

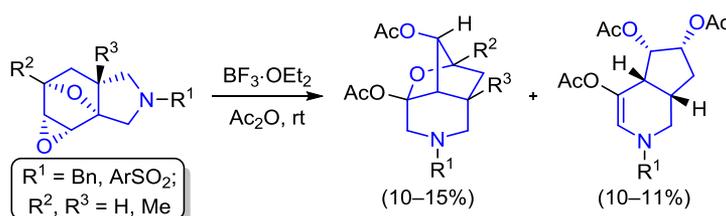
Перегруппировка Вагнера–Меервейна в ряду 2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндолов

Владимир П. Зайцев^{1*}, Фёдор И. Зубков¹, Марьяна А. Надирова¹, Дмитрий Ф. Мерцалов¹,
Евгения В. Никитина¹, Роман А. Новиков², Алексей В. Варламов¹

¹ Российский университет дружбы народов,
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва 117198, Россия; e-mail: vzaitsev@sci.pfu.edu.ru

² Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН,
ул. Вавилова, 32, Москва 119991, Россия; e-mail: novikovfff@bk.ru

Поступило 10.08.2016
Принято 24.08.2016



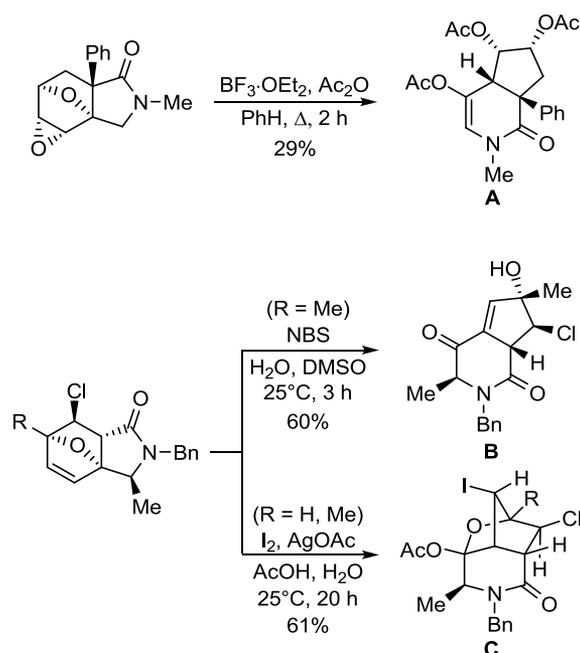
Изучена каталитическая катионная скелетная перегруппировка Вагнера–Меервейна в ряду октагидро-2,6а-эпоксиксирено[е]-изоиндолов. Показано, что под действием эфира трифтористого бора в среде уксусного ангидрида реакция протекает неоднозначно: целевые 4,5-бис(ацетокси)-4,6-эпоксиклопента[с]пиридины, так же как и продукты их дальнейшего расщепления – циклопента[с]пиридины, были выделены из реакционной смеси с выходами 10–15% в виде единственных диастереоизомеров.

Ключевые слова: изоиндол, 2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндолы, 4,6-эпоксиклопента[с]пиридины, внутримолекулярная реакция Дильса–Альдера, перегруппировка Вагнера–Меервейна.

Перегруппировка Вагнера–Меервейна была открыта в 1899 г. Е. Е. Вагнером при дегидратации бициклических терпенов и подробно исследована в 1920–1930 гг. Меервейном.^{1,2} [1,2]-Сигматропный сдвиг алкильного или арильного фрагмента привлекает внимание синтетиков благодаря возможности в одну стадию проводить сложную трансформацию углеродного скелета молекулы, что позволяет из относительно простых исходных соединений получать продукты, практически недоступные иными путями.^{3–7} В настоящее время перегруппировка Вагнера–Меервейна используется не только в ряду терпенов, но и в других классах органических соединений, например азотсодержащих гетероциклах.^{8–11}

Впервые скелетная перегруппировка Вагнера–Меервейна в ряду гидрированных изоиндолов была продемонстрирована в 1976 г. на единичном примере синтеза циклопента[с]пиридина **A** (схема 1)⁸. В дальнейшем Юнгу с коллегами удалось осуществить аналогичное превращение в условиях реакции Вудворда (I_2 , AcOAg , AcOH) и под действием *N*-бромсукцинимид⁹ (схема 1). Было показано, что в зависимости от условий генерации карбокатиона

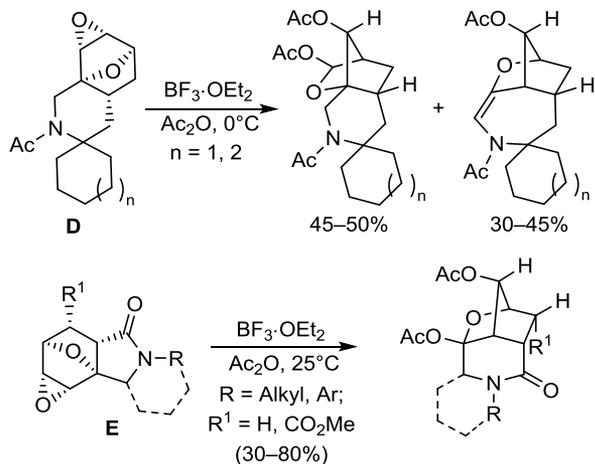
Схема 1



перегруппировка может приводить как к конденсированному пиридину **B**, так и к трициклам **C**. Похожие превращения в условиях реакции Вудворда описаны в работе.¹¹

Наша научная группа систематически занимается исследованием механизма и синтетических аспектов перегруппировки Вагнера–Меервейна в ряду мостиковых азотсодержащих гетероциклов. В частности, ранее нами были описаны перегруппировки диэпоксидоизохинолинов **D** и диэпоксидоизоиндолов **E**, аннелированных с другими циклами (схема 2).^{12–18}

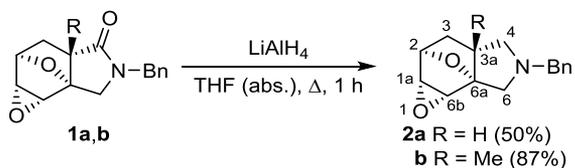
Схема 2



Цитированные данные не позволяют надежно предсказать направление перегруппировки в зависимости от строения субстрата и условий протекания реакции. Настоящая работа направлена на дальнейшее накопление экспериментальных данных и установление закономерностей протекания перегруппировки Вагнера–Меервейна в ряду бициклических азогетероциклов.

Объектами настоящей исследования послужили октагидро-2,6а-эпоксидоксирено[е]изоиндолы, полученные из легкодоступных 2-бензил-3а,6-эпоксидоизоиндол-1-онов и 2-арилсульфонил-3а,6-эпоксидоизоиндолов (схемы 3 и 4). В первой части работы нами было осуществлено восстановление описанных ранее^{19,20} 2-бензилгексагидро-2,6а-эпоксидоксирено[е]изоиндол-4(2H)-онов **1a,b** избытком алюмогидрида лития в кипящем ТГФ (схема 3).

