

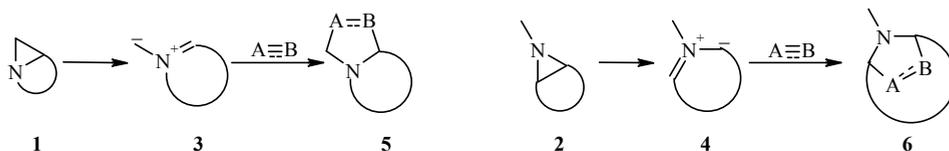
А. Ф. Хлебников\*, М. С. Новиков

## КОНДЕНСИРОВАННЫЕ АЗИРИДИНЫ КАК ИСТОЧНИКИ АЗОМЕТИН-ИЛИДОВ

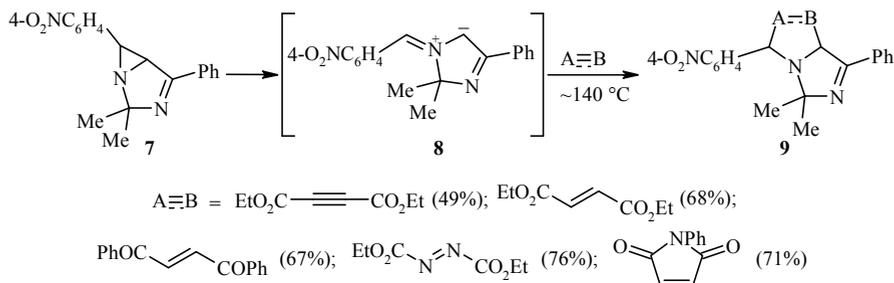
Рассмотрено применение конденсированных азиридинов в качестве источников азометин-илидов в синтезе полигетероциклических соединений, обсуждаются особенности их термо- и фотолитического раскрытия, а также вопросы стерео-, регио- и хемоселективности их реакций циклоприсоединения и электроциклизации.

**Ключевые слова:** азиридины, азометин-илиды, гетероциклы, 1,3-дипольное циклоприсоединение.

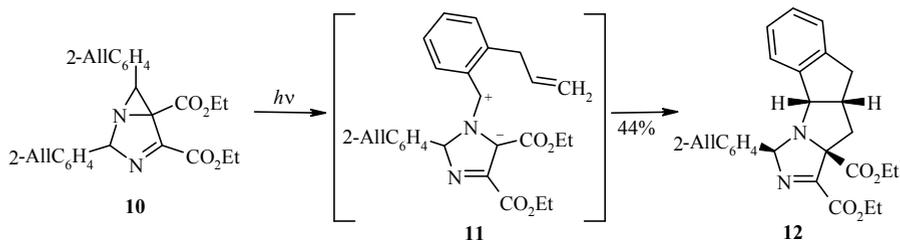
Реакции 1,3-дипольного циклоприсоединения азометин-илидов являются одним из наиболее интенсивно используемых методов регио- и стереоконтролируемого синтеза пятичленных гетероциклов [1–5]. Азиридины были первыми источниками азометин-илидов в реакциях циклоприсоединения [6], и в дальнейшем их использование в таком качестве получило широкое распространение в органическом синтезе. Особый интерес в качестве источников азометин-илидов представляют конденсированные азиридины, применение которых позволяет формировать сложные полигетероциклические соединения. Два варианта сочленения азиридинового цикла с другим циклом дают соединения **1** и **2**, являющиеся потенциальными предшественниками двух различных типов азометин-илидов **3** и **4**, циклоприсоединение которых к дипольрофилам ведёт к конденсированным **5** или мостиковым **6** гетероциклическим системам.



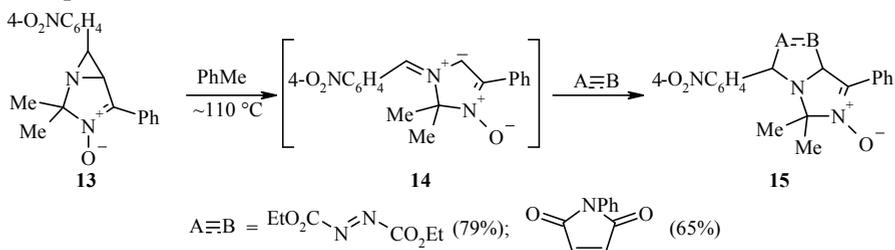
Первыми исследованными системами типа **1** были 1,3-диазабицикло[3.1.0]гекс-3-ены **7**, которые при кипячении в ксилоле претерпевают раскрытие трёхчленного цикла по связи C–C с образованием азометин-илидов **8**. Последние в присутствии активированных дипольрофилов дают соответствующие (5,5)-бициклические или (5,5,5)-трициклические системы **9** [7].



