

С. Ф. Василевский*, Д. С. Баранов

**ГЕТЕРОЦИКЛИЗАЦИИ
1- И 2-АЛКИНИЛ- 9,10-АНТРАХИНОНОВ: НОВЫЕ
СИНТЕТИЧЕСКИЕ И МЕХАНИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

Обобщены новые (2005–2012 гг.) данные об особенностях и закономерностях каскадных реакций 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов с полифункциональными реагентами (гуанидин, мочевины, тиомочевина), а также реакций внутримолекулярной гетероциклизации *орто*-аминопроизводных 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов. Представлены механизмы новых реакций.

Ключевые слова: азотистые гетероциклы, алкины, 9,10-антрахинон, механизмы, перегруппировки, реакционная способность, циклизация.

Современный период развития органической химии можно смело назвать ренессансом химии ацетиленов. Авторы обзора [1] считают, что этот раздел химии "будет оставаться быстро развивающейся областью в течение нескольких следующих лет". Действительно, в последние три десятилетия возрастающий интерес к соединениям с тройными связями как к высокореакционноспособным полупродуктам многоцелевого назначения и перспективному классу соединений в поиске эффективных фармацевтических препаратов отмечен в обширной библиографии [2–7].

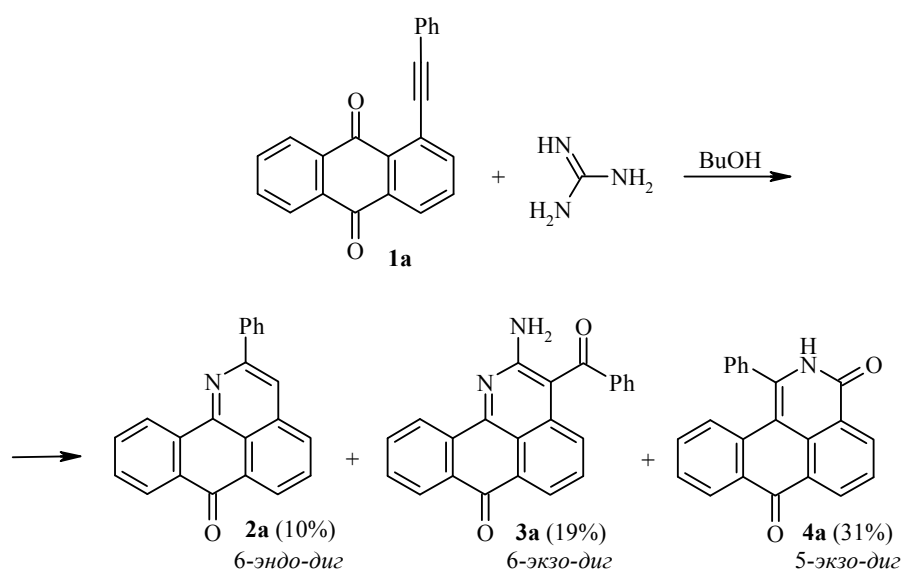
Широкое применение ацетиленов в органической химии связано с высокой степенью ненасыщенности тройной связи, обладающей уникальной реакционной способностью – склонностью к реакциям электрофильного, нуклеофильного, радикального и согласованного присоединения. Дополнительными синтетическими возможностями обладают активированные ацетилены, проявляющие повышенную реакционную способность в реакциях нуклеофильного присоединения.

При рассмотрении реакций присоединения неизбежно возникает вопрос о региоселективности процесса при наличии альтернативных путей. Обобщение литературных данных по изучению влияния внутренних (структура субстрата, природа заместителей) и внешних параметров (условия реакции, природа катализаторов) на регионаправленность реакций полинуклеофильных реагентов с активированными арил- и гетарилацетиленами со сближенными функциональными группами – актуальная проблема. Выявление закономерностей этих процессов будет способствовать углублённому пониманию реакционной способности соединений с тройной связью и пополнению массива данных правил Болдуина [8], объясняющих принципы направления циклизации при наличии альтернативных путей. Эта область органической химии вновь привлекает пристальное внимание учёных [9].

В настоящем обзоре представлена серия работ, посвящённых изучению реакций 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов с полифункциональными реагентами (гуанидин, мочевины, тиомочевина), а также реакций внутримолекуляр-

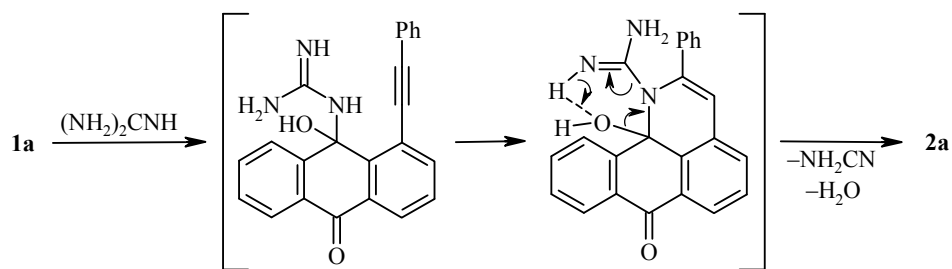
ной гетероциклизации *орто*-аминопроизводных 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов. Акцент сделан на особенностях механизмов указанных реакций. Последний обзор по химии алкинилпроизводных хинонов охватывает литературу до 2004 г. [7], в настоящей работе обобщаются данные 2005–2012 гг.

Реакционная способность 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов весьма чувствительна к изменению как внутренних (структурных) факторов, так и внешних условий. Это обстоятельство наряду с использованием азотистых полифункциональных реагентов в качестве нуклеофилов предопределяет возможность протекания многоканальных превращений. Действительно, интригующие результаты были получены при изучении взаимодействия 1-(фенилэтинил)-9,10-антрахинона (**1a**) с гуанидином в кипящем бутаноле [10]. Были обнаружены три продукта каскадных превращений: 2-фенил-7*H*-дibenзо[*de,h*]хинолин-7-он (**2a**), 2-амино-3-бензоил-7*H*-дibenзо[*de,h*]хинолин-7-он (**3a**) и 1-фенил-2*H*-дibenзо[*de,h*]изохинолин-3,7-дион (**4a**).