Схема 3

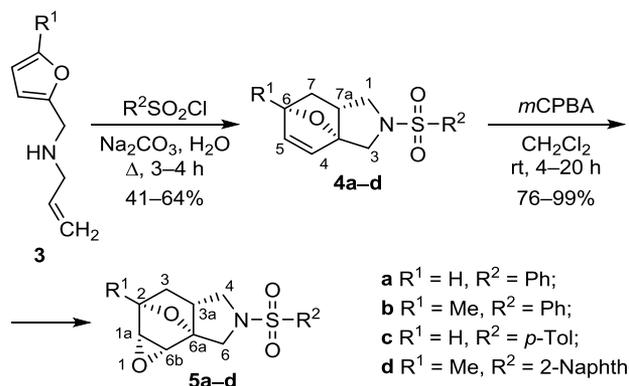


В выбранных условиях лактамный фрагмент пирролидинового цикла **1a,b** восстанавливается хемоселективно. Оксирановый цикл молекулы сохраняется, о чем свидетельствуют значения КССВ протонов 1а-СН, 6b-СН и 2-СН ($J_{1a,6b} = 3.2$ и $J_{1a,2} = 0$ Гц) и появление в спектрах ЯМР ¹Н сигналов протонов

4-СН_AН_B ($J_{4A,4B} = 8.2$, $J_{4A,3a} = 7.3$ и $J_{4B,3a} = 9.6$ Гц для соединения **2a**, $J_{4A,4B} = 8.2$ Гц для соединения **2b**).

Взаимодействием аллилфурфуриламинов **3** с арилсульфохлоридами были синтезированы 2-арилсульфонил-3а,6-эпоксидоизоиндолы **4a–d** с умеренными выходами (схема 4). Эпоксидирование кратной связи оксабицикло[2.2.1]гептенового фрагмента соединений **4a–d** осуществлялось по Прилежаеву (mCPBA, CH₂Cl₂) при комнатной температуре. Ориентация оксиранового цикла относительно 7-оксабициклогептанового фрагмента и, следовательно, *цис*-расположение обоих кислородных мостиков в молекулах **5a–d** однозначно следуют из значений КССВ протонов 1а-СН, 6b-СН и 2-СН ($J_{1a,6b} = 3.3–3.4$ и $J_{1a,2} = 0$ Гц).

Схема 4



В заключительной части работы изучены превращения диэпоксидов **2a,b** и **5a–d** под действием эфира трёхфтористого бора в уксусном ангидриде (схема 5, таблица 1). Реакция протекает в мягких

Схема 5

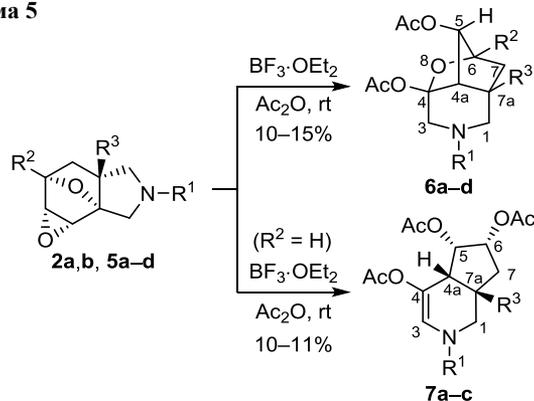


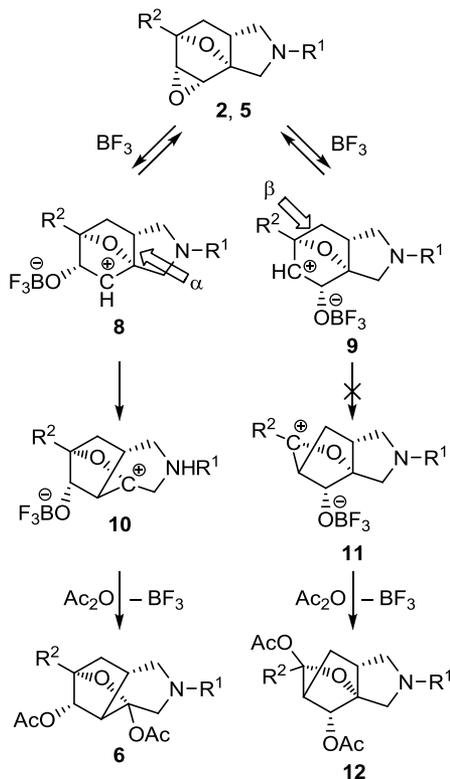
Таблица 1. Выходы продуктов перегруппировки **6a–d** и **7a–c**

Диэпоксид	R ¹	R ²	R ³	Продукт (выход, %)	
				6	7
2a	Bn	H	H	6a (15)	–
2b	Bn	H	Me	6b (11)	7a (10)
5a	PhSO ₂	H	H	–	7b (11)
5b	PhSO ₂	Me	H	6c (12)	–
5c	Ts	H	H	–	7c (11)
5d	2-NaphthSO ₂	Me	H	6d (10)	–

условиях (в течение получаса при комнатной температуре), однако неселективно. Продукты сигматропной перегруппировки – эпоксициклопента[с]пиридины **6a–d**, а также циклопента[с]пиридины **7a–c** выделены с низкими выходами из многокомпонентных смесей.

Теоретически превращения диэпоксидов **2a,b** и **5a–d** могут протекать по двум путям (схема 6). Предположительно, первоначальная координация $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$ (или ацетильного катиона) по оксиановому атому кислорода приводит к раскрытию эпоксидного фрагмента. При этом возможно образование двух альтернативных карбокатионов **8** и **9**. Дальнейшая миграция соседней по отношению к катионному центру σ -связи (α или β) в последних генерирует более устойчивые третичные мезомерно-стабилизированные катионы **10** и **11** (вторичные в случае $\text{R}^2 = \text{H}$). Завершается перегруппировка Вагнера–Меервейна присоединением ацетат-аниона к карбокатионным центрам. Таким образом, в результате скелетной перегруппировки возможно образование двух трициклических продуктов **6** и **12**.

Схема 6



Экспериментально установлено, что сигматропная перегруппировка диэпоксидов **2a,b** и **5a–d** идет региоспецифично с миграцией σ -связи (α) через промежуточные катионы **8** и **10**; вследствие этого единственными выделяемыми продуктами являются эпоксициклопента[с]пиридины **6a–d**. Отсутствие альтернативных продуктов типа **12** можно объяснить, во-первых, уменьшением байеровского напряжения системы при протекании перегруппировки (сочленение двух пятичленных и шестичленного цикла в циклопентапиридинах **6** предпочтительнее набора из трех

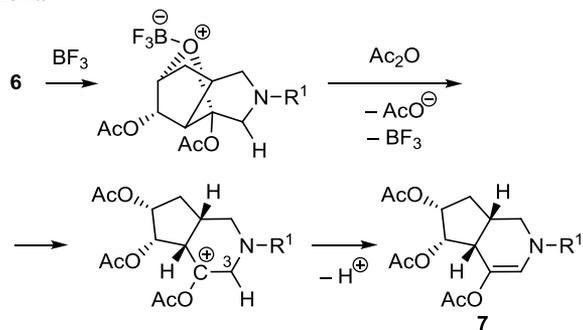
пятичленных циклов в трициклах **12**). Во-вторых, в катионе **9** миграция соседней σ -связи (β) должна происходить труднее, чем в катионе **8**, так как в катионе **8** мигрирующая связь (α) входит дополнительно в состав пирролидинового цикла, а, следовательно, является более напряженной (менее прочной) по сравнению с альтернативной связью (β) катиона **9**.

