

И. С. Белостоцкая, В. Б. Вольева, Н. Л. Комиссарова

ГЕТЕРОЦИКЛЫ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЗАТРУДНЕННЫХ ФЕНОЛОВ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ

(ОБЗОР)

Обобщены литературные данные по синтезу гетероциклических соединений (производных дибензофурана, феноксазина, бенздиоксолана и др.) на основе пространственно-затрудненных 6-замещенных 2,4-ди-*трет*-бутилфенолов, 6-гидрокси-2,4- и -2,5-ди-*трет*-бутилфенолов и их редоксопроявленных *орто*-бензохинонов.

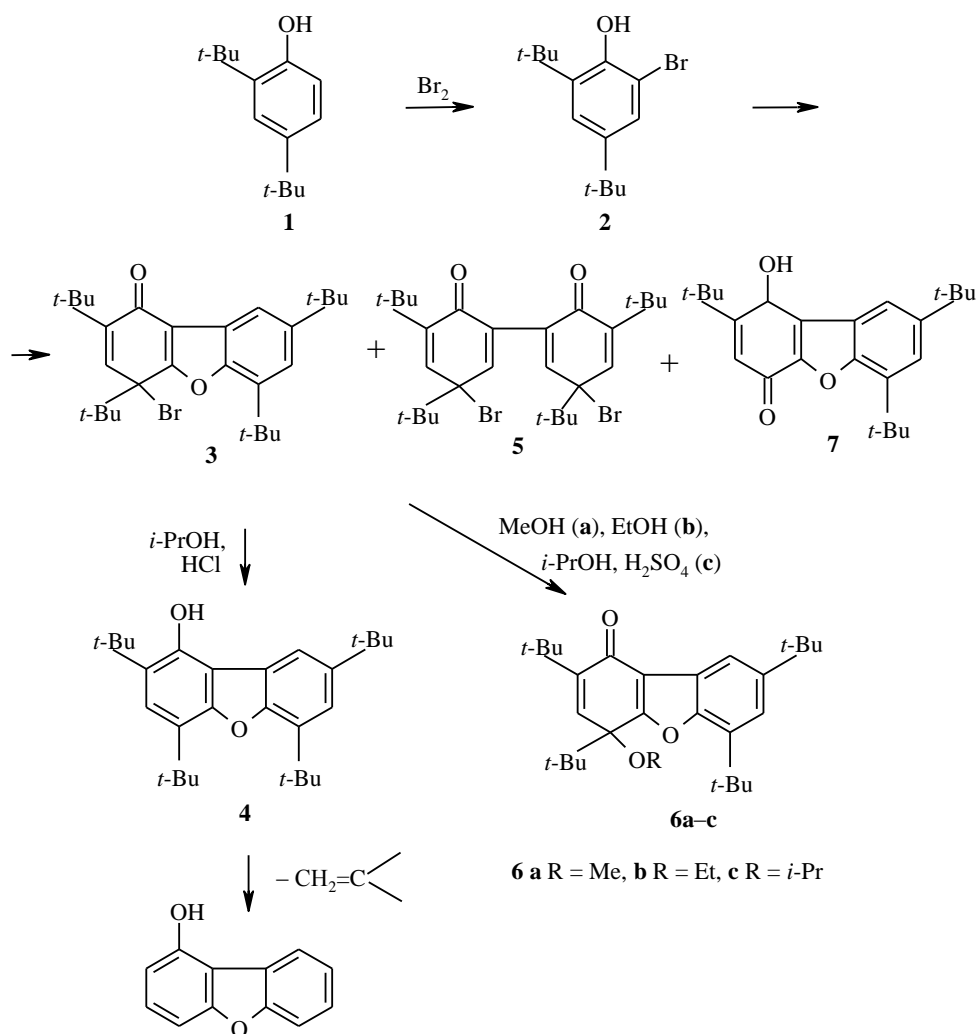
Ключевые слова: бенздиоксолан, бензоксазин, ди-*трет*-бутил-*орто*-бензохиноны, дибензофуран, 6-замещенные 2,4- и -2,5-ди-*трет*-бутилфенолы, феноксазин, гетероциклизация.