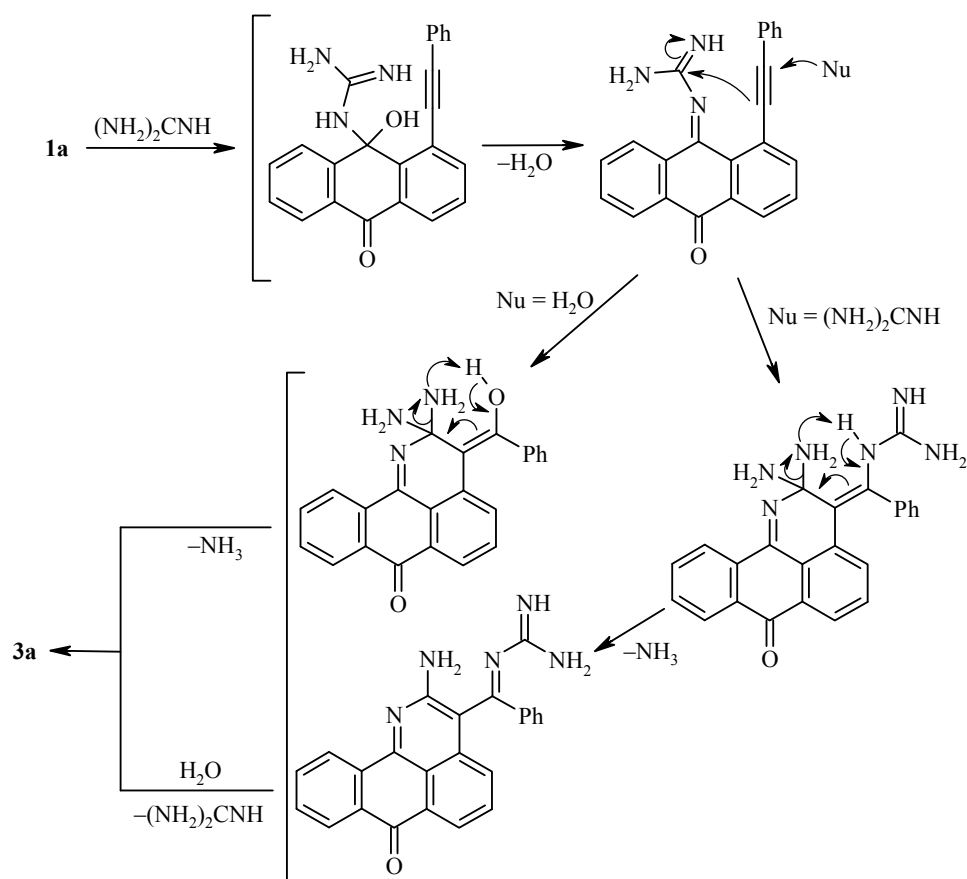


Две первые конденсированные системы **2a** и **3a** являются близкими аналогами апорфиноидных алкалоидов – продуктами 6-эндо-диг- и 6-экзо-диг-атаки соответственно. Особенно удивительным представляется образование изохинолин-3,7-дионового производного **4a** формально путём внедрения атома азота между атомами углерода тройной связи. Этот процесс сопровождается образованием шести (!) новых связей. В классических реакциях ацетиленовых соединений возникают, как правило, две или четыре новые связи. Образование же новых шести связей наблюдается лишь в реакциях, сопровождающихся деструкцией молекулы, например при окислении ацетилена с образованием двух молекул карбоновых кислот. Необходимо отметить, что это новая реакция в химии ацетилена.

По мнению авторов [10], формирование дibenзо[*de,h*]хинолин-7-она **2a** может реализоваться через присоединение гуанидина по карбонильной группе с последующей внутримолекулярной нуклеофильной атакой аминогруппы гуанидинового фрагмента по β-углеродному атому С≡С-связи (6-эндо-диг-циклизация) и элиминированием молекул H₂O и NH₂CN (или NH₂OH и HCN).

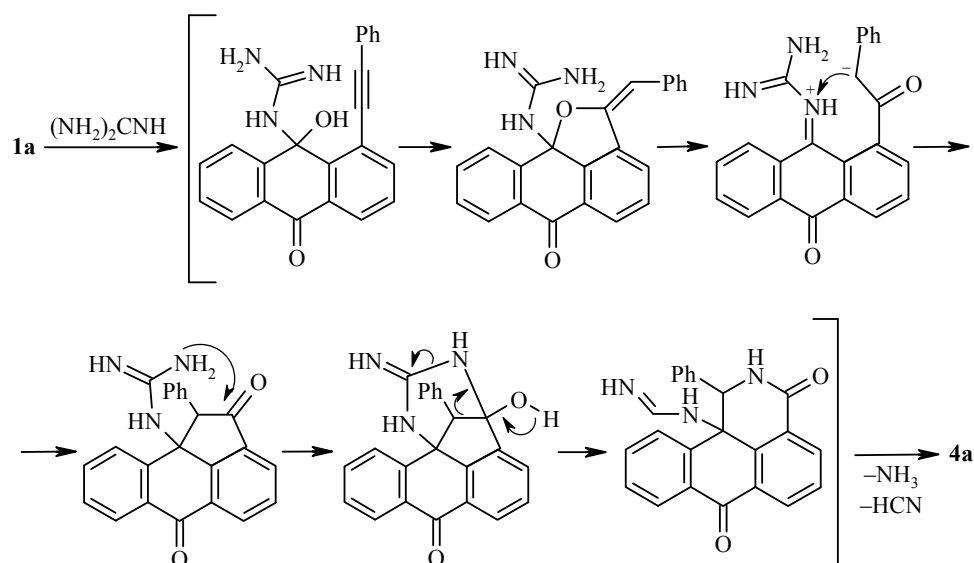


Процесс образования гетероцикла **3a** можно описать как серию последовательных реакций, где ключевой стадией является атака внешнего нуклеофила (воды или молекулы гуанидина) по β -углеродному атому $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи с синхронным 6-экзо-замыканием цикла при участии α -углеродного атома и электрофильного углерода гуанидинового фрагмента. Последующее элиминирование молекулы аммиака обеспечивает ароматизацию конечного продукта [10]. Этот тип гетероциклизации 1-алкинил-9,10-антрахинонов в 2-амино-3-ароил-7*H*-дibenзо[*de,h*]хинолин-7-оны ранее не был известен.

