидазолов **5a-f**, полученных *in situ* из соответствующих бензимидазолов **6a-f**, проводилась в *t*-BuOH (для соединений **7a,b,d,e**) или в PhH (для соединений **7c,f**) с образованием 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазолов **7a-f** с выходами 30–85% (схема 2).

Схема 2



Установлено, что в реакцию вступают бензимидазолы, обладающие NH-кислотностью в диапазоне pK_a 9.60–13.80 (бензимидазол (**6a**) pK_a 12.86, 2-хлорбензимидазол (**6b**) pK_a 9.60, 2-метилбензимидазол (**6c**) pK_a 13.18, 2-бензилбензимидазол (**6d**) pK_a 12.7, 2-(метилсульфанил)бензимидазол (**6e**) pK_a 11.8,⁷ 2-(этилсульфанил)бензимидазол (**6f**) pK_a 11.67¹¹). В случае 2-(метилсульфонил)бензимидазола (pK_a 6.59)¹¹ соответствующий продукт не удалось получить. Также в реакции не участвовали 2-изопропоксибензимидазол (pK_a 13.28) и 2-(*N*-бензиламино)бензимидазол (pK_a 15.44),¹¹ что объясняется, по-видимому, стерическими препятствиями, вносимыми заместителями в положении 2 бензимидазола.

В ИК спектрах соединений **4b-d** и **7b-f** присутствуют интенсивные полосы поглощения валентных колебаний связей S=O сульфониальной группы в интервалах 1313–1346 и 1134–1147 cm^{-1} , что подтверждает наличие 1,1-диоксидотиетанового цикла. Соединение **7b** не понижает температуры плавления пробы смешения с образцом, полученным по известной методике,¹²

а их ИК спектры полностью совпадают. В спектрах ЯМР ^1H соединений **4b–d** и **7b–f** наблюдаются сигналы протонов 2,4- CH_2 и 3- CH 1,1-диоксидотиетанового цикла в интервалах 4.47–5.04 и 5.12–5.85 м. д. соответственно, сигналы ароматических протонов в области слабого поля подтверждают наличие азольных циклов. Спектры ЯМР ^{13}C соединений **4b–d** и **7b–f** содержат сигналы атомов С-2,4 и С-3 1,1-диоксидотиетанового цикла в интервалах 70.2–72.0 и 35.1–39.2 м. д. соответственно.

Таким образом, разработан эффективный метод одностадийного синтеза 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-имидазолов и 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазолов на основе реакций 3,5-дибром-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазола с натриевыми солями имидазолов и бензимидазолов. Установлено, что в реакцию вступают имидазолы и бензимидазолы, обладающие NH-кислотностью в диапазонах pK_a 9.30–15.1 и 9.60–13.80 соответственно.

Экспериментальная часть

ИК спектры записаны на фурье-спектрометре Инфралом ФТ-02 в таблетках КВг. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C (500 и 125 МГц соответственно), ^1H - ^{13}C NMBC и HSQC (соединения **4c,d**) и ^1H - ^{15}N NMBC (соединение **4c**) зарегистрированы на спектрометре Bruker Avance 500 в $\text{DMSO-}d_6$. Внутренний стандарт – остаточные сигналы растворителя (2.50 м. д. для ядер ^1H , 39.5 м. д. для ядер ^{13}C) или ТМС (для соединения **4c**). Спектры ЯМР ^{13}C дополнительно записаны в режиме DEPT. Масс-спектры зарегистрированы на хромато-масс-спектрометре Agilent 5973A GC/MSD, серия 6890В, ионизация ЭУ (70 эВ), регистрация спектров в диапазоне массовых значений 15–600 Да со скоростью 2.5 скан/с. Программированный нагрев хроматографической колонки: начальная температура 80 °С, изотерма 2 мин, подъем температуры до 260 °С, скорость подъема 20 °С/мин, температура инжектора 250 °С. Элементный анализ выполнен на анализаторе Nekatech Euro3000. Температуры плавления определены на приборе Stuart SMP30. Контроль за ходом реакций и чистотой полученных соединений осуществлен методом ТСХ на пластинах Sorbfil П-А-УФ, проявление в парах иода и УФ свете.