Введение *трет*-бутильных групп в молекулу фенола существенно влияет на реакционную способность, вследствие изменения редокspotенциала и стерических эффектов. Увеличивается селективность процессов, становятся возможными превращения, не характерные для незамещенных аналогов. Так, в реакциях 2,4- и 2,5-ди-*трет*-бутилфенолов, содержащих в положении 6 дополнительные заместители (Br, NH₂, OH, CH₂NR₂), обнаруживается тенденция к гетероциклизации с образованием производных дибензофурана, феноксазина, бенздиоксазинов. Конкретные примеры превращений, приводящих к гетероциклическим соединениям, суммированы в настоящем обзоре. Следует подчеркнуть, что исследование гетероциклизации замещенных фенолов представляет несомненный практический интерес, так как открывает новые синтетические возможности. Кроме того, оно дает информацию, необходимую для установления механизмов активности фенолов, используемых в качестве биоантиоксидантов, лекарственных препаратов и средств защиты растений.

1. Превращения 2,4-ди-*трет*-бутилфенола с образованием дибензофуранов

Обнаружено, что превращения 2,4-ди-*трет*-бутилфенола (**1**) в результате бромирования и окисления в различной последовательности являются удобным путем получения дибензофурана, гидрокси- и дигидроксибензофуранов и родственных производных.

Вариант "бромирование–окисление" включает синтез 6-бром-2,4-ди-*трет*-бутилфенола (**2**) и его окисление триацетатом марганца в протонных средах (AcOH, ROH) [1] по схеме:

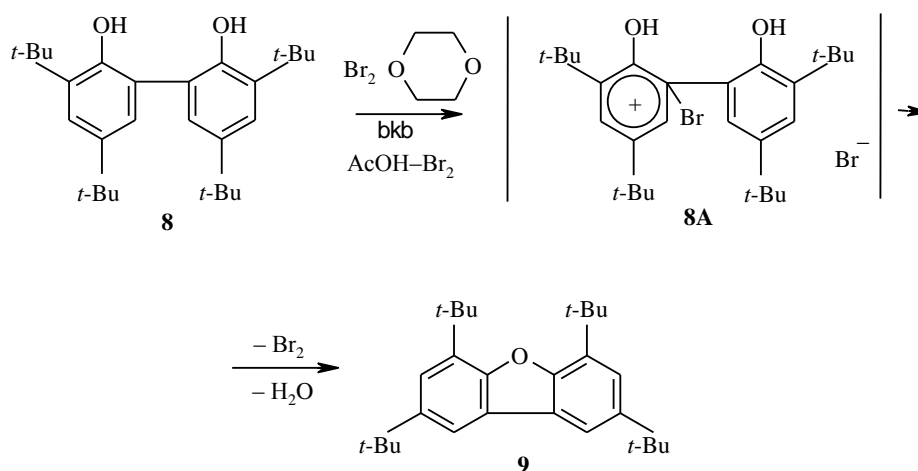


Состав продуктов окисления, выход ключевого хинобромида **3** и селективность процесса зависят от природы растворителя и добавок. В уксусной кислоте выход хинобромида **3** достигает ~60%, параллельно наблюдается образование бисхинобромида **5** и хинона **7**.

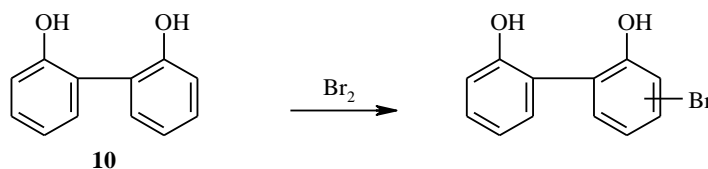
В метаноле и этаноле наряду с хинобромидом **3** образуются продукты его сольволиза – алкоксихинолиды **6a** и **6b**. Наиболее селективным является окисление в изопропиловом спирте, где достигается высокий выход хинобромида **3** и процесс не осложняется сольволизом. Дополнительным преимуществом изопропилового спирта является возможность его редокс-взаимодействия с хинобромидом, приводящего к гидроксидибензофурану **4**, что позволяет провести конверсию бромфенола **2** в гидроксидибензофуран **4** без разделения стадий: $2 \rightarrow [3] \rightarrow 4$. В чистом изопропиловом спирте восстановление протекает медленно, но резко ускоряется в присутствии HCl. Использование H₂SO₄ в качестве катализатора приводит к изменению пути реакции, и вместо восстановления в гидроксидибензофуран происходит образование изопропоксихинолида **6b**. Различие в поведении хинобромида **3** в системах *i*-PrOH—HCl и *i*-PrOH—H₂SO₄