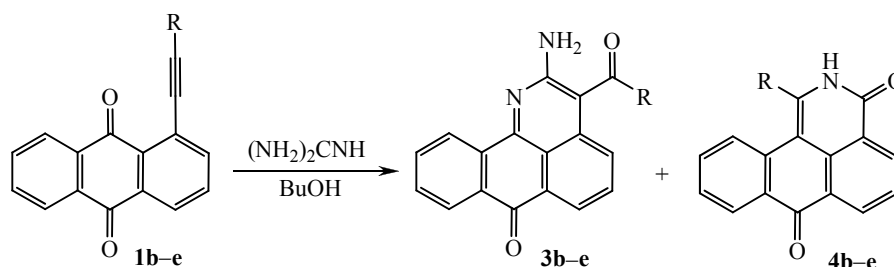


Образование изохинолин-3,7-диона **4a**, как полагают авторы [10], является результатом серии каскадных превращений, включающих присоединение гуанидина по карбонильному атому углерода с последующим 5-экзо-диг-замыканием фуранового кольца атакой OH-группы по α -углеродному атому тройной связи. Далее циклический интермедиат подвергается фрагментации/

рециклизации. Последующая атака NH_2 -группы по карбонильному атому углерода сопровождается образованием ещё одного цикла, а дальнейшие перегруппировка и элиминирование приводят к диону **4a**.

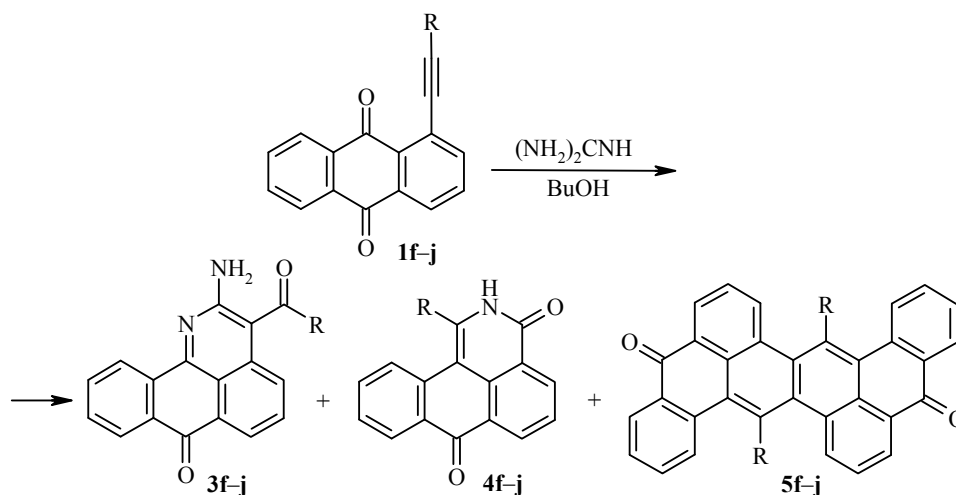


Углубленное изучение реакции гуанидина с 1-(R-этинил)-9,10-антрахинонами **1** показало, что направление реакции существенно зависит от природы заместителя R при $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи. Так, в реакциях гуанидина с антрахинонами **1b–e**, содержащими донорные заместители R, образуются не три, а два продукта, причем преимущественно или исключительно образуются 2-амино-3-ароил-7H-дibenзо[*de,h*]хинолин-7-оны **3b–e** (выходы 25–64%) [10, 11].



Соединение	R	Выход, %	
		соединения 3	соединения 4
1b	4- MeOC_6H_4	35	19
1c	1,5-Диметилпиразол-4-ил	25	19
1d	$\text{Me}_3\text{C}_6\text{H}_2$	33	–
1e	4- $\text{Me}_2\text{NC}_6\text{H}_4$	64	–

Для акцепторных заместителей наблюдается иная картина [12]. Взаимодействие алкинов **1f–j** с гуанидином в кипящем бутаноле даёт как ожидаемые продукты **3** и **4**, так и новые поликонденсированные соединения, не содержащие аннелированных гетероциклических ядер в своей структуре – 9,18-диарил(гетарил)тетрабензо[*a,de,j,mn*]тетрацен-4,13-дионы **5f–i** [10, 11].



Алкин	R	Выход, %		
		соединения 3	соединения 4	соединения 5
1f	4-BrC ₆ H ₄	32	18	12
1g	4-AcC ₆ H ₄	10	40	12
1h	Изохинолин-3-ил	–	35	24
1i	2-Пиридил	7	–	41
1j	4-O ₂ NC ₆ H ₄	–	43	–

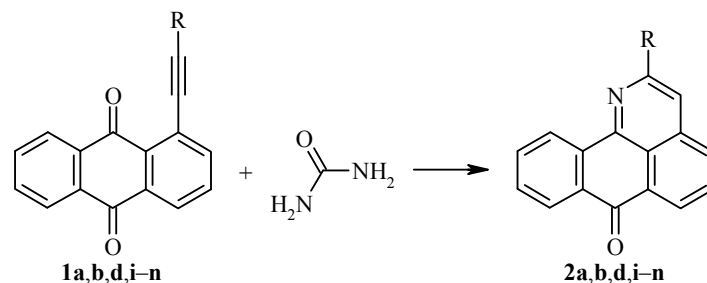
Среди гетероциклических продуктов реакции гуанидина с алкинами **1g–j** наблюдается преобладание дибензо[*de,h*]изохинолин-3,7-дионов **4g–j**, в то время как для **1b–e** они являются минорными продуктами. Только в случае алкина **1f** более предпочтительной оказалась 6-экзо-*dig*-циклизация, приводящая к хинолину **3f** (выход 32%), что характерно для алкинов с донорным заместителем при тройной связи. Возможно, это связано с +*M*-эффектом атома брома в исходном соединении. Низкая конверсия наблюдалась для субстрата **1i** с пиридинильным заместителем R. Он, единственный из соединений **1** с акцепторной функцией R, не приводил к образованию свойственного для них гетероцикла **4**, давая с выходом 7% аминокетон **3i** [12].

Но наиболее существенное различие в реакционной способности алкинил-антрахинонов с донорными и акцепторными группами при C≡C-связи проявилось в образовании ранее неизвестных поликонденсированных соединений **5f–i** (выходы 12–41%) в реакциях ацетиленов **1f–i** [12].