3,5-Дибром-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазол (**1**) синтезирован по литературной методике.⁴ Синтез по предлагаемой методике и аналитические данные 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-имидазола (**4a**) и 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазола (**7a**) опубликованы ранее.¹³

Синтез 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-имидазолов **4b–d** и 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазолов **7b,d,e** (общая методика). К 30 мл *t*-BuOH добавляют 76 мг (3.3 ммоль) металлического натрия и кипятят до прекращения выделения пузырьков водорода. Затем добавляют 3 ммоль азота **3b–d** или **6b,d,e** и 0.99 г (3 ммоль) 3,5-дибром-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазола (**1**). Реакционную смесь кипятят в течение 2 ч (для соединений **4b–d**, **7d,e**) или 3 ч

(для соединения **7b**). Растворитель упаривают при пониженном давлении и к остатку добавляют 15 мл H_2O . Осадок отфильтровывают, сушат при 60 °С и перекристаллизовывают из подходящего растворителя.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-метил-1H-имидазол (4b). После упаривания растворителя остаток промывают 20 мл CHCl_3 . Выход 0.27 г (49%), белый порошок, т. пл. 188–190 °С (PhH–гексан, 1:5). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1430 (C=N, C=C), 1313 (S=O), 1225, 1144 (S=O). Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (*J*, Гц): 2.27 (3H, с, CH_3); 4.47–4.55 (2H, м) и 4.76–4.84 (2H, м, 2,4- CH_2); 5.12–5.20 (1H, м, 3-CH); 6.80 (1H, д, *J* = 1.0, H-4); 7.40 (1H, д, *J* = 1.1, H-5). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 13.4 (CH_3); 36.2 (CH); 72.0 (2 CH_2); 116.8 (C Ar); 127.6 (C Ar); 145.1 (C Ar). Найдено, %: С 45.09; Н 5.48; N 15.09. $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$. Вычислено, %: С 45.15; Н 5.41; N 15.04.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-4-нитро-1H-имидазол (4c). После отфильтровывания осадок промывают 15 мл Me_2CO . Выход 0.30 г (46%), белый порошок, т. пл. 235–237 °С (EtOH). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1549 (NO_2), 1495 (C=N, C=C), 1388, 1346 (S=O), 1224, 1146 (S=O). Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (*J*, Гц): 4.76–4.90 (4H, м, 2,4- CH_2); 5.34–5.41 (1H, м, 3-CH); 8.08 (1H, д, *J* = 1.4, H-2); 8.60 (1H, д, *J* = 1.5, H-5). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 39.2 (CH); 71.0 (2 CH_2); 120.4 (C-5); 136.9 (C-2); 147.2 (C-4). Найдено, %: С 33.23; Н 3.31; N 19.54. $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}_3\text{O}_4\text{S}$. Вычислено, %: С 33.18; Н 3.25; N 19.35.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-метил-4-нитро-1H-имидазол (4d). Выход 0.36 г (52%), белый порошок, т. пл. 188–190 °С (EtOH). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1533 (NO_2), 1495 (C=N, C=C), 1394, 1317 (S=O), 1222, 1147 (S=O). Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д.: 2.35 (3H, с, CH_3); 4.77–4.88 (4H, м, 2,4- CH_2); 5.22–5.29 (1H, м, 3-CH); 8.61 (1H, с, H-5). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 13.5 (CH_3); 38.1 (CH); 71.2 (2 CH_2); 120.1 (C-5); 146.0 (C-2); 146.2 (C-4). Найдено, %: С 36.26; Н 3.84; N 18.11. $\text{C}_7\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_4\text{S}$. Вычислено, %: С 36.36; Н 3.92; N 18.17.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-хлор-1H-бензимидазол (7b). Выход 0.45 г (58%), белый порошок, т. пл. 187–189 °С (*n*-BuOH). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1479 (C=N, C=C), 1327 (S=O), 1222, 1143 (S=O). Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (*J*, Гц): 4.84–5.04 (4H, м, 2,4- CH_2); 5.75–5.85 (1H, м, 3-CH); 7.27–7.43 (2H, м, H-5,6); 7.66 (1H, д, *J* = 8.0, H-7); 7.91 (1H, д, *J* = 8.2, H-4). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.: 36.0 (CH); 70.6 (2 CH_2); 111.6 (C Ar); 119.8 (C Ar); 123.5 (C Ar); 124.0 (C Ar); 133.6 (C Ar); 140.6 (C Ar); 141.8 (C Ar). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 258 [$\text{M}]^+$ (12), 256 [$\text{M}]^+$ (32), 180 (33), 178 (100). Найдено, %: С 46.70; Н 3.48; N 11.11. $\text{C}_{10}\text{H}_9\text{ClN}_2\text{O}_2\text{S}$. Вычислено, %: С 46.79; Н 3.53; N 10.91.