Строение продуктов перегруппировки **6a–d** установлено по аналогии с работами.^{13–18} К наиболее характеристичным сигналам гидрированных циклопентапиридинов **6a–d** в спектрах ЯМР ^1H можно отнести синглетный сигнал протона 5-CH в вершине углеродного мостика при 4.50–4.69 м. д. (для соединений **6a,c,d**), а также дублет-дублетные протоны 4a-CH с КССВ $J_{5,4a} = 1.2\text{--}1.9$ и $J_{4a,7a} = 3.8\text{--}5.6$ Гц в области 2.90–3.13 м. д. В углеродных спектрах наиболее хорошо идентифицируются сигналы четвертичных атомов углерода C-4 при 105.5–106.9 м. д., а также атомов углеродов C-5 и C-6 при 77.2–87.6 м. д., находящихся по соседству с гетероатомом.

Стоит отметить, что в случае диэпоксида **2b** наряду с целевым эпоксициклопента[с]пиридином **6b** образуется также циклопента[с]пиридин **7a** (схема 5) – продукт дальнейшего расщепления тетрагидрофуранового цикла молекулы **6b**. Аналогично ведут себя и незамещенные *N*-сульфарилдиэпоксизоиндолы **5a,c** (табл. 1). Выходы соединений **7b,c** после колоночной хроматографии не превышали 11%.

Химизм процесса, вероятно, включает раскрытие эпоксидного мостика в соединениях **6** и последующее элиминирование протона из положения 3 (схема 7). Строение циклопента[с]пиридинов **7a–c** доказано совокупностью спектральных данных, а также по аналогии с данными работы⁸ на основании близости химических сдвигов и КССВ для однотипных протонов. В связи с малой информативностью спектра ЯМР ^1H , описанного в работе,⁸ стереохимическое строение соединения **7b** однозначно установлено на основе двумерных экспериментов ЯМР: COSY, NOESY, HSQC и HMBC. Наиболее информативными для соединений **7b,c** оказались сигнал протона 3-CH в районе 6.89–6.91 м. д., триплетный и дублет-триплетный сигналы протонов 5-CH и 6-CH (в отличие от соединений **6a–d**) при 5.31 и 5.02 м. д. соответственно. В спектрах ЯМР ^{13}C сигналы атомов углерода C-5 и C-6 находятся при 72.5 и 71.9 м. д.

Схема 7



Таким образом, в работе показано, что каталитическая катионная сигматропная перегруппировка Вагнера–Меервейна в ряду 2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндолов протекает сложно, приводя к смеси октагидро-4Н-4,6-эпоксидциклопента[с]пиридинов и гексагидро-1Н-циклопента[с]пиридинов с невысокими выходами.

Экспериментальная часть

ИК спектры записаны на фурье-спектрометре Инфралом ФТ-801 в таблетках КВг. Спектры ЯМР ^1H зарегистрированы на приборе Bruker AMX-400 (400 МГц) или JEOL JNM-ECA 600 (600 МГц) в CDCl_3 , внутренний стандарт в протонных спектрах ТМС. Спектры ЯМР ^{13}C записаны на спектрометре Bruker Avance 600 (150 МГц) или Bruker AMX-400 (100 МГц) в CDCl_3 , в качестве внутреннего стандарта использована центральная компонента сигнала растворителя CDCl_3 (δ 77.4 м. д.). Масс-спектры записаны на хромато-масс-спектрометре Thermo DSQ II – Focus GC (ионизация ЭУ, 70 эВ, температура в источнике 200 °С, газ носитель – гелий, колонка RTX-5MS). Элементный анализ проводился на CHNS-анализаторе EuroVectorEA 3000. Температуры плавления синтезированных соединений определены в открытых стеклянных капиллярах на приборах Stuart SMP 10 или SMP 30 (не корректировались). Для ТСХ использованы пластины Sorbfil ПТСХ-АФ-А-УФ-254, проявление в парах иода или в растворе KMnO_4 . Реактивы фирмы Acros Organics и Alfa Aesar применены без дополнительной очистки, растворители перед синтезом перегнаны. Соотношение продуктов в смеси (для соединений **6b** и **7a**) определено по спектрам ЯМР ^1H как соотношение интегральных интенсивностей сигналов однотипных протонов и по спектрам ГХМС как отношение площадей хроматографических пиков.

Синтез 5-бензилктагидро-2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндолов 2a,b (общая методика). К раствору 1.9 ммоль соответствующего эпоксиоксиреноизоиндолона **1a,b**²⁰ в 10 мл абс. ТГФ добавляют 0.27 г (7.1 ммоль) LiAlH_4 . Кипятят 1 ч (контроль ТСХ), реакционную смесь охлаждают, избыток LiAlH_4 разлагают 10 мл EtOAc , выливают в 50 мл воды, образующийся осадок отфильтровывают. Фильтрат экстрагируют EtOAc (3 × 20 мл), органический экстракт осушают безводным MgSO_4 . После упаривания экстракта и перекристаллизации остатка из смеси гексан– EtOAc (для продукта **2a**) или колоночной хроматографии (для продукта **2b** SiO_2 , 1.8 × 28 см, элюент: гексан → смесь гексан– EtOAc , 10:1) получают соответствующие эпоксиоксиреноизоиндолы **2a,b**.

(1aRS,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-5-Бензилктагидро-2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндол (2a). Выход 0.23 г (50%), бесцветные иглы, т. пл. 97–98 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1146, 864 (C–O–C). Спектр ЯМР ^1H (400 МГц), δ , м. д. (J , Гц): 1.62 (1H, д, д, $J = 12.4$, $J = 8.2$) и 1.71 (1H, д, т, $J = 12.4$, $J = 4.8$, 3- CH_2); 2.19 (1H, д, д, $J = 8.2$, $J = 9.6$) и 3.02 (1H, д, д, $J = 8.2$, $J = 7.3$, 4- CH_2); 2.27–2.34 (1H, м, 3а-CH); 2.75 (1H, д, $J = 11.9$) и 3.47 (1H, д, $J = 11.9$, 6- CH_2); 3.34 (1H, д, $J = 3.2$) и 3.40 (1H, д,

$J = 3.2$, 1а,6b-CH); 3.74 (2H, с, NCH_2); 4.56 (1H, д, $J = 4.8$, 2-CH); 7.26–7.34 (5H, м, H Ph). Спектр ЯМР ^{13}C (100 МГц), δ , м. д.: 32.0 (C-3); 46.1, 50.4, 50.6, 53.5, 57.4, 60.1 (C-1а,3а,4,6,6b, NCH_2); 76.7 (C-2); 91.8 (C-6а); 127.2, 128.4, 128.8, 138.3 (C Ph). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 243 [$\text{M}]^+$ (22), 152 (24), 91 (100), 81 (10), 65 (24), 39 (23). Найдено, %: C 74.24; H 7.15; N 5.62. $\text{C}_{15}\text{H}_{17}\text{NO}_2$. Вычислено, %: C 74.05; H 7.04; N 5.76.