является проявлением его двойственной реакционной способности в границах двух альтернативных типов нуклеофильного замещения: карбо- и галогенфильного.

Использование обратного порядка процедур – первоначального окисления фенола **1** в бисфенол **8** и последующего бромирования в различных условиях – приводит к образованию тетра-*трет*-бутилдибензофурана **9** [2]. Гетероциклизация под действием бромирующих агентов происходит как в растворах (AcOH–Br₂), так и в твердой фазе (при совместном растирании бисфенола **8** с диоксандибромидом) [3]. Процесс включает, по-видимому, образование и дегидродегалогенирование промежуточного σ -комплекса со структурой протонированного *орто*-хинобромида **8A**:



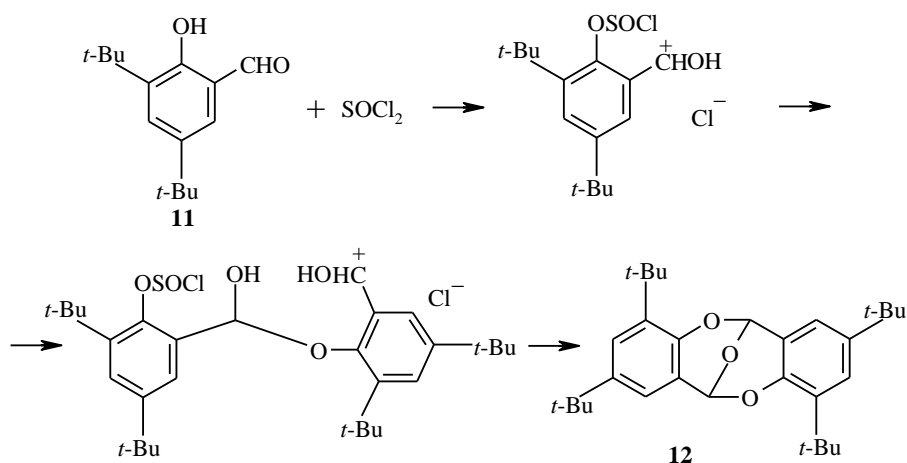
Механизм участия галогена в этом процессе можно назвать "фантомным бромированием", так как введения брома в конечный продукт реакции – дибензофуран – не происходит. Аддукт бисфенола с бромом выполняет функцию катализатора циклодегидратации, чрезвычайная легкость которой является, по-видимому, специфическим свойством тетра-*трет*-бутилбисфенола **8**. Незамещенный *орто*-бисфенол (**10**) в идентичных условиях подвергается бромированию, дибензофуран при этом не обнаруживается:



Естественно предположить, что *трет*-бутильные группы в тетра-*трет*-бутилбисфеноле обеспечивают позиционную защиту колец от галогенирования, а также стерическую защиту групп OH от участия в образовании межмолекулярных водородных связей, конкурирующих с внутримолекулярными.

2. Ангидродимеризация ди-*трет*-бутилсалицилового альдегида с образованием ди(2,4-ди-*трет*-бутилбензо)-2,6,9-триоксабицикло[3.3.1]нона-3,7-диена