2-Бензил-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазол (7d). После отфильтровывания осадок промывают 20 мл *n*-BuOH. Выход 0.30 г (32%), белый порошок, т. пл. 195–197 °С (EtOH). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1458 (C=N, C=C), 1332 (S=O), 1213, 1134 (S=O). Спектр ЯМР ^1H , δ , м. д. (*J*, Гц): 4.31 (2H, с, CH_2Ph); 4.48–4.56 (2H, м) и 4.83–4.91 (2H, м, 2,4- CH_2); 5.67–5.76 (1H, м, 3-CH); 7.20–7.34 (7H, м, H-5,6, H Ph); 7.65 (1H, д, *J* = 7.9, H-7); 7.84 (1H, д, *J* = 8.0, H-4). Спектр ЯМР ^{13}C , δ , м. д.:

33.6 (C₆H₅Ph); 35.2 (CH); 70.2 (2CH₂); 111.4 (C Ar); 120.1 (C Ar); 122.6 (C Ar); 123.0 (C Ar); 127.2 (C Ph); 129.0 (2C Ph); 129.1 (2C Ph); 132.7 (C Ar); 137.1 (C Ph); 143.5 (C Ar); 154.8 (C Ar). Найдено, %: С 65.11; Н 5.23; N 8.91. C₁₇H₁₆N₂O₂S. Вычислено, %: С 65.36; Н 5.16; N 8.97.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-(метилсульфанил)-1H-бензимидазол (7e). Выход 0.66 г (82%), белый порошок, т. пл. 201–202 °С (*i*-BuOH). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1447 (C=N, C=C), 1323 (S=O), 1275, 1142 (S=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м. д. (*J*, Гц): 2.83 (3H, с, CH₃); 4.84–5.00 (4H, м, 2,4-CH₂); 5.52–5.62 (1H, м, 3-CH); 7.18–7.29 (2H, м, H-5,6); 7.60 (1H, д, *J* = 7.7, H-7); 7.82 (1H, д, *J* = 7.8, H-4). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м. д.: 15.4 (CH₃); 35.7 (CH); 70.3 (2CH₂); 110.9 (C Ar); 118.8 (C Ar); 122.5 (C Ar); 122.6 (C Ar); 134.5 (C Ar); 144.0 (C Ar); 153.4 (C Ar). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 268 [M]⁺ (100), 253 [M-CH₃]⁺ (18), 189 (99), 175 (50), 171 (52), 157 (50), 131 (34). Найдено, %: С 49.47; Н 4.50; N 10.32. C₁₁H₁₂N₂O₂S₂. Вычислено, %: С 49.23; Н 4.51; N 10.44.

Синтез 1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-бензимидазолов 7с, f (общая методика). К 20 мл абсолютного EtOH добавляют 76 мг (3.3 ммоль) металлического натрия и кипятят до прекращения выделения пузырьков водорода. Затем добавляют 3 ммоль бензимидазола **6с, f**, кипятят в течение 5 мин и растворитель упаривают при пониженном давлении до сухого остатка. К остатку добавляют 30 мл PhH и 0.99 г (3 ммоль) 3,5-дибром-1-(1,1-диоксидотиетан-3-ил)-1H-1,2,4-триазола (**1**). Реакционную смесь кипятят в течение 2 ч. Растворитель упаривают при пониженном давлении и к остатку добавляют 20 мл H₂O. Осадок отфильтровывают, сушат при 60 °С и перекристаллизовывают из EtOH.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-метил-1H-бензимидазол (7с). Выход 0.21 г (30%), белый порошок, т. пл. 227–228 °С. ИК спектр, ν , см⁻¹: 1466 (C=N, C=C), 1327 (S=O), 1229, 1135 (S=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м. д. (*J*, Гц): 2.59 (3H, с, CH₃); 4.75–5.00 (4H, м, 2,4-CH₂); 5.58–5.70 (1H, м, 3-CH); 7.15–7.30 (2H, м, H-5,6); 7.58 (1H, д, *J* = 7.8, H-7); 7.80 (1H, д, *J* = 7.9, H-4). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м. д.: 14.7 (CH₃); 35.1 (CH); 70.3 (2CH₂); 111.0 (C Ar); 120.0 (C Ar); 122.3 (C Ar); 122.6 (C Ar); 132.9 (C Ar); 143.4 (C Ar); 153.0 (C Ar). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 236 [M]⁺ (36), 158 (100), 157 (27). Найдено, %: С 55.98; Н 5.01; N 11.73. C₁₁H₁₂N₂O₂S. Вычислено, %: С 55.92; Н 5.12; N 11.86.