(1aRS,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-5-Бензил-3а-метилктагидро-2,6а-эпоксиксирено[е]изоиндол (2b). Выход 0.42 г (87%), вязкое желтое масло. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1155, 865 (C–O–C). Спектр ЯМР ^1H (400 МГц), δ , м. д. (J , Гц): 1.26 (1H, д, $J = 12.4$) и 1.98 (1H, д, д, $J = 12.4$, $J = 5.0$, 3- CH_2); 1.29 (3H, с, CH_3); 2.54 (1H, д, $J = 8.2$) и 2.71 (1H, д, $J = 8.2$, 4- CH_2); 2.79 (1H, д, $J = 11.9$) и 3.49 (1H, д, $J = 11.9$, 6- CH_2); 3.41 (1H, д, $J = 3.2$) и 3.48 (1H, д, $J = 3.2$, 1а,6b-CH); 3.78 (2H, с, NCH_2); 4.52 (1H, д, $J = 5.0$, 2-CH); 7.27–7.38 (5H, м, H Ph). Спектр ЯМР ^{13}C (100 МГц), δ , м. д.: 19.9 (CH_3); 39.6 (C-3); 49.5, 49.9, 52.7, 53.0, 60.1, 64.8 (C-1а,3а,4,6,6b, NCH_2); 76.5 (C-2); 91.9 (C-6а); 126.9, 128.3, 128.5, 139.6 (C Ph). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 257 [$\text{M}]^+$ (5), 123 (5), 91 (100), 77 (5), 65 (18), 41 (12), 39 (13). Найдено, %: C 74.79; H 7.56; N 5.37. $\text{C}_{16}\text{H}_{19}\text{NO}_2$. Вычислено, %: C 74.68; H 7.44; N 5.44.

Получение 2-(арилсульфонил)-3а,6-эпоксиизоиндолов 4a–d (общая методика). К эмульсии 33 ммоль *N*-фурфурил-*N*-аллиламина **3** в 50 мл воды добавляют 4.24 г (40 ммоль) Na_2CO_3 и 40 ммоль соответствующего арилсульфохлорида, полученную реакционную смесь кипятят 3–4 ч (контроль ТСХ), экстрагируют EtOAc (3 × 50 мл). Органический экстракт осушают безв. MgSO_4 , растворитель отгоняют при пониженном давлении, остаток перекристаллизовывают из смеси гексан– EtOAc . Эпоксиизоиндолы **4a,c** получены ранее, их физико-химические характеристики и спектральные данные совпадают с описанными в работах^{21,22}.

(3aRS,6RS,7aRS)-2-(Фенилсульфонил)-1,2,3,6,7,7а-гексагидро-3а,6-эпоксиизоиндол (4a). Выход 4.84 г (53 %), бесцветные иглы, т. пл. 122–123 °С (т. пл. 122–123 °С²¹).

(3aRS,6RS,7aRS)-6-Метил-2-(фенилсульфонил)-1,2,3,6,7,7а-гексагидро-3а,6-эпоксиизоиндол (4b). Выход 3.98 г (41%), бесцветные пластинки, т. пл. 162–163 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1335 (SO_2 ν as), 1170 (SO_2 ν s). Спектр ЯМР ^1H (600 МГц), δ , м. д. (J , Гц): 1.33 (1H, д, д, $J = 11.7$, $J = 2.9$) и 1.45 (1H, д, д, $J = 11.7$, $J = 7.3$, 7- CH_2); 1.49 (3H, с, CH_3); 2.10–2.15 (1H, м, 7а-CH); 2.75 (1H, д, д, $J = 9.2$, $J = 9.9$) и 3.89 (1H, д, д, $J = 8.1$, $J = 9.2$, 1- CH_2); 3.49 (1H, д, $J = 12.1$) и 3.88 (1H, д, $J = 12.1$, 3- CH_2); 6.14 (1H, д, $J = 5.5$) и 6.29 (1H, д, $J = 5.5$, 4,5-CH); 7.50 (2H, т, $J = 8.1$, H-3,5 Ph); 7.57 (1H, т, $J = 8.1$, H-4 Ph); 7.81 (2H, д, д, $J = 8.1$, $J = 1.1$, H-2,6 Ph). Спектр ЯМР ^{13}C (100 МГц), δ , м. д.: 18.9 (CH_3); 36.7, 46.0, 49.5, 53.3 (C-1,3,7,7а); 88.3, 94.7 (C-3а,6); 127.3, 129.0, 132.6, 134.5, 137.1, 140.4 (C-4,5, C Ph). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 291 [$\text{M}]^+$ (2), 150 (37), 122 (29), 106 (13), 95 (100), 77 (50), 51 (18), 41 (24). Найдено, %: C 62.00; H 5.71; N 4.69; S 10.91. $\text{C}_{15}\text{H}_{17}\text{NO}_3\text{S}$. Вычислено, %: C 61.83; H 5.88; N 4.81; S 11.01.

(3aRS,6RS,7aRS)-2-[(4-Метилфенил)сульфонил]-1,2,3,6,7,7a-гексагидро-3a,6-эпоксизоиндол (4c). Выход 6.15 г (64%), бесцветные ромбы, т. пл. 119–120 °С (т. пл. 115–116 °С (EtOH)²²).