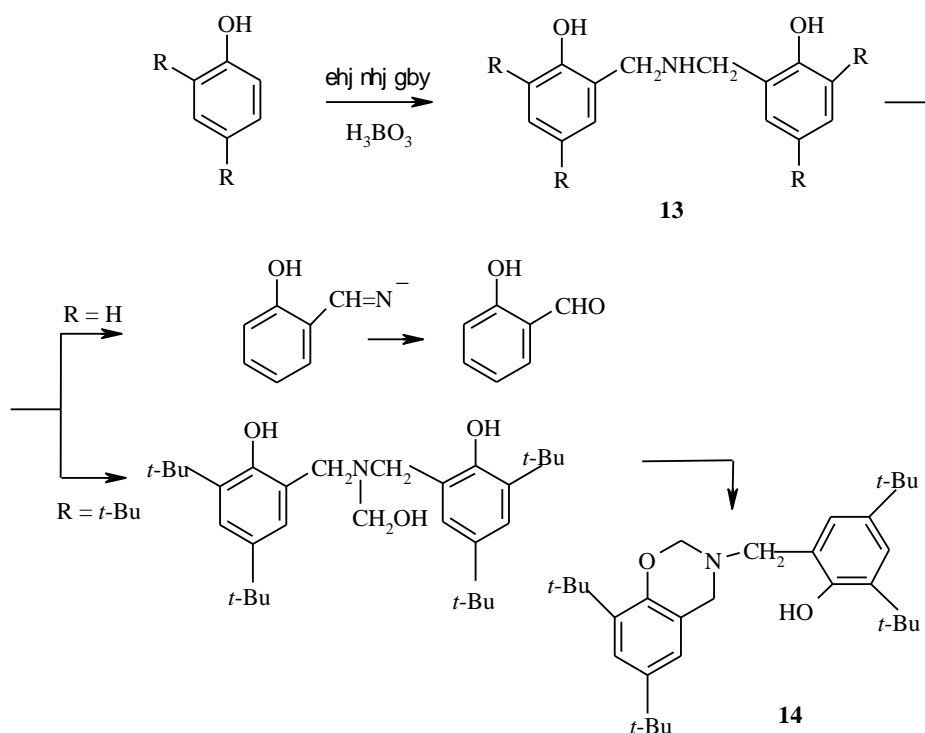
Интересный процесс циклодегидратации с предположительным участием катионоидных интермедиатов наблюдается при взаимодействии ди-*трет*-бутилсалицилового альдегида **11** с SOCl_2 и PCl_5 [4]. Ангидродимеризация осуществляется как в жидкой низконуклеофильной среде с высокой концентрацией исходного альдегида (раствор в SOCl_2 , соотношение альдегид– SOCl_2 , 1:1.5), так и в твердой фазе при растирании альдегида с небольшим избытком PCl_5 . Конденсация протекает, видимо, как поэтапный процесс, начинающийся с образования соответствующего арилового эфира. Вытесняемый протон гидроксильной группы в отсутствие внешнего конкурента акцептируется соседним карбонилем. Генерируемый при этом карбениевый интермедиат реагирует со второй молекулой альдегида, давая полуацеталь. Следующие стадии, дублирующие две предыдущие, завершают образование бициклической системы **12**:



Рентгеноструктурный анализ ангидродимера однозначно подтверждает структуру ди-(2,4-ди-*трет*-бутилбензо)-2,6,9-триоксабицикло[3.3.1]нона-3,7-диена (**12**).

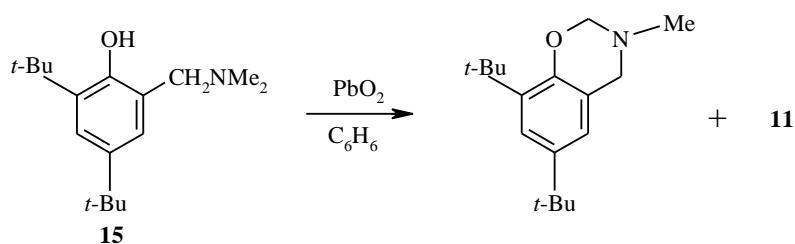
3. Гетероциклизация 2,4-ди-*трет*-бутил-6-диалкиламинометилфенолов