Открытые новые реакции алкинил-9,10-антрахинонов с гуанидином имеют не только важное теоретическое значение, но и представляют практический интерес, так как в большинстве случаев главным продуктом этих реакций являются 2-R-7*H*-добензо[*de,h*]хинолин-7-оны – близкие структурные аналоги апорфиноидных алкалоидов. Эти производные нашли широкое применение в качестве антираковых препаратов [13, 14].

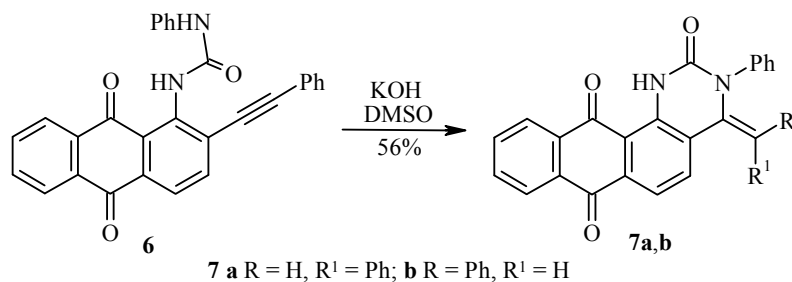
В связи с тем, что практическую значимость найденных реакций несколько снижает образование смеси продуктов, требующей хроматографического разделения, авторами обзора был предпринят поиск региоселективных методов, который завершился успехом. Было найдено, что реакция алкинов **1** с мочевиной в расплаве не только близка к требованиям зелёной химии, но и приводит исключительно к гетероциклам **2a–c, i–n** с выходами 50–87% [15]. Важным преимуществом найденного метода является не только высокая региоселек-

тивность процесса, но и его применимость к субстратам как с донорными, так и акцепторными заместителями при тройной связи. Простота проведения реакции, лёгкость выделения продуктов делают этот метод перспективным для направленного синтеза пиридинантронов **2**, проявляющих противораковую активность [13, 14] и повышенный эффект подавления ацетилхолинэстеразы [16].

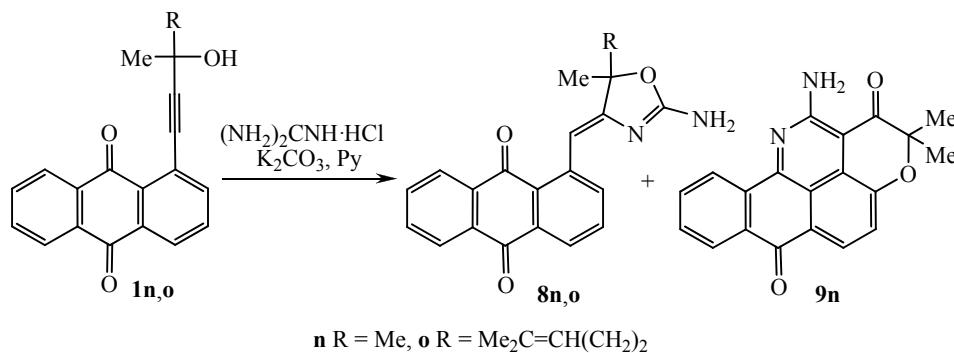


a R = Ph, **b** R = 4-MeOC₆H₄, **c** R = 1,5-диметилпиразол-4-ил, **i** R = 2-пиридил,
j R = 4-O₂NC₆H₄, **k** R = Bu, **l** R = C₃H₁₁, **m** R = CH₂OPh, **n** R = C(OH)Me₂

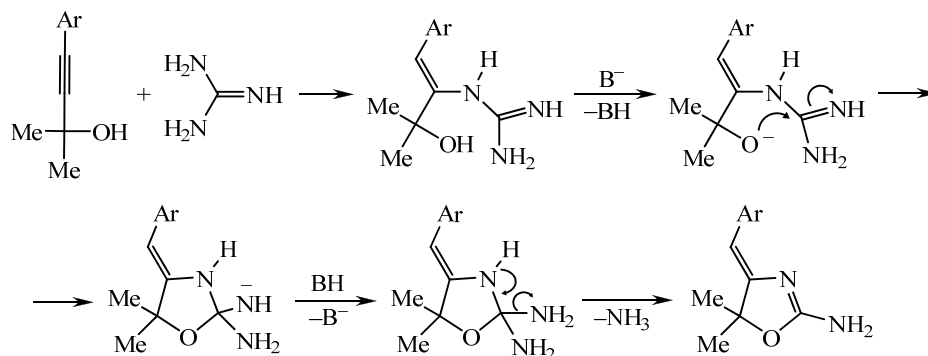
Внутримолекулярная реакция присоединения с участием фрагмента мочевины и *орто*-расположенной алкинильной группы соединения **6** протекает как *6-экзо-диг*-циклизация, приводя к образованию смеси *E*- и *Z*-нафтохиназолинов **7a,b** (*E:Z* = 7:2) [17].



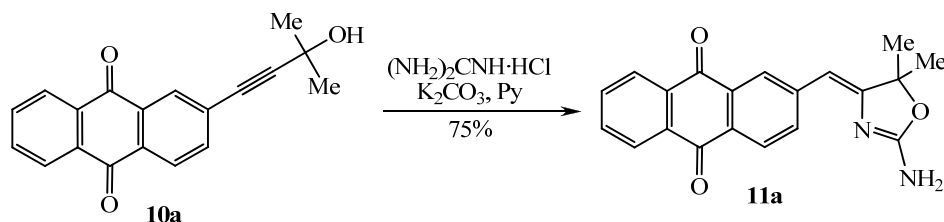
Интересные результаты получены при исследовании реакционной способности 9,10-антрахинонов, содержащих фрагменты пропаргиловых спиртов. Показано, что такие превращения носят более сложный характер и в процесс гетероциклизации вовлекается не только *перу*-карбонильная, но и гидроксильная группа. Так, при взаимодействии 1-(3'-гидрокси-3'-метилбутин-1'-ил)-9,10-антрахинона (**1n**) и его олефинового аналога **1o** с (NH₂)₂CNH·HCl в кипящем пиридине в присутствии K₂CO₃ (16–60 ч) происходит образование оксазолиденметилантрахинонов **8n,o** (выходы 75 и 53% соответственно). При этом в случае алкина **1n** был выделен также в небольшом (7%) количестве бензо[*h*]хромено[4,5,6-*cde*]хинолин **9n** [18].