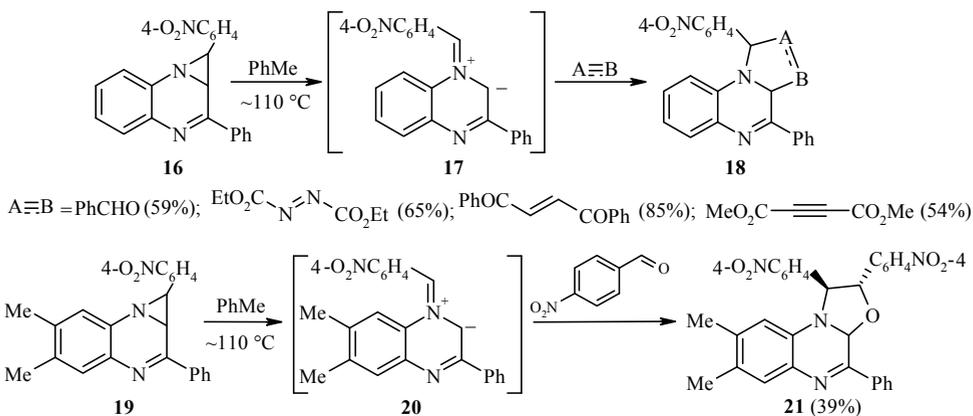
При фотолизе соединения **10**, содержащего в арильной группе аллильный заместитель, связь С=С которого может служить внутренним диполярфилом для азометин-илида **11**, получен тетрациклический аддукт **12** [8]. Эта реакция является единственным примером внутримолекулярного циклоприсоединения азометин-илида из 1,2-конденсированного азиридина.



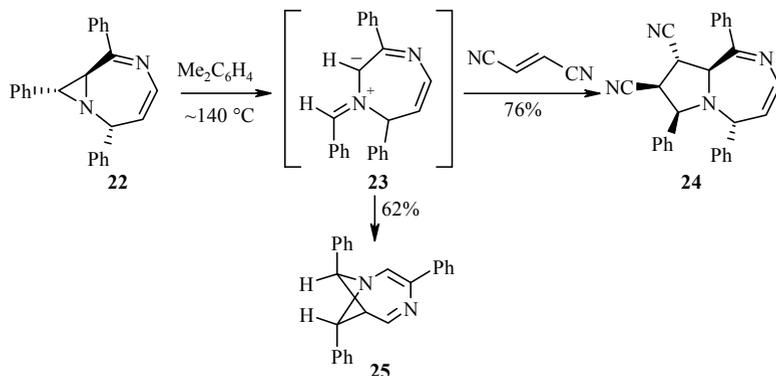
*N*-Оксиды азириноимидазолов **7** также могут служить источниками илидов. Так, при кипячении оксида **13** в толуоле в присутствии диполярфилов с хорошими выходами получены аддукты **15** [9]. Примечательно, что фотолиз оксида **13** в присутствии диэтилазодикарбоксилата приводит к тому же стереоизомеру **15**, который получается и в условиях термоллиза, что указывает на идентичное строение илидного интермедиата **14**, участвующего в циклоприсоединении. Предполагается, что фотоиндуцируемая реакция в данном случае осуществляется через интерконверсию электронного возбуждённого состояния в колебательное возбуждённое состояние [10]. Аналогичный результат был зафиксирован и для соединений **7** [11].



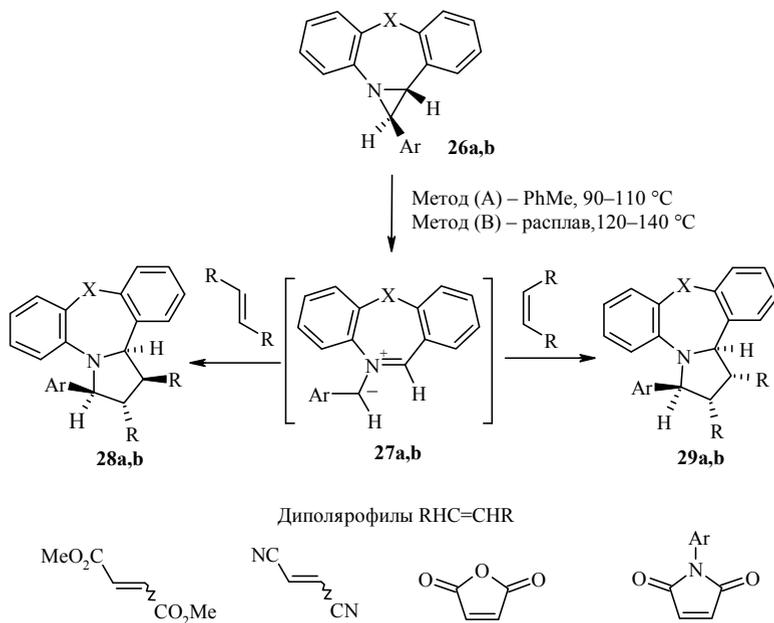
Использование азиридинов, конденсированных по связи С–N с шестичленными кольцами, позволяет синтезировать (5,6)-бициклические гетероциклы. Так, кипячение 1,4-диаза[4.1.0]гекс-4-енов **16** в толуоле в присутствии разнообразных диполярфилов привело к образованию соответствующих аддуктов **18** [12]. Реакция азометин-илидов **17**, **20** с бенальдегидами протекает региоселективно, давая производные оксазоло[3,2-*a*]хиноксалина **18**, **21** [12, 13].



Термолиз азиридинов, конденсированных по связи С–N с семичленными кольцами, в присутствии разнообразных диполярфилов позволяет синтезировать (5,7)-бициклические гетероциклы. Кипячение в ксилоле азиринобензодиазепина **22** в присутствии фумаронитрила приводит к стереоселективному образованию производного 1,5-диазабицикло[5.3.0]дека-3,5-диена **24** [14]. В отсутствие диполярфила в качестве основного продукта получается производное 1,4-диазабицикло[4.1.1]окта-2,4-диена **25**, которое, вероятно, образуется в результате [1,7]-электроциклизации ильида **23**.