(3aRS,6RS,7aRS)-6-Метил-2-(2-нафтилсульфонил)-1,2,3,6,7,7a-гексагидро-3a,6-эпоксизоиндол (4d). Выход 6.19 г (55%), бежевые иглы, т. пл. 157–158 °С. ИК спектр, ν , см⁻¹: 1335 (SO₂ ν as), 1165 (SO₂ ν s). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.33 (1H, д, *J* = 3.3, *J* = 11.6) и 1.45 (1H, д, *J* = 7.4, *J* = 11.6, 7-CH₂); 1.48 (3H, с, CH₃); 2.15–2.19 (1H, м, 7a-CH); 2.84 (1H, т, *J* = 9.5) и 3.98 (1H, д, *J* = 7.4, *J* = 9.5, 1-CH₂); 3.59 (1H, д, *J* = 11.9) и 3.96 (1H, д, *J* = 11.9, 3-CH₂); 6.15 (1H, д, *J* = 5.8) и 6.30 (1H, д, *J* = 5.8, 4,5-CH); 7.60–7.66 (2H, м, H Naphth); 7.83 (1H, д, *J* = 1.6, *J* = 9.1, H-3 Naphth); 7.91 (1H, д, *J* = 8.3, H Naphth); 7.96–7.99 (2H, м, H Naphth); 8.41 (1H, д, *J* = 1.6, H-1 Naphth). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 19.0 (CH₃); 36.7, 46.2, 49.6, 53.5 (C-1,3,7,7a); 88.4, 94.8 (C-3a,6); 122.8, 127.4, 127.9, 128.6 (2C), 129.2, 129.3, 132.3, 134.4, 134.6, 134.9, 140.4 (C-4,5, C Naphth). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 341 [M]⁺ (1), 150 (69), 127 (50), 122 (35), 106 (13), 95 (100), 67 (10), 43 (19), 41 (24). Найдено, %: С 66.99; Н 5.73; N 3.92; S 9.45. C₁₉H₁₉NO₃S. Вычислено, %: С 66.84; Н 5.61; N 4.10; S 9.39.

Получение 5-арилсульфонил-октагидро-2,6a-эпоксирено[е]изоиндолов 5a–d (общая методика). Раствор 3.4 ммоль 2-арилсульфонил-3a,6-эпоксизоиндола **4a–d** и 1.8 г (0.01 моль) МСРВА в 30 мл CH₂Cl₂ перемешивают в течение 4–20 ч (контроль ТСХ). Затем реакционную смесь выливают в 50 мл воды, нейтрализуют 10% водным раствором Na₂CO₃, органический слой отделяют, водный слой экстрагируют CH₂Cl₂ (3 × 30 мл), органические фракции объединяют и сушат над безводным MgSO₄. После упаривания растворителя получают диэпоксиды **5a–d** в виде бесцветных кристаллов.

(1aRS,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-5-(Фенилсульфонил)-октагидро-2,6a-эпоксирено[е]изоиндол (5a). Выход 0.79 г (99%), бесцветные пластинки, т. пл. 141–143 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1331 (SO₂ ν as), 1161 (SO₂ ν s), 874 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.60–1.61 (2H, м, 3-CH₂); 2.30–2.34 (1H, м, 3a-CH); 2.62 (1H, т, *J* = 9.3) и 3.75 (1H, д, *J* = 8.4, *J* = 9.3, 4-CH₂); 3.31 (1H, д, *J* = 3.3) и 3.33 (1H, д, *J* = 3.3, 1a,6b-CH); 3.51 (1H, д, *J* = 12.3) и 3.85 (1H, д, *J* = 12.3, 6-CH₂); 4.46 (1H, уш. т, *J* = 2.2, 2-CH); 7.51 (2H, д, *J* = 7.3, *J* = 8.1, H-3,5 Ph); 7.58 (1H, т, *J* = 7.3, H-4 Ph); 7.80 (2H, д, *J* = 8.1, *J* = 1.1, H-2,6 Ph). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 32.9 (3-CH₂); 45.3, 48.3, 49.6, 50.3, 52.3 (C-1a,3a,4,6,6b); 76.8 (C-2); 90.6 (C-6a); 127.5, 129.3, 133.1, 133.8 (C Ph). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 293 [M]⁺ (3), 141 (10), 106 (12), 95 (16), 81 (17), 77 (100), 67 (16), 51 (43), 41 (58). Найдено, %: С 57.47; Н 5.03; N 4.78; S 11.02. C₁₄H₁₅NO₄S. Вычислено, %: С 57.32; Н 5.15; N 4.77; S 10.93.

(1aSR,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-2-Метил-5-(фенилсульфонил)-октагидро-2,6a-эпоксирено[е]изоиндол (5b). Выход 0.99 г (76%), бесцветные сростки, т. пл. 149–150 °С

(гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1336 (SO₂ ν as), 1165 (SO₂ ν s), 865 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.33 (1H, д, *J* = 12.5, *J* = 3.3) и 1.68 (1H, д, *J* = 12.5, *J* = 8.1, 3-CH₂); 1.41 (3H, с, CH₃); 2.33–2.37 (1H, м, 3a-CH); 2.68 (1H, т, *J* = 9.5) и 3.78 (1H, д, *J* = 8.4, *J* = 9.5, 4-CH₂); 3.18 (1H, д, *J* = 3.3) и 3.38 (1H, д, *J* = 3.3, 1a,6b-CH); 3.52 (1H, д, *J* = 12.1) и 3.82 (1H, д, *J* = 12.1, 6-CH₂); 7.53 (2H, т, *J* = 7.3, H-3,5 Ph); 7.60 (1H, т, *J* = 7.3, H-4 Ph); 7.80 (2H, д, *J* = 7.3, *J* = 1.1, H-2,6 Ph). Спектр ЯМР ¹³C (150 МГц), δ , м. д.: 16.6 (CH₃); 38.9 (C-3); 46.8, 48.5, 51.1, 52.3, 52.8 (C-1a,3a,4,6,6b); 84.4, 90.6 (C-2,6a); 127.4, 129.1, 132.8, 136.5 (C Ph). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 307 [M]⁺ (3), 166 (15), 141 (14), 120 (12), 108 (13), 77 (100), 51 (47). Найдено, %: С 58.79; Н 5.71; N 4.72; S 10.32. C₁₅H₁₇NO₄S. Вычислено, %: С 58.61; Н 5.57; N 4.56; S 10.43.

(1aRS,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-5-[(4-Метилфенил)сульфонил]октагидро-2,6a-эпоксирено[е]изоиндол (5c). Выход 0.94 г (89%), бесцветные ромбы, т. пл. 154–155 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1338 (SO₂ ν as), 1159 (SO₂ ν s), 868 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.60–1.62 (2H, м, 3-CH₂); 2.28–2.33 (1H, м, 3a-CH); 2.40 (3H, с, CH₃); 2.60 (1H, т, *J* = 9.1) и 3.73 (1H, т, *J* = 9.1, 4-CH₂); 3.30 (1H, д, *J* = 3.4) и 3.32 (1H, д, *J* = 3.4, 1a,6b-CH); 3.48 (1H, д, *J* = 12.4) и 3.85 (1H, д, *J* = 12.4, 6-CH₂); 4.46 (1H, д, *J* = 3.4, *J* = 1.4, 2-CH); 7.29 (2H, д, *J* = 8.2) и 7.68 (2H, д, *J* = 8.2, H Ar). Спектр ЯМР ¹³C (150 МГц), δ , м. д.: 21.6 (CH₃); 32.8 (C-3); 45.3, 48.3, 49.6, 50.3, 52.3 (C-1a,3a,4,6,6b); 76.8 (C-2); 90.9 (C-6a); 127.6, 129.9, 133.4, 143.8 (C Ar). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 307 [M]⁺ (3), 152 (22), 106 (15), 91 (100), 81 (24), 65 (55), 53 (21), 41 (58). Найдено, %: С 58.43; Н 5.73; N 4.44; S 10.59. C₁₅H₁₇NO₄S. Вычислено, %: С 58.61; Н 5.57; N 4.56; S 10.43.