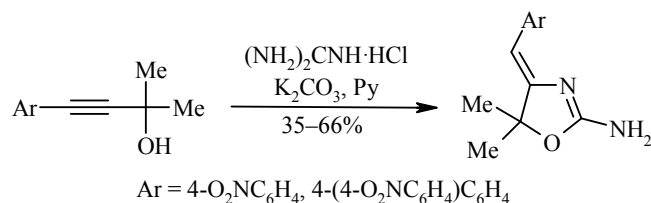
Благодаря α -гидроксильной группе алкинового остатка, реализуется новый тип гетероциклизации – образование арилметилен-2-оксазолина **8**, который становится основным процессом, а аннелирование к антрахиноновому ядру – минорным. Возможный маршрут превращения **1**→**8** включает присоединение гуанидина по активированной $C\equiv C$ -связи с последующим образованием алколят-аниона (под действием основания), его атаку на атом углерода, несущий частичный положительный заряд, и элиминирование NH_3 [18].



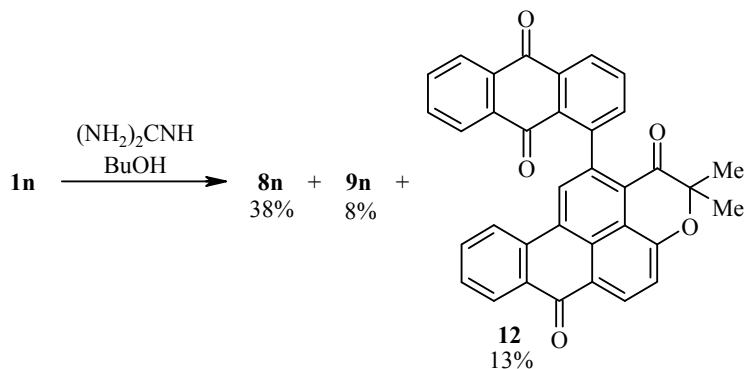
В поисках селективного пути реакции в неё был вовлечен 2-(3'-гидрокси-3'-метилбутин-1'-ил)-9,10-антрахинон (**10a**), в котором алкинильная группа удалена от $C=O$ -группы. Действительно, в этом случае реакция спирта **10a** с гуанидином приводила к одному продукту – 4-[(9,10-антрахинон-2-ил)метилен]-5,5-диметил-4,5-дигидрооксазол-2-амину (**11a**), выход которого составил 75% [18].



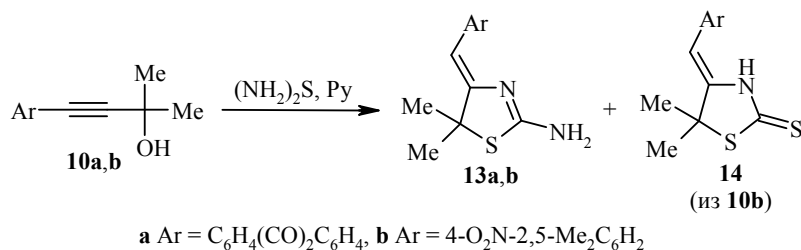
Следует отметить, что эта циклизация может быть распространена и на простые активированные ароматические производные алкиновых спиртов [18].



Выявлено, что в реакции соединения **1n** с гуанидином важную роль играет природа растворителя и основания. Если в этой реакции вместо смеси $(NH_2)_2CNH\cdot HCl$ с K_2CO_3 использовать спиртовой раствор свободного основания гуанидина, то помимо гетероциклов **8n** и **9n** образуется также 12-(9,10-антрахинон-1-ил)-2,2-диметил-2H-фенантро[2,1,10-def]хромен-1,6-дион (**12**) [19].



Интересным представляются результаты исследования реакционной способности активированных ацетиленовых спиртов с тиомочевинной, поскольку в одном реагенте присутствуют два разнохарактерных нуклеофильных центра: атомы азота и серы. Показано, что реакция спирта **10a** с тиомочевинной приводит к образованию 4-[(9,10-антрахинон-2-ил)метилен]-5,5-диметил-4,5-дигидро-2-тиазол-2-амин (**13a**) с выходом 38% [20]. В случае другого активированного субстрата **10b** образовались тиазолин **13b** (выход 37%) и 4-(2,5-диметил-4-нитробензилиден)-5,5-диметилтиазолидин-2-тион (**14**) (выход 10%).



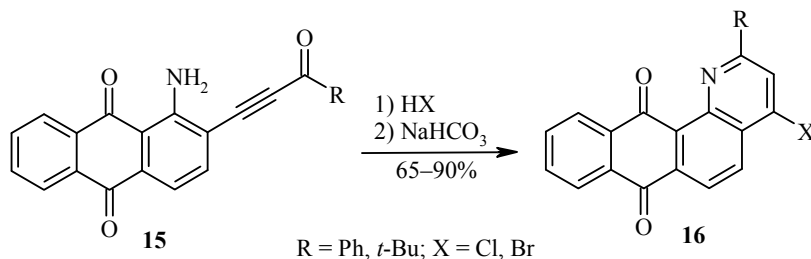
Следует отметить, что для медицинской химии тиазолиновые соединения представляют значительный интерес, поскольку некоторые антибиотики содержат этот структурный фрагмент [21].

Таким образом, результаты серии работ, посвящённых изучению закономерностей и особенностей реакционной способности 1- и 2-алкинил-9,10-антрахинонов с полифункциональными реагентами вносят определённый вклад в правила циклообразования Болдуина и открывают путь к синтезу тиазолинов, оксазолинов и конденсированных гетероциклов, многие из которых имеют хорошие перспективы как потенциальные лекарственные средства.

Рассмотренные выше реакции представляют собой примеры межмолекулярного нуклеофильного присоединения по C≡C-связи, приводящие к различным азотистым гетероциклам.