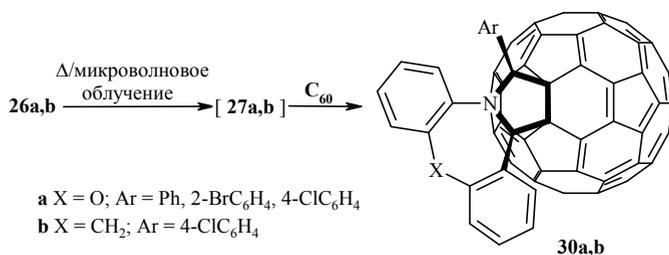
Широкому применению данного подхода к синтезу (5,7)-бициклических азотистых гетероциклов часто препятствует отсутствие хороших методов получения производных азириноазепинов и их бензоконденсированных и гетероатомных аналогов. Недавно предложенный простой метод синтеза азиринодобензазепинов и -оксазепинов **26a,b** позволил использовать эти соединения в качестве источников азометин-илидов **27a,b** и получить широкий круг потенциально биологически активных пирролодобензазепинов и -оксазепинов **28a,b** и **29a,b** [15, 16].



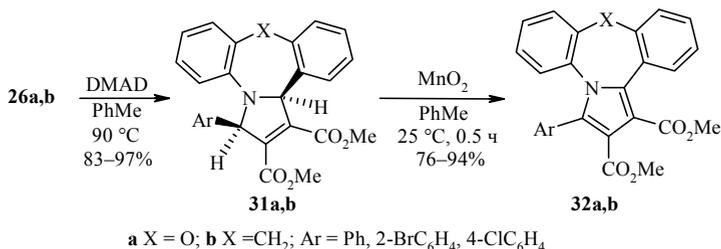
**a** X = O, 75–97%, (A) 6–12 ч, (B) 15 мин; **b** X = CH<sub>2</sub>, 67–89%, (A) 16–18 ч, (B) 4–5 ч

Реакция илидов **27a,b**, генерированных либо нагреванием раствора азиридинов **26a,b** в толуоле, либо в расплаве, с C=C диполярфилами происходит строго стереоселективно с образованием аддуктов, в которых "илидные" атомы водорода всегда оказываются *цис*-ориентированными. Реакция включает образование и циклоприсоединение азометин-илидов только W-типа, которые не претерпевают в условиях реакции *E,Z*-изомеризацию. Присоединение илидов к циклическим производным малеиновой кислоты происходит *экзо*-стереоселективно.

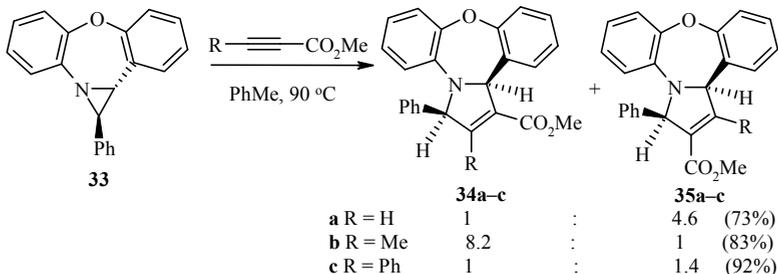
Фуллерен C<sub>60</sub> оказался активным C=C диполярфилом по отношению к илидам **27**. Стереоселективная реакция позволяет получать фуллеропирролидины **30** с выходами до 56% как при конвекционном нагреве, так и при микроволновом облучении [16, 17].



Нагревание в толуоле азиридинов **26a,b** с димилацетилендикарбоксилатом (ДМАД, DMAD) приводит к стереоселективному образованию с высокими выходами пирролинов **31a,b**, которые в мягких условиях дегидрируются в соответствующие пирролы **32a,b** [16, 17].

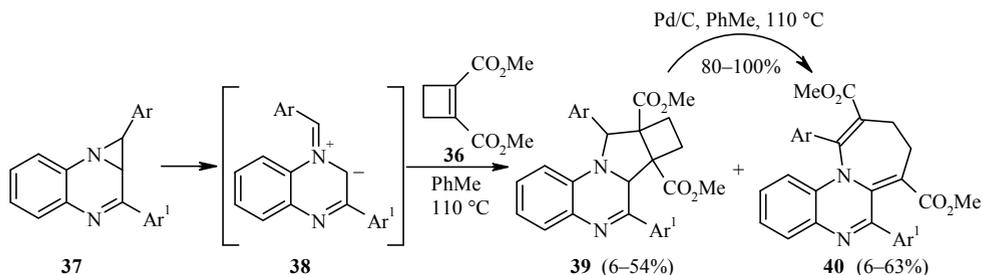


Азометин-илид, генерированный из азиридина **33**, стереоселективно реагирует с метиловыми эфирами пропиоловой, тетроловой и фенилпропиоловой кислот с образованием смеси региоизомерных аддуктов **34a-c** и **35a-c** с выходами 73–92% [17].