(1aSR,2RS,3aRS,6aRS,6bRS)-2-Метил-5-(2-нафтилсульфонил)-октагидро-2,6a-эпоксирено[е]изоиндол (5d). Выход 1.11 г (92%), бесцветный порошок, т. пл. 170–172 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1341 (SO₂ ν as), 1163 (SO₂ ν s), 869 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.32 (1H, д, *J* = 12.5, *J* = 3.5) и 1.68 (1H, д, *J* = 12.5, *J* = 7.7, 3-CH₂); 1.38 (3H, с, CH₃); 2.34–2.38 (1H, м, 3a-CH); 2.74 (1H, т, *J* = 9.7) и 3.85 (1H, д, *J* = 8.1, *J* = 9.7, 4-CH₂); 3.17 (1H, д, *J* = 3.3) и 3.37 (1H, д, *J* = 3.3, 1a,6b-CH); 3.59 (1H, д, *J* = 12.1) и 3.89 (1H, д, *J* = 12.1, 6-CH₂); 7.61–7.67 (2H, м, H Naphth); 7.82 (1H, д, *J* = 1.8, *J* = 8.4, H Naphth); 7.91–7.98 (3H, м, H Naphth); 8.40 (1H, д, *J* = 1.5, H-1 Naphth). Спектр ЯМР ¹³C (150 МГц), δ , м. д.: 16.6 (CH₃); 38.7 (C-3); 46.9, 48.6, 51.1, 52.4, 52.9 (C-1a,3a,4,6,6b); 84.5, 90.6 (C-2,6a); 122.7, 127.5, 127.9, 128.7, 129.2, 129.4, 132.2, 133.7 (2C), 134.9 (C Naphth). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 357 [M]⁺ (8), 207 (11), 166 (21), 127 (100), 109 (12), 101 (19), 73 (22), 55 (15), 43 (85). Найдено, %: С 63.96; Н 5.49; N 4.07; S 9.12. C₁₉H₁₉NO₄S. Вычислено, %: С 63.85; Н 5.36; N 3.92; S 8.97.

Перегруппировка Вагнера–Меервейна (общая методика). К раствору 1.6 ммоль диэпоксиды **2a,b** или **5a–d** в 10 мл уксусного ангидрида добавляют 0.51 мл

(4.1 ммоль) эфирага трехфтористого бора и перемешивают в течение 0.5 ч при 20 °С (контроль ТСХ). Реакционную смесь выливают в 100 мл воды, нейтрализуют насыщенным Na₂CO₃, экстрагируют CHCl₃ (3 × 50 мл), экстракт сушат над безводным MgSO₄. После упаривания растворителя и колоночной хроматографии (SiO₂, 1.3 × 22 см, элюент: гексан → смесь гексан–EtOAc, 10:1 → смесь гексан–EtOAc, 5:1) получают эпоксициклопента[с]пиридины **6a–d** и циклопента[с]пиридины **7a–с**.

(4SR,4aSR,5SR,6RS,7aSR)-2-Бензил-октагидро-1H-4,6-эпоксициклопента[с]пиридин-4,5-диилдиацетат (6a). Выход 0.083 г (15%), бесцветный порошок. ИК спектр, ν , см⁻¹: 1745, 1722 (C=O), 1254 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H (600 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.68 (1H, д. д. д., *J* = 2.1, *J* = 11.0, *J* = 13.1) и 1.87 (1H, д. д. д., *J* = 1.4, *J* = 5.5, *J* = 13.1, 7-CH₂); 1.99 (3H, с, CH₃); 2.05 (3H, с, CH₃); 2.05–2.07 (1H, м) и 2.55 (1H, д. д., *J* = 2.1, *J* = 11.7, 1-CH₂); 2.27–2.31 (1H, м, 7a-CH); 2.51 (1H, д., *J* = 11.7) и 3.35 (1H, д., *J* = 11.7, 3-CH₂); 2.98 (1H, уш. д., *J* = 4.8, 4a-CH); 3.43 (1H, д., *J* = 13.7) и 3.70 (1H, д., *J* = 13.7, NCH₂); 4.50 (1H, уш. с, 5-CH); 4.70 (1H, уш. с, 6-CH); 7.21–7.32 (5H, м, H Ph). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 21.1 (CH₃); 22.3 (CH₃); 30.2, 30.6 (C-7,7a); 44.9, 52.5, 55.2, 61.6 (C-1,3,4a, NCH₂); 78.9, 81.1 (C-5,6); 106.9 (C-4); 127.2, 128.4, 129.0, 138.1 (C Ph); 169.2 (C=O); 170.7 (C=O). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 345 [M]⁺ (2), 285 (16), 257 (17), 226 (25), 198 (25), 91 (100), 43 (36). Найдено, %: C 66.26; H 6.90; N 4.26. C₁₉H₂₃NO₅. Вычислено, %: C 66.07; H 6.71; N 4.06.

(4SR,4aSR,5SR,6RS,7aSR)-2-Бензил-7a-метилоктагидро-1H-4,6-эпоксициклопента[с]пиридин-4,5-диилдиацетат (6b) и (4aSR,5SR,6RS,7aSR)-2-бензил-7a-метил-2,4a,5,6,7,7a-гексагидро-1H-циклопента[с]пиридин-4,5,6-триилтриацетат (7a). Хроматографически неразделимая смесь в виде светло-желтого вязкого масла. Выход смеси **6b** и **7a** (~ 1/1) 0.12 г (21%). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1736 (C=O), 1222 (C–O–C). Спектр ЯМР ¹H смеси соединений **6b** и **7a** (400 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.28 (3H, с, CH₃); 1.31 (3H, с, CH₃); 1.49 (1H, д., *J* = 13.7), 1.61–1.73 (2H, м) и 2.23 (1H, д., *J* = 13.7, 7-CH₂); 2.06 (3H, с, CH₃); 2.06 (3H, с, CH₃); 2.07 (3H, с, CH₃); 2.08 (3H, с, CH₃); 2.13 (3H, с, CH₃); 2.55 (1H, д., *J* = 11.8), 2.63–2.68 (2H, м), 2.73–2.78 (2H, м), 2.85 (1H, уш. д., *J* = 6.9), 2.90 (1H, д. д., *J* = 1.9, *J* = 5.6), 3.20 (1H, д., *J* = 11.8), 3.28 (1H, д., *J* = 11.2) и 3.86–3.90 (3H, м, 4a-CH, 1-CH₂, 3-CH₂, NCH₂); 4.10 (1H, уш. т., *J* = 5.6), 5.10 (1H, д., *J* = 1.9), 5.31 (1H, д., *J* = 2.5) и 5.86 (1H, с, 5-CH, 6-CH); 6.41 (1H, уш. д., *J* = 1.9, 3-CH); 7.19–7.36 (10H, м, H Ph). Спектр ЯМР ¹³C смеси соединений **6b** и **7a** (100 МГц), δ , м. д.: 20.8 (2C); 21.3; 21.4; 25.3; 25.8; 27.5; 28.2; 32.7; 47.6; 47.7; 50.4 (2C); 51.0; 51.2; 58.8; 59.6; 60.7; 63.9; 74.0; 77.4; 97.0; 97.9; 126.5; 126.6; 128.1; 128.2; 140.4; 140.5; 169.9; 170.2; 170.6; 170.8; 171.0. Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 359 [M]⁺ (7), 240 (13), 212 (38), 120 (39), 91 (99), 65 (13), 43 (100).