Тенденция к гетероциклизации обнаружена при разработке методов синтеза 2,4-ди-*трет*-бутил-6-формилфенола через 6-аминометильные производные. Один из наиболее удобных методов введения формильной группы в *орто*-положение фенолов основан на реакции Даффа – взаимодействии фенола с уротропином в присутствии H_3BO_3 в этиленгликоле. Реакция включает промежуточное образование дибензиламина **13**, трансформирующегося в основание Шиффа и далее в альдегид (см. схему). Однако в случае 2,4-ди-*трет*-бутилфенолов она протекает аномально и приводит к образованию производного бензоксазина **14** [5]:

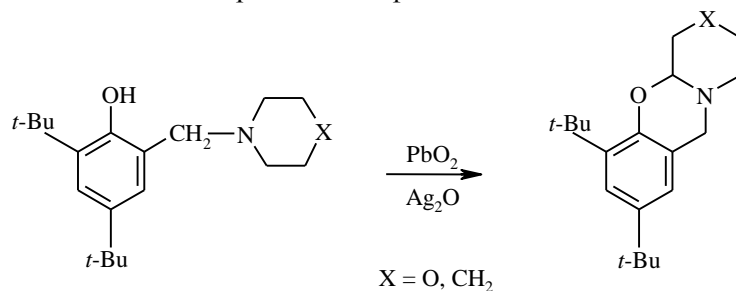


По-видимому, направление превращения изменяется на стадии дибензиламина **13**, который при $R = \text{CMe}_3$ постадийно гидроксиметилируется по атому азота и конденсируется с образованием бензоксазина **14**.

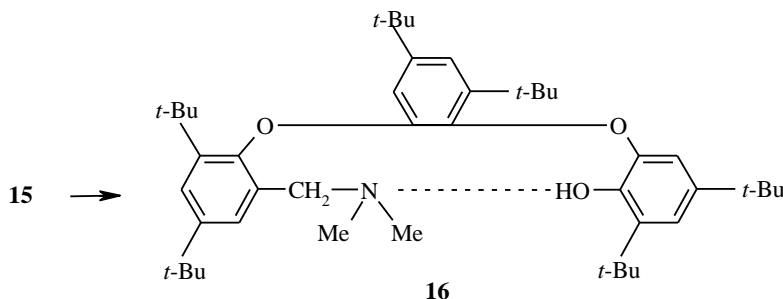
Родственные процессы, приводящие к образованию замещенных бензоксазинов, оказались характерными также для редокс-превращений 2,4-ди-*трет*-бутил-6-диалкиламинометилфенолов [6]. Так, дегидрогетероциклизация превалирует над альтернативным бензильным окислением PbO_2 2,4-ди-*трет*-бутил-6-диметиламинометилфенола (**15**):



Аналогично (с участием гидроксильной группы и атома α -углерода при атоме азота) протекает окислительная конденсация 2,4-ди-*трет*-бутил-6-морфолилметил- и 6-пиперидилметилфенолов:

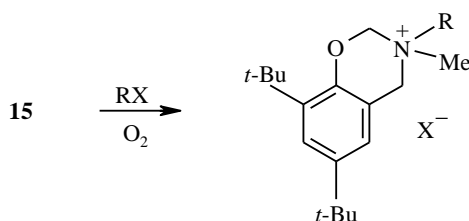


Необычное квазигетероциклическое соединение **16** образуется в результате окислительной тримеризации с частичной фрагментацией соединения **15** под действием $Mn(OAc)_3$:



По-видимому, в этом случае возможен матричный эффект за счет координации $Mn(III)$ и исходного аминометилфенола как бидентантного лиганда, в результате которой окислительная тримеризация происходит с потерей двух диалкиламинометильных заместителей и образованием квазигетероциклического соединения **16**, строение которого установлено методом РСА. Существенным элементом структуры, позволяющим рассматривать ее как макроциклическую, является водородная связь между протоном группы OH и атомом азота диалкиламинометильного заместителя. Обнаружено также, что при кристаллизации это соединение дает стабильные сольваты, в которых между двумя молекулами макроцикла включается молекула растворителя. Определяющая роль $Mn(III)$ как координирующего окислителя, обеспечивающего участие трех молекул окисляемого субстрата в наблюдаемой окислительной гетероциклизации, подтверждена специальным экспериментом, в котором избыток конкурентного комплексообразователя – $Mn(II)$ – блокирует тримеризацию. В системе **15**– $Mn(III)$ – $Mn(II)$, 1:1:5, наблюдается образование только альдегида **11** и его частичное превращение в 3,5-ди-*трет*-бутил-*орто*-бензохинон.