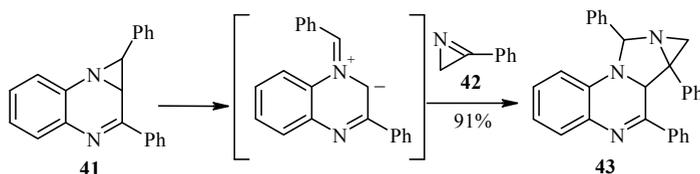


Использование специфического C=C диполярфила, диметилового эфира циклобутен-1,2-дикарбоновой кислоты (**36**), позволяет синтезировать (6,7)-бициклические гетероциклы [18]. Нагревание азиридинов **37** с цикло-

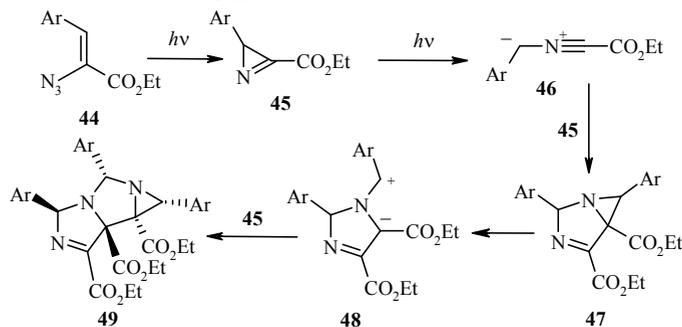
бутеном **36** дает смесь аддуктов **39** и продуктов формального расширения четырёхзвенного цикла – азеинохиноксалинов **40**. Первичные продукты циклоприсоединения **39** могут быть переведены практически количественно в трициклические производные **40** кипячением в толуоле с Pd/C.



Известно, что дипольярофилы с C=N связью гораздо менее активны по отношению к азометин-илидам, чем электрон-дефицитные алкены и алкины, причём это относится даже к иминам, содержащим электроноакцепторные группы [19]. Вместе с тем напряжённые циклические аналоги иминов – 2*H*-азирины – часто довольно эффективны как ловушки 1,3-диполей, в том числе азометин-илидов, генерированных из конденсированных азиридинов. Так, реакция азиридина **41** с 3-фенил-2*H*-азириним (**42**) приводит к соединению **43** с высоким выходом [20].

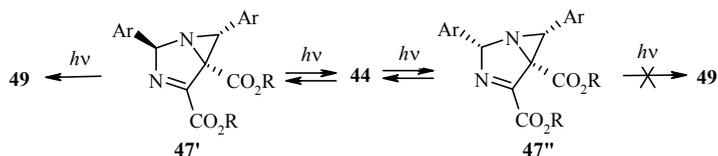


Изящный метод формирования в одну синтетическую стадию (3,5,5)-трициклической системы **49** из винилазидов **44** включает домино-реакцию, в которой азирины **45** выступают в роли ловушки двух последовательно образующихся 1,3-диполей разного типа: нитрил-илида **46** и азометин-илида **48**. При фотолизе азидов **44** сначала получают азирины **45**, из которых под действием облучения образуются нитрил-илиды **46**, дающие циклоаддукты с азиринами **45** – конденсированные азиридины **47**. Последние раскрываются в азометин-илиды **48**, которые также перехватываются азиринами **45** с образованием циклоаддуктов **49** [8].

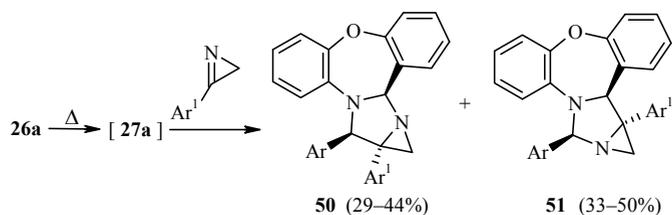


Ar = 2-MeC<sub>6</sub>H<sub>4</sub> (50%); Ar = Ph (66%); Ar = 2-BnC<sub>6</sub>H<sub>4</sub> (40%); Ar = 2-(*i*-Pr)C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> (57%); Ar = флуорен-1-ил (61%)

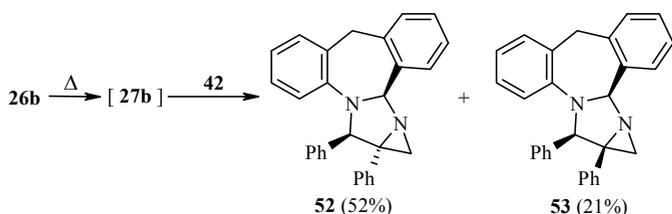
Позднее были выделены стереоизомерные азириноимидазолы **47'** и **47''** и установлено, что илид **48** образуется исключительно из изомера **47'** [21].



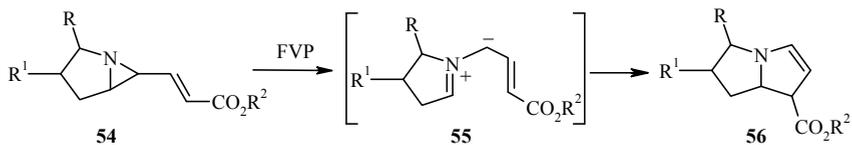
Нагревание толуольных растворов азиридинов **26a** при 90 °С в присутствии 3-арил-2*H*-азиринов приводит к смеси региоизомерных гетероциклов **50** и **51**, продуктов стереоселективного 1,3-диполярного циклоприсоединения азометин-ирида **27a** по связи C=N азиринов. Проведение реакции без растворителя, в расплаве исходных соединений, позволяет существенно сократить время реакции. Повышение температуры до 140 °С не сказывается на региоселективности реакции, но приводит к незначительному снижению выходов циклоаддуктов [22].



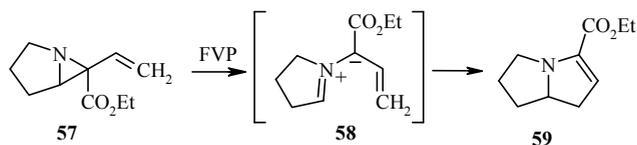
Азепиновый аналог **26b** (Ar = Ph) реагирует с фенилазирином **42** региоселективно, но нестереоселективно с образованием циклоаддуктов **52** и **53** [22].