(4SR,4aSR,5SR,6RS,7aSR)-6-Метил-2-(фенилсульфонил)октагидро-1H-4,6-эпоксициклопента[с]пиридин-4,5-диилдиацетат (6c). Выход 0.079 г (12%), бесцветный порошок, т. пл. 159–160 °С (гексан–EtOAc).

ИК спектр, ν , см⁻¹: 1752, 1731 (C=O), 1358 (SO₂ *v as*), 1162 (SO₂ *v s*). Спектр ЯМР ¹H (400 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.37 (3H, с, CH₃); 1.75–1.78 (2H, м, 7-CH₂); 2.02 (3H, с, CH₃); 2.09 (3H, с, CH₃); 2.38–2.44 (1H, м, 7a-CH); 2.54 (1H, д. д., *J* = 1.9, *J* = 11.8) и 3.60 (1H, к. д., *J* = 1.9, *J* = 11.8, 1-CH₂); 2.95 (1H, д., *J* = 11.8) и 4.04 (1H, д., *J* = 11.8, 3-CH₂); 3.13 (1H, д. д., *J* = 1.9, *J* = 4.4, 4a-CH); 4.69 (1H, уш. с, 5-CH); 7.53 (2H, т., *J* = 7.5, H-3,5 Ph); 7.60 (1H, т., *J* = 7.5, H-4 Ph); 7.78 (2H, д. д., *J* = 7.5, *J* = 1.2, H-2,6 Ph). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 15.5 (CH₃); 20.8 (CH₃); 22.0 (CH₃); 29.7, 35.4, 45.2, 45.9, 47.1 (C-1,3,4a,7,7a); 77.2, 79.1 (C-5,6); 105.6 (C-4); 127.4, 129.2, 132.9, 137.4 (C Ph); 169.2 (C=O); 170.2 (C=O). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 409 [M]⁺ (3), 321 (5), 77 (16), 51 (10), 43 (100). Найдено, %: C 55.86; H 5.49; N 3.53; S 7.62. C₁₉H₂₃NO₇S. Вычислено, %: C 55.73; H 5.66; N 3.42; S 7.83.

(4SR,4aSR,5SR,6RS,7aSR)-6-Метил-2-(2-нафтилсульфонил)октагидро-4H-4,6-эпоксициклопента[с]пиридин-4,5-диилдиацетат (6d). Выход 0.073 г (10%), бесцветные нитевидные кристаллы, т. пл. 174–175 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1739 (C=O), 1349 (SO₂ *v as*), 1161 (SO₂ *v s*). Спектр ЯМР ¹H (400 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.35 (3H, с, CH₃); 1.74–1.76 (2H, м, 7-CH₂); 2.00 (3H, с, CH₃); 2.07 (3H, с, CH₃); 2.37–2.43 (1H, м, 7a-CH); 2.59 (1H, д. д., *J* = 1.3, *J* = 11.8) и 3.66 (1H, уш. д., *J* = 11.8, 1-CH₂); 2.97 (1H, д., *J* = 11.8) и 4.13 (1H, д., *J* = 11.8, 3-CH₂); 3.08 (1H, уш. д., *J* = 3.8, 4a-CH); 4.67 (1H, уш. с, 5-CH); 7.59–7.75 (3H, м, H Naphth); 7.90–7.98 (3H, м, H Naphth); 8.34 (1H, уш. с, H-1 Naphth). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 15.4 (CH₃); 20.8 (CH₃); 21.9 (CH₃); 29.6, 35.3, 45.2, 45.9, 47.1 (C-1,3,4a,7,7a); 79.1 (C-5); 87.6 (C-6); 105.5 (C-4); 122.6, 127.5, 127.9, 128.6, 128.8, 129.2, 129.4, 132.2, 134.4, 134.9 (C Naphth); 169.1 (C=O); 170.1 (C=O). Найдено, %: C 60.01; H 5.58; N 2.85; S 7.11. C₂₃H₂₅NO₇S. Вычислено, %: C 60.12; H 5.48; N 3.05; S 6.98.

(4aSR,5SR,6RS,7aSR)-2-(Фенилсульфонил)-2,4a,5,6,7,7a-гексагидро-1H-циклопента[с]пиридин-4,5,6-триилтриацетат (7b). Выход 0.08 г (11%), сростки бесцветных игл, т. пл. 152–153 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1745 (C=O), 1348 (SO₂ *v as*), 1154 (SO₂ *v s*). Спектр ЯМР ¹H (400 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.39 (1H, д. д. д., *J* = 5.6, *J* = 9.9, *J* = 13.7) и 2.38 (1H, д. т., *J* = 8.7, *J* = 13.7, 7-CH₂); 1.75 (3H, с, CH₃); 1.95 (3H, с, CH₃); 2.11 (3H, с, CH₃); 2.16–2.23 (1H, м, 7a-CH); 2.69 (1H, д. д. д., *J* = 1.7, *J* = 3.7, *J* = 9.3, 4a-CH); 2.75 (1H, т., *J* = 11.8) и 3.81 (1H, д. д., *J* = 5.6, *J* = 11.8, 1-CH₂); 5.02 (1H, д. т., *J* = 3.7, *J* = 9.3, 6-CH); 5.31 (1H, т., *J* = 3.7, 5-CH); 6.91 (1H, уш. д., *J* = 1.3, 3-CH); 7.54 (2H, т., *J* = 7.5, H-3,5 Ph); 7.61 (1H, т., *J* = 7.5, H-4 Ph); 7.82 (2H, д., *J* = 7.5, H-2,6 Ph). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 20.5 (CH₃); 20.6 (CH₃); 20.8 (CH₃); 31.4, 31.9, 39.6, 47.4 (C-1, C-4a, C-7, C-7a); 71.9, 72.5 (C-5, C-6); 120.9, 127.2, 129.2, 132.9, 133.1, 137.4 (C-3, C-4, C Ph); 169.1 (C=O); 169.3 (C=O); 170.1 (C=O). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 437 [M]⁺ (3), 395 (5), 194 (5), 77 (14), 43 (100). Найдено, %: C 55.03; H 5.12; N 3.07; S 7.54. C₂₀H₂₃NO₈S. Вычислено, %: C 54.91; H 5.30; N 3.20; S 7.33.