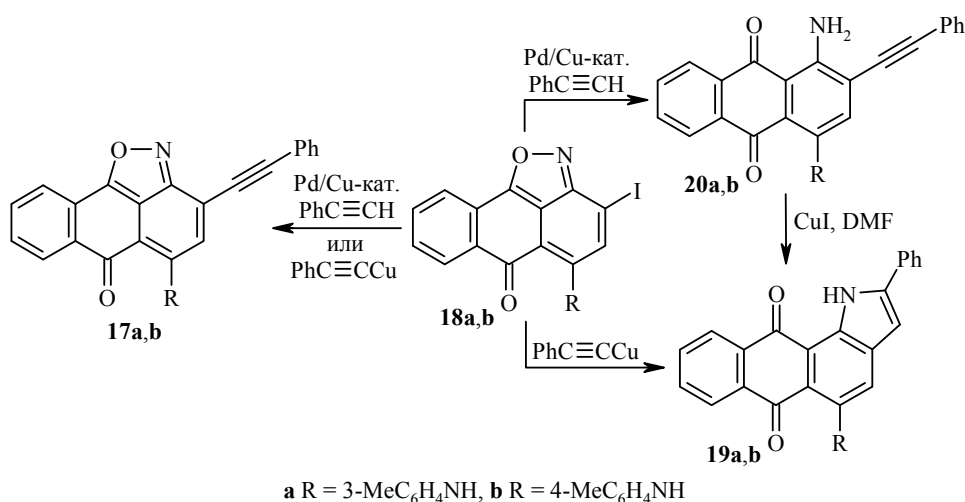
Другие не менее важные реакции внутримолекулярного электрофильного присоединения вициально функционализированных этиниларенов (гетаренов) также часто используют для направленного синтеза аннелированных гетероциклов, в том числе биологически активных [6].

Так, в работе [22] описана циклизация *вици*-аминоалкинилантрахинонов **15**, приводящая к аннелированию пиридинового цикла **16**.



Анализируя литературу последних 10–20 лет, можно отметить, что одним из наиболее рациональных подходов к получению высокоэффективных препаратов является синтез синтетических или природных гибридов, включающих два или более структурных фрагмента различных типов.

В работе [23] сообщается о попытке синтеза конъюгата, который сочетает элементы ацетиленовых структур, проявляющих антираковую активность [4], и аннелированных 9,10-антрахиноидных циклов, способных включаться в двойную спираль ДНК [24]. Однако при попытке синтезировать ацетиленовые производные антраизоксазола **17a,b** из 2-иодпроизводных **18a,b** и $\text{PhC}\equiv\text{CCu}$ в условиях реакции Кастро (Py, 115 °C, 6 ч) были получены неожиданные продукты каскадных превращений – 5-R-1H-нафто[2,3-g]индол-6,11-дионы **19a,b** (выходы 66 и 74% соответственно) [23].

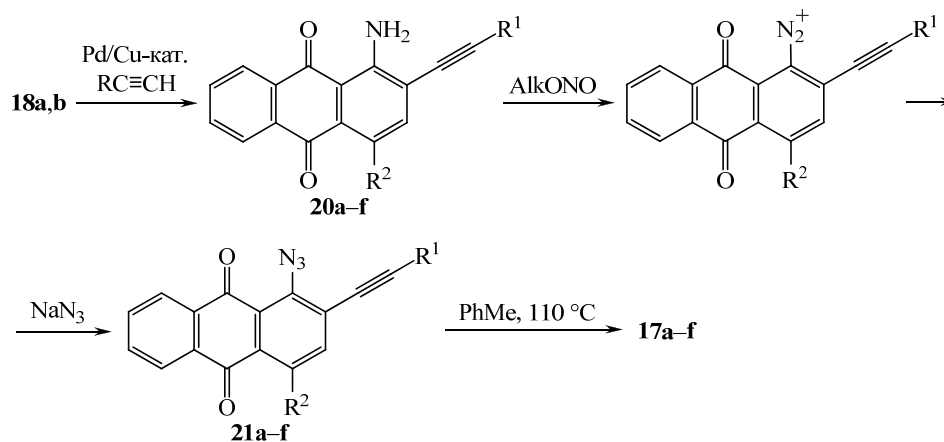


Было установлено, что образование нафтоиндолов **19a,b** можно рассматривать как 3-стадийный процесс, который включает Cu-катализируемое восстановительное раскрытие изоксазольного кольца, кросс-сочетание промежуточного *виц*-аминогалогенида с ацетиленом меди и нуклеофильное присоединение NH_2 -группы по $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи в аминоацетилене **20a,b** на заключительной стадии [23].

Для подтверждения этой схемы реакцией Соногаширы были синтезированы возможные промежуточные ацетилены **20a,b** (выходы 65 и 86%). ТСХ реакционной смеси конденсации Кастро иодидов **18a,b** с фенилацетиленом меди показала, что амины **20a,b** действительно образуются в ходе реакции. Дополнительно их участие на заключительной стадии подтверждено циклизацией аминов **20a,b** под действием CuI в ДМФА в 5-R-1H-нафто[2,3-g]-индол-6,11-дионы **19a,b** (выходы 97% и 58% соответственно) [23].

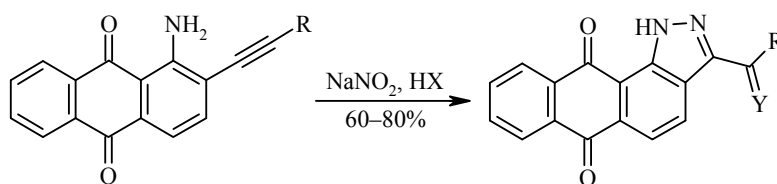
Циклизация протекала в течение 2 ч даже при 50 °С в ДМФА в присутствии CuI. Этот экспериментальный факт опровергает результаты Шварцберга с соавторами [7], которые, ссылаясь на собственные данные, утверждали, что вицинальные 1-амино-2-ацетиленил- и 2-амино-1-ацетиленил-9,10-антрахиноны "претерпевают внутримолекулярную циклизацию в присутствии ацетиленида меди или порошкообразной меди (но не галогенидов Cu(I)) в пиридине или ДМФА при 80–153 °С с образованием нафтоиндолдионов".

В связи с неудачной попыткой применения реакции Кастро в синтезе алкилнлантраизоксазолов был использован альтернативный путь, включающий получение 1-амино-2-алкинил-9,10-антрахинонов **20a–f**, диазотирование, замену диазогруппы на азидную (образование азидов **21a–f**) и циклизацию последних в целевые 3-(R-этинил)-6H-антра[1,9-*cd*]изоксазол-6-оны **17a–f** [25].