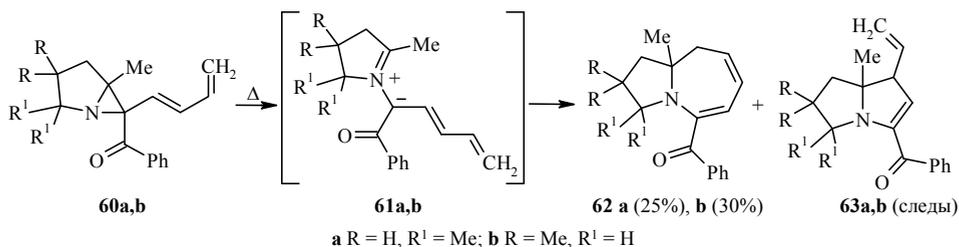
Альтернативный способ трансформации конденсированного азиридинового цикла в цикл большего размера – это перегруппировка алкенилазиридинов через электроциклизацию промежуточного азометин-ирида. Так, внутримолекулярное аннелирование пирролинового цикла может быть реализовано исходя из акцепторно-замещённых винилазиридинов **54**, **57**, которые в условиях вакуумного флеш-пиролиза (FVP) дают азометин-ириды **55**, **58** с последующей 1,5-циклизацией в производные пирролизидина **56**, **59** [23–25].



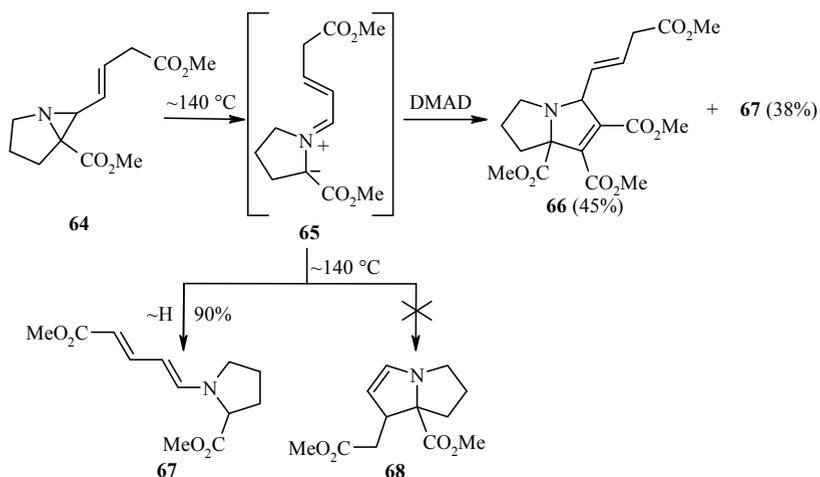
R = AlkO, TBDMSO; R<sup>1</sup> = AlkO, H; R<sup>2</sup> = Alk



Примечательно, что бутадиенил-замещённые азометин-ириды **61a,b**, получающиеся при термоллизе азиридинов **60a,b**, легче претерпевают 1,7-циклизацию в соединения **62a,b**, чем 1,5-циклизацию в соединения **63a,b** [26].



Участие в этих перегруппировках илیدного интермедиата подтверждено получением продукта межмолекулярного 1,3-дипольного циклоприсоединения азометин-илида **65**, генерированного из азиридина **64**, к ДМАД – пирролизидина **66** [27]. При наличии достаточно кислого атома водорода в алкенильном фрагменте возможно протекание конкурентной прототропной изомеризации азометин-илида. Так, илид **65** в отсутствие ДМАД даёт не продукт 1,5-электроциклизации **68**, а пирролидин **67**, выделенный с выходом 90%.