1-(1,1-Диоксидотиетан-3-ил)-2-(этилсульфанил)-1H-бензимидазол (7f). Выход 0.72 г (85%), белый порошок, т. пл. 134–135 °С. ИК спектр, ν , см⁻¹: 1450

(C=N, C=C), 1319 (S=O), 1276, 1143 (S=O). Спектр ЯМР ¹H, δ , м. д. (*J*, Гц): 1.38 (3H, т, *J* = 7.3, SCH₂CH₃); 3.32 (2H, к, *J* = 7.3, SCH₂CH₃); 4.84–4.99 (4H, м, 2,4-CH₂); 5.54–5.62 (1H, м, 3-CH); 7.19–7.27 (2H, м, H-5,6); 7.61 (1H, д, *J* = 7.8, H-7); 7.83 (1H, д, *J* = 7.7, H-4). Спектр ЯМР ¹³C, δ , м. д.: 15.3 (SCH₂CH₃); 27.3 (SCH₂CH₃); 35.6 (CH); 70.3 (2CH₂); 111.0 (C Ar); 118.9 (C Ar); 122.6 (2C Ar); 134.2 (C Ar); 144.0 (C Ar); 152.4 (C Ar). Найдено, %: С 51.11; Н 4.92; N 9.98. C₁₂H₁₄N₂O₂S₂. Вычислено, %: С 51.04; Н 5.00; N 9.92.

Файл сопроводительных материалов, содержащий спектры ЯМР ¹H и ¹³C соединений **4b–d** и **7b–f**, двумерные спектры ¹H–¹³C HMBC и HSQC соединений **4c, d** и спектр ¹H–¹⁵N HMBC соединения **4c**, а также масс-спектры соединений **7b, c, e**, доступен на сайте журнала <http://hgs.osi.lv>.

Список литературы

- Klen, E. E.; Makarova, N. N.; Khaliullin, F. A. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2013**, *48*, 1473. [Химия гетероцикл. соединений **2012**, 1583.]
- Block, E. In *Comprehensive Heterocyclic Chemistry*; Katritzky, A. R.; Rees, C. W., Eds.; Elsevier: New York, 1984, vol. 7, p. 403.
- Химия тиранов*; Фокин, А. В.; Коломиец, А. Ф., Ред.; Наука: Москва, 1978, с. 196.
- Klen, E. E.; Khaliullin, F. A.; Makarova, N. N. *Russ. J. Org. Chem.* **2008**, *44*, 1708. [Журн. орган. химии **2008**, *44*, 1729.]
- Klen, E. E.; Nikitina, I. L.; Makarova, N. N.; Miftakhova, A. F.; Ivanova, O. A.; Khaliullin, F. A.; Alekhin, E. K. *Pharm. Chem. J.* **2017**, *50*, 642. [Хим.-фарм. журн. **2016**, *50*(10), 15.]
- Klen, E. E.; Makarova, N. N.; Khaliullin, F. A. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2013**, *48*, 1473. [Химия гетероцикл. соединений **2012**, 1583.]
- Catalan, J.; Abboud, J. L. M.; Elguero, J. In *Advances in Heterocyclic Chemistry*; Katritzky, A. R., Ed.; Elsevier: New York, 1987, vol. 41, p. 187.
- Chertkov, V. A.; Shestakova, A. K.; Davydov, D. V. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2011**, *47*, 45. [Химия гетероцикл. соединений **2011**, 63.]
- Matthews, H. R.; Rapoport, H. *J. Am. Chem. Soc.* **1973**, *95*, 2297.
- Lombardino, J. G. *J. Heterocycl. Chem.* **1973**, *10*, 697.
- ACD/Structure Elucidator, Version 2018.1*; Advanced Chemistry Development, Inc.: Toronto, 2019.
- Khaliullin, F. A.; Kataev, V. A.; Zaks, A. S.; Terekhova, N. M.; Strokin, Yu. V. *Pharm. Chem. J.* **1993**, *27*, 192. [Хим.-фарм. журн. **1993**, *27*(3), 25.]
- Klen, E. E.; Makarova, N. N.; Khaliullin, F. A. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2011**, *47*, 519. [Химия гетероцикл. соединений **2011**, 625.]