- a** R¹ = Ph, R² = 3-MeC₆H₄NH; **b** R¹ = Ph, R² = 4-MeC₆H₄NH;
c R¹ = CMe₂OH; R² = 3-MeC₆H₄NH; **d** R¹ = CMe₂OH; R² = 4-MeC₆H₄NH;
e R¹ = 2,3,5,6-Me₄C₆H; R² = 4-MeC₆H₄NH; **f** R¹ = CH₂OPh; R² = 4-MeC₆H₄NH

Успех этого подхода очевиден, так как известно, что реакции диазониевых солей *вици*-алкинил-9,10-антрахинонов могут идти в нежелательном направлении – в сторону образования аннелированных пиразолов [26]. К тому же солям диазония на основе этиниларенов свойственна циклизация в соответствующие конденсированные диазины [27].

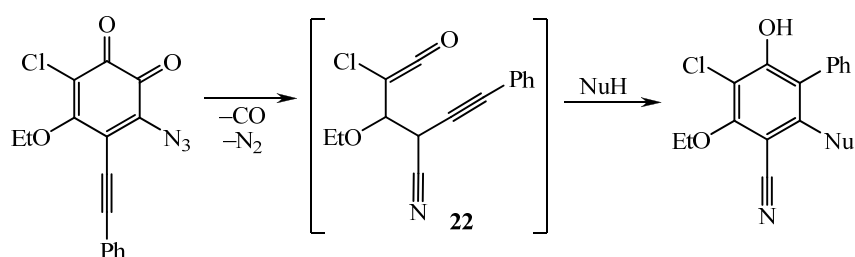


R = Ph, C₆H₅, COBu-*t*, COPr, H, Bu, CH₂OPh, C₆H₁₀OH; X = Cl⁻, HSO₄⁻; Y = O, Cl₂

Избежать нежелательных реакций и получить целевые 3-(R-этинил)-6H-антра[1,9-*cd*]изоксазол-6-оны **17**, по мнению авторов [25], позволило быстрое прибавление NaN₃ к диазониевой соли 2-алкинил-9,10-антрахинона и лёгкость замещения диазогруппы на азидную. При этом исходные 1-амино-2-алкинил-9,10-антрахиноны **20a–f** были получены из соответствующих 2-галогенопроизводных по реакции Соногаширы с терминальными ацетиленами, несущими как донорные, так и акцепторные заместители (выходы 75–85%).

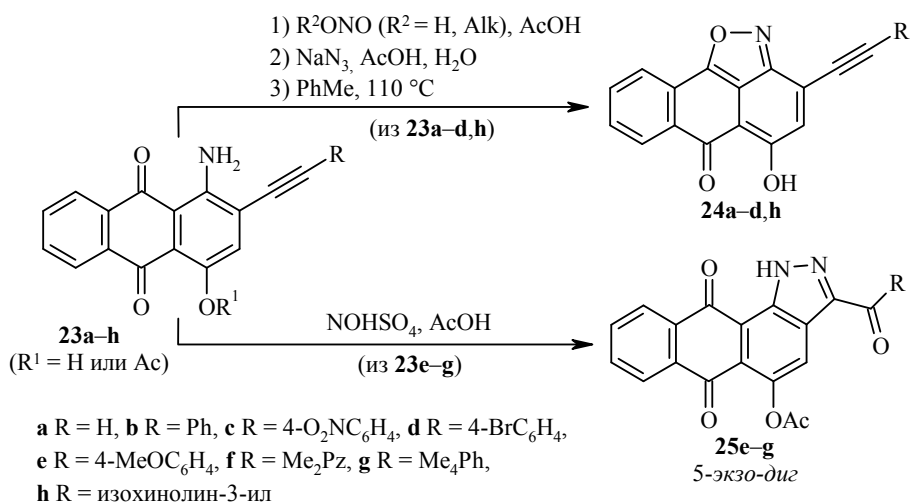
Амины **20a–f** диазотировали амилнитритом или изопропилнитритом в ледяной АсОН при комнатной температуре в течение 0.5–2.0 ч. Только для пространственно-затруднённого дурольного производного потребовалась повышенная температура реакции (50 °С, 2 ч). Азиды **21a–f** были получены с выходами 64–94%.

Успех в осуществлении завершающей стадии – термической циклизации азидов **21** в изоксазолы **17** – не был очевиден заранее. Известно, что азиды с вицинальными ацетиленовыми группами в ряду хинонов весьма лабильны и при термической обработке генерируют высокореакционноспособные кетены **22**. Последние при взаимодействии с внешними нуклеофильными реагентами (например растворителем) превращаются в замещённые фенолы [28–31]. Однако циклизация азидов **21a–f** в кипящем толуоле успешно завершалась в течение 5–15 мин, выходы 3-алкинил-6*H*-антра[1,9-*cd*]изоксазол-6-онов **17a–f** составляли 67–93%.



Для выявления общности такого подхода к синтезу алкинил-6*H*-антра[1,9-*cd*]изоксазол-6-онов авторами [25] была изучена реакция диазотирования других производных 1-амино-2-этинил-9,10-антрахинона, в частности содержащих гидроксильную группу в положении 4 антрахинонового кольца и разнохарактерные заместители в ацетиленовом остатке. Отмечено, что диазотирование 4-гидроксипроизводных **23** проходит с осмолением, поэтому гидроксильная группа была избирательно ацилирована в присутствии NH_2 -группы уксусным ангидридом в пиридине [32].

Диазотирование аминов **23a–d,h** как NOHSO_4 , так и амилнитритом с последующим действием NaN_3 на раствор соли диазония приводит к азидам. Последние, в свою очередь, при кипячении в толуоле в течение 20–40 мин циклизуются в изоксазолантроны **24a–d,h** без затрагивания $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи [32].



Реакция диазотирования субстратов **23e–g** с электронодонорными заместителями при тройной связи протекает по принципиально иному пути, чем для соответствующих акцепторных аналогов. В частности, их взаимодействие с NOHSO_4 (или амилнитритом) ведёт к образованию не изоксазолов, а индазолов **25e–g** через нуклеофильную атаку ацетиленового остатка на концевой атом азота diaзониевой группы. При этом ацетильная группа сохраняется в продукте реакции [32].

В работе [25] приведены квантово-химические расчёты, иллюстрирующие важную роль поляризации $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи и селективную стабилизацию переходных состояний в электрофильной циклизации алкинов. Отмечается существенная роль содействия внешнего нуклеофила (H_2O) на стабильность переходных состояний.