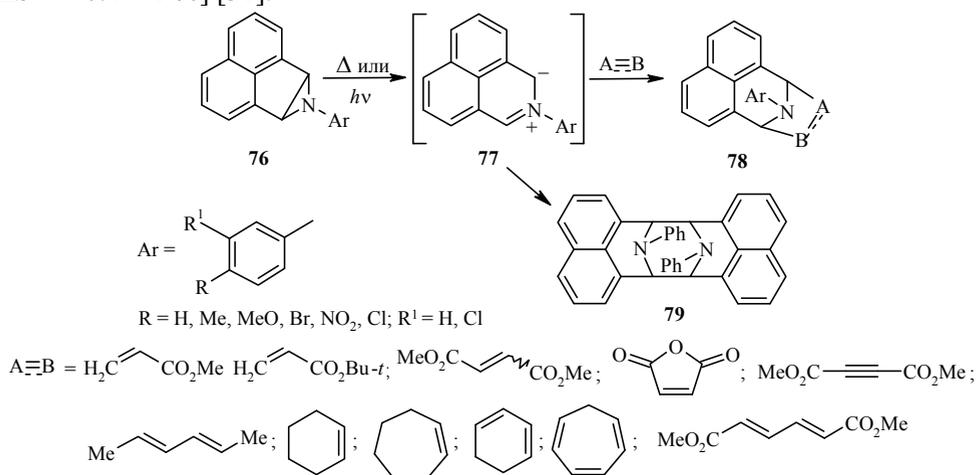


Если сочленение циклов в азириноконденсированной системе происходит не по С–N, а по С–С связи трёхчленного кольца, то образующийся 1,3-диполь является циклическим, а продукты превращений илیدного интермедиата представляют собой мостиковые структуры **6**. Реакций с участием таких илидов известно существенно меньше, что, вероятно, объясняется более высокими барьерами термического раскрытия азиридинового кольца. Действительно, разрешённое термическое конротаторное раскрытие азиридина по С–С связи, включённой в состав другого цикла, невозможно по стерическим причинам. Поэтому большинство реакций такого типа может быть проведено только при УФ облучении. Тем не менее в некоторых случаях реализуется запрещённое правилами орбитальной симметрии термическое дисротаторное раскрытие цикла, как, например, при термоллизе азиридинов **69**. Азометин-илиды **70**, которые образуются при дисротаторном раскрытии трёхчленного цикла, легко присоединяются к активированным и неактивированным кратным связям углерод–углерод ациклических и циклических молекул с образованием мостиковых гетероциклов **71** [28, 29]. Присоединение илидов **70** к акрилонитрилу и кротононитрилу проходит региоселективно с образованием циклоаддуктов с вицинальными группами Ph и CN, в то время как реакция с метиловыми эфирами пропиловой и тетроловой кислот приводит к смеси региоизомеров.

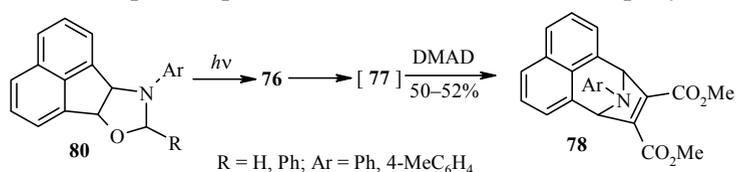


Кипячение 7-арил-7,7а-дигидро-6bH-аценафто[1,2-*b*]азиринов **76** с ДМАД даёт с высокими выходами продукты циклоприсоединения илидов **77** к тройной связи, пирролины **78** [31]. Скорость термической реакции зависит только от концентрации азиридина, что предполагает медленное дисротаторное раскрытие азиридинового кольца в **76** с образованием азометин-илидов **77**, которые затем дают продукты циклоприсоединения. Циклоприсоединение илидов **77** к производным малеиновой кислоты в условиях как термолиза, так и фотолиза приводит к смесям *экзо*-, *эндо*-изомеров. Были получены продукты циклоприсоединения илидов **77** к сопряжённым диенам и циклогептатриену, причём при использовании в качестве дипольной ловушки диметилового эфира *транс,транс*-гекса-3,5-диендиовой кислоты получен продукт присоединения по обоим двойным связям. При нагревании бензольного раствора азиридина **76** (Ar = Ph) в отсутствие диполярфила (140 °С, запаянная трубка) происходит димеризация илида **77** (Ar = Ph) с образованием пространственных изомеров **79**. Это соединение является основным продуктом реакции, проведённой в присутствии таких малоактивных диполярфилов, как циклогексен и циклогептен.

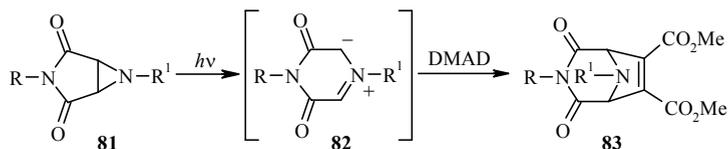
Активационные параметры дисротаторного раскрытия азиридинового кольца в соединении **76** (Ar = Ph) и конротаторного – в *цис*-1,2,3-трифенилазиридине, полученные на основании измерения кинетических параметров термической реакции с ДМАД в интервале температур 90–130 °С, показывают, что энтальпия активации запрещённого по симметрии дисротаторного процесса лишь на 3–4 ккал выше [**76** (Ar = Ph)  $\Delta H^\ddagger = 25.1 \pm 0.4$  ккал/моль,  $\Delta S^\ddagger = -0.1 \pm 1$  эе; *цис*-1,2,3-трифенилазиридин  $\Delta H^\ddagger = 21.6 \pm 0.4$  ккал/моль,  $\Delta S^\ddagger = -0.4 \pm 1$  эе] [31].



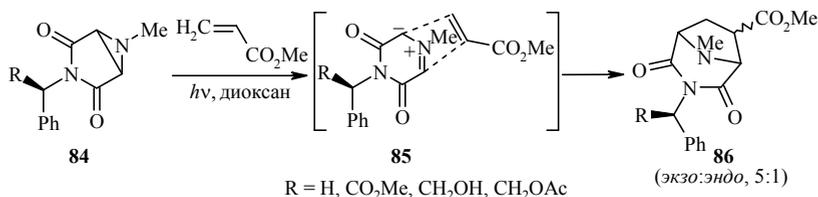
Те же продукты **78** были получены при фотолизе 9-арил-6b,8,9,9a-тетрагидроаценафт[1,2-*a*]оксазолов **80** в присутствии ДМАД [32]. По мнению авторов, реакция протекает через экструзию соответствующих альдегидов с образованием азиридинов **76**, раскрытие их в азометин-илиды **77**, циклоприсоединение которых к тройной связи и даёт конечные продукты **78**.