(4aSR,5SR,6RS,7aSR)-2-[(4-Метилфенил)сульфонил]-2,4а,5,6,7,7а-гексагидро-1H-циклопента[с]пириндин-4,5,6-триилтриацетат (7с). Выход 0.079 г (11%), бесцветные нитевидные кристаллы, т. пл. 178–179 °С (гексан–EtOAc). ИК спектр, ν , см⁻¹: 1746 (C=O), 1338 (SO₂ v as), 1153 (SO₂ v s). Спектр ЯМР ¹H (400 МГц), δ , м. д. (*J*, Гц): 1.39 (1H, д. д. д, *J* = 5.6, *J* = 9.9, *J* = 13.7) и 2.39 (1H, д. т, *J* = 9.3, *J* = 13.7, 7-CH₂); 1.77 (3H, с, CH₃); 1.95 (3H, с, CH₃); 2.11 (3H, с, CH₃); 2.13–2.20 (1H, м, 7а-CH); 2.42 (3H, с, CH₃); 2.69 (1H, д. д. д, *J* = 1.3, *J* = 3.7, *J* = 9.3, 4а-CH); 2.75 (1H, т, *J* = 11.8) и 3.79 (1H, д. д, *J* = 5.6, *J* = 11.8, 1-CH₂); 5.02 (1H, д. т, *J* = 3.7, *J* = 9.3, 6-CH); 5.31 (1H, т, *J* = 3.7, 5-CH); 6.89 (1H, с, 3-CH); 7.33 (2H, д, *J* = 8.1) и 7.70 (2H, д, *J* = 8.1, H Ar). Спектр ЯМР ¹³C (100 МГц), δ , м. д.: 20.4 (CH₃); 20.6 (CH₃); 20.8 (CH₃); 21.5 (CH₃); 31.4 (C-7); 31.8 (C-7а); 39.6 (C-4а); 47.4 (C-1); 71.9 (C-5); 72.5 (C-6); 121.0 (C-3); 127.3, 129.8 (C Ar); 132.8 (C-4); 134.4, 144.0 (C Ar); 169.1 (C=O); 169.3 (C=O); 170.1 (C=O). Масс-спектр, *m/z* (*I*_{отн.}, %): 451 [M]⁺ (1), 194 (5), 91 (12), 43 (100). Найдено, %: C 55.98; H 5.57; N 3.07; S 7.23. C₂₁H₂₅NO₈S. Вычислено, %: C 55.86; H 5.58; N 3.10; S 7.10.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 02.а03.21.0008) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-03-00125 и 16-33-00389).

Список литературы

1. Вагнер, Е. Е. *Журн. рус. физ.-хим. о-ва* **1899**, 31, 690.
2. Meerwein, H. *Justus Liebigs Ann. Chem.* **1914**, 405, 129.
3. Vogel, P.; Cossy, J.; Plumet, J.; Arjona, O. *Tetrahedron* **1999**, 55, 13521.
4. Reymond, J.-L.; Pinkerton, A. A.; Vogel, P. *J. Org. Chem.* **1991**, 56, 2128.
5. Collins, C. J.; Cheema, Z. K.; Werth, R. G.; Benjamin, B. M. *J. Am. Chem. Soc.* **1964**, 86, 4913.
6. Berson, J. A.; Hammons, J. H.; McRowe, A. W.; Bergman, R. G.; Remanick A.; Houston, D. *J. Am. Chem. Soc.* **1967**, 89, 2590.
7. Campbell, M.; Sainsbury, M.; West, R. *Tetrahedron Lett.* **1987**, 28, 3865.
8. Gschwend, H. W.; Hillman, M. J.; Kisis, B.; Rodebaugh, R. K. *J. Org. Chem.* **1976**, 41, 104.
9. Jung, M. E.; Street, L. J. *Tetrahedron Lett.* **1985**, 26, 3639.
10. *Strategies and Tactics in Organic Synthesis*; Lindberg, T., Ed.; Academic Press: New York, 1980, vol. 2, p. 221.
11. Ciganek, E. *J. Org. Chem.* **1995**, 60, 4439.
12. Zubkov, F. I.; Nikitina, E. V.; Turchin, K. F.; Aleksandrov, G. G.; Safronova, A. A.; Borisov, R. S.; Varlamov, A. V. *J. Org. Chem.* **2004**, 69, 432.
13. Zubkov, F. I.; Ershova, J. D.; Orlova, A. A.; Zaytsev, V. P.; Nikitina, E. V.; Peregudov, A. S.; Gurbanov, A. V.; Borisov, R. S.; Khrustalev, V. N.; Maharramov, A. M.; Varlamov, A. V. *Tetrahedron*, **2009**, 65, 3789.
14. Gurbanov, A. V.; Nikitina, E. V.; Airiyan, I. K.; Zaytsev, V. P.; Khrustalev, V. N. *Acta Crystallogr., Sect. E: Struct. Rep. Online* **2009**, E65, o2981.
15. Курбанов, А. В.; Хрусталёв, В. Н.; Зайцев, В. П.; Никитина, Е. В.; Зубков, Ф. И.; Варламов, А. В. *Азерб. хим. журн.* **2009**, 66.
16. Gurbanov, A. V.; Nikitina, E. V.; Zaytsev, V. P.; Zubkov, F. I.; Khrustalev, V. N. *Acta Crystallogr.* **2010**, E66, o206.
17. Zubkov, F. I.; Zaytsev, V. P.; Nikitina, E. V.; Khrustalev, V. N.; Gozun, S. V.; Boltukhina, E. V.; Varlamov, A. V. *Tetrahedron* **2011**, 67, 9148.
18. Zubkov, F. I.; Nikitina, E. V.; Galeev, T. R.; Zaytsev, V. P.; Khrustalev, V. N.; Novikov, R. A.; Orlova, D. N.; Varlamov, A. V. *Tetrahedron* **2014**, 70, 1659.
19. Zaytsev, V. P.; Zubkov, F. I.; Mertsalov, D. F.; Orlova, D. N.; Sorokina, E. A.; Nikitina, E. V.; Varlamov, A. V. *Russ. Chem. Bull., Int. Ed.* **2015**, 64, 112. [*Изв. АН, Сер. хим.* **2015**, 112.]
20. Zubkov, F. I.; Zaytsev, V. P.; Airiyan, I. K.; Golubev, V. D.; Puzikova, E. S.; Sorokina, E. A.; Nikitina, E. V.; Varlamov, A. V. *Russ. Chem. Bull., Int. Ed.* **2012**, 61, 600. [*Изв. АН, Сер. Хим.* **2012**, 598]
21. McNelis, B. J.; Starr, J. T.; Dang, H. *J. Heterocycl. Chem.* **1998**, 35, 1509.
22. Kuhnert, N.; Sammes, P. G.; Smith, G.; Ward, R. W. *J. Chem. Res.* **2004**, 9, 608.