Таким образом, изучение диазотирования 2-алкинил-1-амино-4-гидрокси-(ацилокси)-9,10-антрахинонов **23** показало, что направление реакций весьма чувствительно к природе заместителей как в алкиновой, так и в антрахиноновой частях молекулы. Донорные заместители (NHAr , OH) в положении 4 антрахинонового кольца стабилизируют diaзониевую соль. Этот эффект позволяет заместить diaзониевую группу азидной с последующим замыканием изоксазольного цикла и сохранением $\text{C}\equiv\text{C}$ -связи. В противоположность этому 5-экзо-диг-циклизация в пиразолы наблюдается при наличии ацетоксигруппы в положении 4 и донорных заместителей в алкиновом фрагменте [32].

Таким образом, представленный в обзоре материал демонстрирует высокий синтетический потенциал ацетиленовых производных 9,10-антрахинона в направленном синтезе труднодоступных полигетероциклических систем, перспективных в поиске биологически активных соединений. Кроме того, понимание закономерностей гетероциклизации алкинил-9,10-антрахинонов имеет фундаментальное значение для решения стержневых вопросов строения молекул и реакционной способности.

Авторы надеются, что настоящий обзор привлечёт внимание коллег-химиков к исследованию многоликой химии ацетилена, которая принесёт ещё немало удивительных открытий в фундаментальных и прикладных сферах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-03-00257а), СО РАН (межкакадемический интеграционный проект № 51) и Химического сервисного центра СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Chinchilla, C. Najera, *Chem. Rev.*, **107**, 874 (2007).
2. С. Ф. Василевский, Л. Ф. Семенова, В. А. Агафонова, *XTC*, 1584 (2010). [*Chem. Heterocycl. Compd.*, **46**, 1283 (2010).]
3. S. F. Vasilevsky, B. Gold, T. F. Mikhailovskaya, I. V. Alabugin, *J. Phys. Org. Chem.*, **25**, 998 (2012).
4. V. M. Dembitsky, D. O. Levitsky, *Nat. Prod. Commun.*, **1**, 405 (2006).
5. R. C. Larock, *Acetylene Chemistry: Chemistry, Biology and Material Science*, F. Diederich, P. J. Stang, R. R. Tykwinski (Eds.), Wiley-VCH, 2005.
6. S. F. Vasilevsky, E. V. Tretyakov, J. Elguero, *Adv. Heterocycl. Chem.*, **82**, 1 (2002).
7. М. С. Шварцберг, И. И. Барабанов, Л. Г. Феденок, *Успехи химии*, **73**, 171 (2004).

8. J. E. Baldwin, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **18**, 734 (1976).
9. K. Gilmore, I. V. Alabugin, *Chem. Rev.*, **111**, 6513 (2011).
10. S. F. Vasilevsky, D. S. Baranov, V. I. Mamatyuk, Y. V. Gatilov, I. V. Alabugin, *J. Org. Chem.*, **74**, 6143 (2009).
11. Д. С. Баранов, С. Ф. Василевский, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1008 (2010).
12. Д. С. Баранов, Дис. канд. хим. наук, Новосибирск, 2010.
13. H. Tang, X.-D. Wang, Y.-B. Wei, S.-L. Huang, Z.-S. Huang, J.-H. Tan, L.-K. An, J.-Y. Wu, A. S.-C. Chan, L.-Q. Gu, *Eur. J. Med. Chem.*, **43**, 973 (2008).
14. Y. D. Min, S. U. Choi, K. R. Lee, *Arch. Pharm. Res.*, **29**, 627 (2006).
15. D. S. Baranov, S. F. Vasilevsky, B. Gold, I. V. Alabugin, *RSC Adv.*, **1**, 1745 (2011).
16. H. Tang, F.-X. Ning, Y.-B. Wei, S.-L. Huang, Z.-S. Huang, A. S.-C. Chan, L.-Q. Gu, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **17**, 3765 (2007).
17. В. А. Савельев, В. А. Лоскутов, *XFC*, 791 (1991). [*Chem. Heterocycl. Compd.*, **27**, 621 (1991).]
18. D. S. Baranov, A. A. Ryabichev, V. I. Mamatyuk, Y. V. Gatilov, V. G. Kartsev, S. F. Vasilevsky, *Mendeleev Commun.*, **22**, 114 (2012).
19. D. S. Baranov, S. F. Vasilevsky, V. I. Mamatyuk, Y. V. Gatilov, *Mendeleev Commun.*, **19**, 326 (2009).
20. Д. С. Баранов, В. И. Маматюк, Ю. В. Гатиллов, С. Ф. Василевский, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1554. (2012).
21. A.-C. Gaumont, M. Gulea, J. Levillain, *Chem. Rev.*, **109**, 1371 (2009).
22. M. S. Shartsberg, E. A. Kolodina, *Mendeleev Commun.*, **18**, 109 (2008).
23. S. F. Vasilevsky, L. M. Gornostaev, A. A. Stepanov, E. V. Arnold, I. V. Alabugin, *Tetrahedron Lett.*, **48**, 1867 (2007).
24. T. Tuttle, E. Kraka, D. Cremer, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 9469 (2005).
25. A. A. Stepanov, L. M. Gornostaev, S. F. Vasilevsky, E. V. Arnold, V. I. Mamatyuk, D. S. Fadeev, B. Gold, I. V. Alabugin, *J. Org. Chem.*, **76**, 8737 (2011).
26. M. S. Shvartsberg, I. D. Ivanchikova, L. G. Fedenok, *Tetrahedron Lett.*, **35**, 6749 (1994).
27. E. V. Tretyakov, D. W. Knight, S. F. Vasilevsky, *J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1*, 3721 (1999).
28. N. V. Nguyen, H. W. Moore, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, 1066 (1984).
29. N. V. Nguyen, K. Chow, H. W. Moore, *J. Org. Chem.*, **52**, 1315 (1987).
30. N. V. Nguyen, K. Chow, J. O. Karlsoon, R. Doedens, H. W. Moore, *J. Org. Chem.*, **51**, 419 (1986).
31. H. W. Moore, K. Chow, N. V. Nguyen, *J. Org. Chem.*, **52**, 2530 (1987).
32. М. С. Соколова, В. А. Береснев, О. И. Каргина, Л. М. Горностаев, *Журн. орган. химии*, **44**, 1654 (2008).

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
ул. Институтская, 3, Новосибирск 630090, Россия
e-mail: vasilev@kinetics.nsc.ru

Поступило 11.10.2011