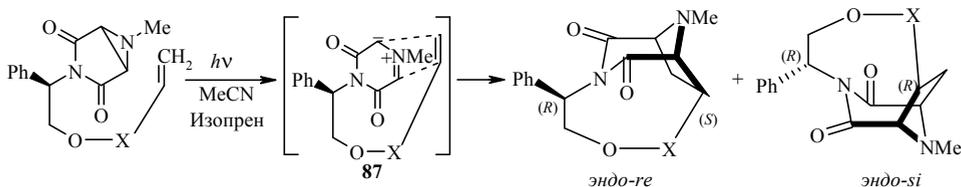
В ряде работ исследовался фотолиз азиридинов **81**, конденсированных с сукцинимидной системой, в присутствии ДМАД, в результате которого получались продукты циклоприсоединения илидов **82** к тройной связи, 3,8-диазабицикло[3.2.1]октаны **83**. Выход соединений **83** сильно зависит от заместителя при атоме азота как в азиридиновой, так и пирролидиндионовой части молекулы: R = Me, R<sup>1</sup> = 4-MeOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub> – 70% [33], R = Bn, R<sup>1</sup> = 4-MeOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ~6% [34], R = Bn, R<sup>1</sup> = фталимидо – 13% [35]. Илид **82** (R = Me, R<sup>1</sup> = 4-MeOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>) даёт смесь изомерных *экзо*-аддуктов с норборненом с выходом 33% [33]



Домино-последовательность "фотолитическое генерирование илида из 3,6-диазабицикло[3.1.0]гексанового производного – циклоприсоединение" является простым способом формирования 3,8-диазабицикло[3.2.1]октанового скелета, который встречается в некоторых алакалоидах, таких как биоксаломицины, цианоциклины, хинокарцин и нафтиридиномицин. П. Гарнер и сотр. показали, что соединения **86** с таким гетероциклическим каркасом могут быть легко получены в виде смеси *экзо*-, *эндо*-изомеров из азиридинов **84** через циклоприсоединение промежуточного илида **85** к метилакрилату [36]. Однако это циклоприсоединение проходит нестереоселективно.

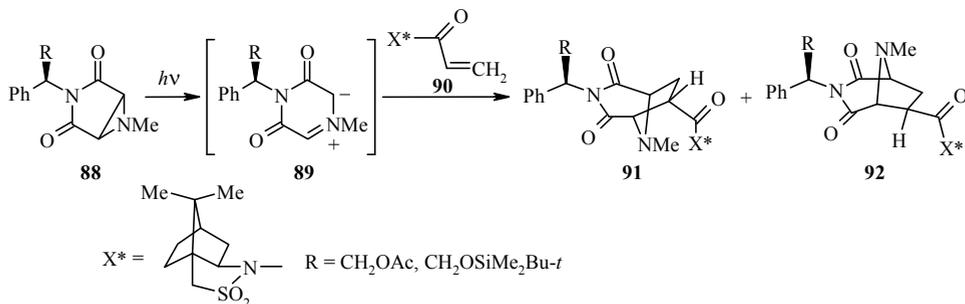


Позднее тем же авторам удалось найти решение этой проблемы, основанное на введении временного кремнийсодержащего соединительного элемента между 1,3-дипольным и диполярфильным фрагментами [37–39] в илиде **87**, в результате чего стадию циклоприсоединения удалось реализовать как внутримолекулярный процесс, для которого характерны гораздо более жёсткие конформационные требования. Необходимый контроль диастереоселективности был достигнут варьированием длины соединительного элемента.



X	Размер цикла	Отношение <i>re/si</i>	Выход основного продукта, %
-CH(OMe)-	8	1/1	35
-SiPh <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -	9	16/1	64
-SiPh <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> -	10	1/5	72
-Si(iPr) <sub>2</sub> OSi(iPr) <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> -	12	1/4	53
-SiPh <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCO-	13	1/12	46

Диастереоселективно протекает циклоприсоединение илидов **88**, генерированных фотолизом азиридинов **88**, к хиральному сультому **90**, при этом основным продуктом является экзо-изомер **91** (выход 55–65%, диастереоселективность  $dr > 25/1$ ) [30]. В то же время циклоприсоединение илидов **89** (R = H, CH<sub>2</sub>OAc) к хиральным и ахиральным эфирам акриловой кислоты и акрилонитрилу протекает неселективно [40].



Таким образом, конденсированные азиридины как источники азометинилидов позволяют решать разнообразные синтетические задачи по построению полигетероциклических систем. Кроме того, некоторые конденсированные азиридины проявляют полезные фотохимические свойства, в частности обладают фотохромной активностью, что стимулирует дальнейшие исследования этого типа соединений как перспективных материалов с переменной оптической плотностью. Резюмируя информацию, представленную в этом мини-обзоре, приходится констатировать, что синтетический потенциал конденсированных азиридинов ещё далеко не реализован, что в значительной степени связано с недостаточным развитием методов синтеза этих соединений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-03-00186), ФЦП "Научные кадры инновационной России" (госконтракт № 16.740.11.0442) и Санкт-Петербургского государственного университета (грант № 12.38.78.2012).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Synthetic Applications of 1,3-Dipolar Cycloaddition Chemistry Toward Heterocycles and Natural Products*, A. Padwa, W. H. Pearson (Eds.), John Wiley and Sons, New York, 2002.
2. I. Coldham, R. Hufton, *Chem. Rev.*, **105**, 2765 (2005).
3. J. W. Lown, in *1,3-Dipolar Cycloaddition Chemistry*, A. Padwa (Ed.), Wiley, New York, 1984, vol. 1, p. 653.
4. *Nitrogen, Oxygen and Sulfur Ylide Chemistry*, J. S. Clark (Ed.), Oxford University Press, Oxford, 2002.
5. *Aziridines and Epoxides in Organic Synthesis*, A. K. Yudin (Ed.), Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
6. H. W. Heine, R. Peavy, *Tetrahedron Lett.*, **6**, 3123 (1965).
7. H. W. Heine, A. B. Smith, III, J. D. Bower, *J. Org. Chem.*, **33**, 1097 (1968).
8. D. M. B. Hickey, C. J. Moody, C. W. Rees, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 1119 (1986).
9. H. W. Heine, T. A. Newton, G. J. Blosick, K. C. Irving, C. Meyer, G. B. Corcoran, III, *J. Org. Chem.*, **38**, 651 (1973).

10. E. Ullman, W. A. Henderson, Jr., *J. Am. Chem. Soc.*, **86**, 5050 (1964).
11. T. DoMinh, A. M. Trozzolo, *J. Am. Chem. Soc.*, **94**, 4046 (1972)
12. H. W. Heine, R. P. Henzel, *J. Org. Chem.* **34**, 171 (1969).
13. A. I. Zbruyev, F. G. Yaremenko, V. A. Chebanov, S. M. Desenko, O. V. Shishkin, E. V. Lukinova, I. V. Knyazeva, *Russ. Chem. Bull.*, **55**, 362 (2006).
14. A. Padwa, L. Gehrlein, *J. Am. Chem. Soc.*, **94**, 4933 (1972).
15. A. F. Khlebnikov, M. S. Novikov, P. P. Petrovskii, J. Magull, A. Ringe, *Org. Lett.*, **11**, 979 (2009).
16. A. F. Khlebnikov, M. S. Novikov, M. V. Golovkina, P. P. Petrovskii, A. S. Konev, D. S. Yufit, H. Stoeckli-Evans, *Org. Biomol. Chem.*, **9**, 3886 (2011).
17. A. F. Khlebnikov, M. S. Novikov, P. P. Petrovskii, A. S. Konev, D. S. Yufit, S. I. Selivanov, H. Frauendorf, *J. Org. Chem.*, **75**, 5211 (2010).
18. K. Matsumoto, Y. Ikemi, C. Takayama, K. Aoyama, T. Uchida, *Chem. Lett.*, 1647 (1990).
19. М. С. Новиков, А. Ф. Хлебников, М. А. Егармин, Ю. Копф, Р. Р. Костиков, *Журн. орган. химии*, **40**, 1542 (2004). [*Russ. J. Org. Chem.*, **40**, 1493 (2004).]
20. K. Matsumoto, K. Maruyama, *Chem. Lett.*, 759 (1973).
21. O. Meth-Cohn, N. J. R. Williams, A. MacKinnon, J. A. K. Howard, *Tetrahedron*, **54**, 9837 (1998).
22. A. F. Khlebnikov, M. S. Novikov, P. P. Petrovskii, H. Stoeckli-Evans, *J. Org. Chem.*, **76**, 5384 (2011).
23. T. Hudlicky, J. O. Frazier, G. Seoane, M. Tiedje, A. Seoane, L. D. Kwart, C. Beal, *J. Am. Chem. Soc.*, **108**, 3755 (1986).
24. T. Hudlicky, G. Seoane, T. C. Lovelace, *J. Org. Chem.*, **53**, 2094 (1988).
25. T. Hudlicky, H. Luna, J. D. Price, F. Rulin, *J. Org. Chem.*, **55**, 4683 (1990).
26. W. Friebolin, W. Eberbach, *Tetrahedron*, **57**, 4349 (2001).
27. A. G. Schultz, R. R. Staib, K. K. Eng, *J. Org. Chem.*, **52**, 2968 (1987).
28. J. W. Lown, K. Matsumoto, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, 692 (1970).
29. J. W. Lown, K. Matsumoto, *J. Org. Chem.*, **36**, 1405 (1971).
30. K. Ishii, M. Kido, M. Noji, S. Sugiyama, *Org. Biomol. Chem.*, **6**, 3186 (2008).
31. A. C. Oehlschlager, A. S. Yim, M. H. Akhtar, *Can. J. Chem.*, **56**, 273 (1978).
32. O. Tsuge, K. Oe, N. Kawaguchi, *Chem. Lett.*, 1585 (1981).
33. R. Huisgen, H. Mader, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **8**, 604 (1969).
34. S. Oida, E. Ohki, *Chem. Pharm. Bull.*, **17**, 2461 (1969).
35. М. А. Кузнецов, А. В. Ушков, С. И. Селиванов, Л. М. Кузнецова, *ХГС*, 1320 (2006). [*Chem. Heterocycl. Compd.*, **42**, 1143 (2006).]
36. P. Garner, K. Sunitha, T. Shanthilal, *Tetrahedron Lett.*, **29**, 3525 (1988).
37. P. Garner, K. Sunitha, W.-B. Ho, W. J. Youngs, V. O. Kennedy, A. Djebli, *J. Org. Chem.*, **54**, 2041 (1989).
38. P. P. Garner, P. B. Cox, S. J. Klippenstein, W. J. Youngs, D. B. McConville, *J. Org. Chem.*, **59**, 6510 (1994).
39. P. Garner, P. B. Cox, J. T. Anderson, J. Protasiewicz, R. Zaniwski, *J. Org. Chem.*, **62**, 493 (1997).
40. P. Garner, W. B. Ho, S. K. Grandhee, W. J. Youngs, V. O. Kennedy, *J. Org. Chem.*, **56**, 5893 (1991).

Санкт-Петербургский государственный университет,  
 Университетский пр., 26,  
 Санкт-Петербург 198504, Россия  
 e-mail: alexander.khlebnikov@pobox.spbu.ru

Поступило 26.10.2011