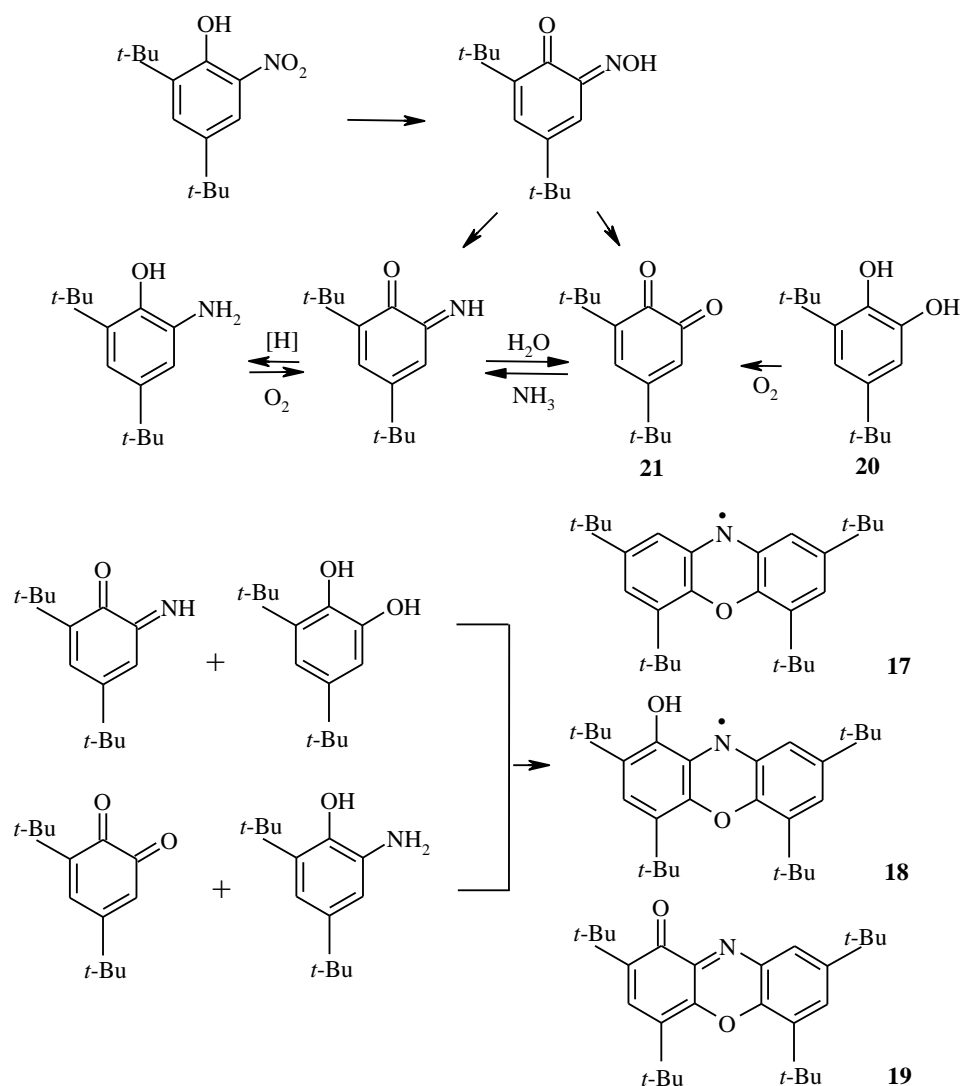
Интересно отметить, что при исследовании кватернизации диалкиламинометилфенолов под действием RBr с участием атмосферного кислорода в качестве окислителя обнаружена спонтанная дегидрогетероциклизация с образованием кватернизованных производных соответствующих бензоксазинов, например:



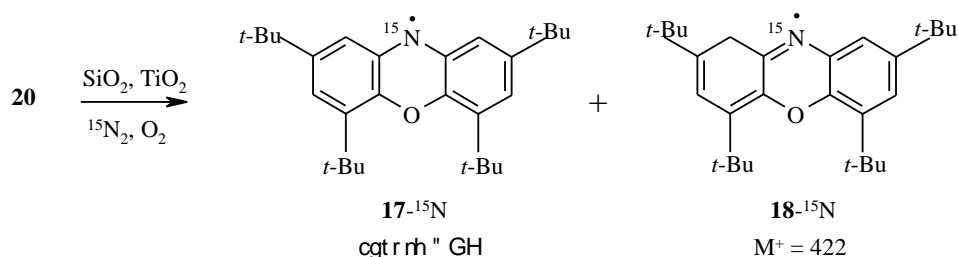
Происходящие при этом процессы исследованы методом ЯМР 1H .

4. Образование гетероциклических соединений в реакциях 2,4- и 2,5-ди-*трет*-бутил-6-нитро-(амино-, гидрокси-)фенолов

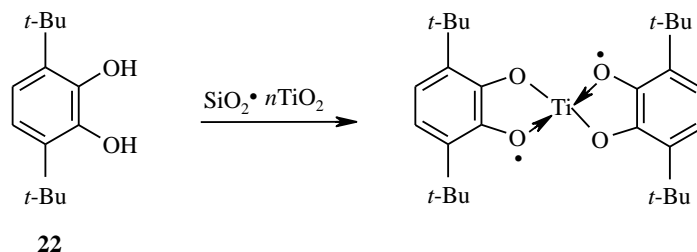
При разработке методов введения аминогруппы в положение 6 2,4-ди-*трет*-бутилфенола, а также при исследовании возможности взаимопревращений 6-амино- и 6-гидроксизамещенных фенолов обнаружено, что при определенных условиях эти превращения сопровождаются образованием производных феноксазина – тетрабутилфеноксазинильного и гидрокситетрабутилфеноксазинильного радикалов **17** и **18**, соответственно, зарегистрированных методом ЭПР, и тетра-*трет*-бутилфеноксазинона **19**, выделенного препаративно. Эти соединения образуются при восстановлении 6-нитро-2,4-ди-*трет*-бутилфенола [7], окислении 6-амино-2,4-ди-*трет*-бутилфенола, автоокислении 3,5-ди-*трет*-бутилпирокатехина (**20**) в присутствии NH_3 и восстановлении 3,5-*трет*-бутил-*о*-бензохинона (**21**) NaBH_4 также в присутствии NH_3 . Возможные промежуточные продукты, общие для перечисленных реакций, представлены на схеме:



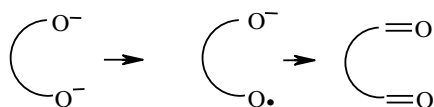
Образование легко идентифицируемых окрашенных и обладающих парамагнитными свойствами производных феноксазина **17** и **18** оказалось индикаторной реакцией, позволившей зафиксировать участие атмосферного азота в превращении соединения **20** на SiO_2 , содержащем ионы Ti и Mn [8, 9]. Реакция воспроизведена также с участием $^{15}\text{N}_2$. Обнаружение ^{15}N -радикалов у тетра-*трет*-бутилфеноксазинов (спектр ЭПР) и тетра-*трет*-бутилфеноксазинона (масс-спектр) подтвердило возможность восстановительной фиксации азота в данной гетерофазной системе:



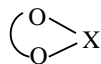
Анализ литературных данных о восстановительной фиксации азота с образованием производных N^{3-} позволяет предположить, что для гетерофазной системы на основе пирокатехина **20**— $\text{SiO}_2 \cdot n \text{TiO}_2$ наиболее вероятен мультиэлектронный координационно-каталитический механизм, в котором пирокатехин **20** выполняет функцию восстановителя и редокс-лабильного координирующего лиганда. Прямое свидетельство об образовании металлокомплексов на поверхности адсорбента получено с использованием изомерного пирокатехину **20** 3,6-ди-*трет*-бутилпирокатехина (**22**) в качестве комплексона. В частности, применение последнего позволило обнаружить природную примесь соединений титана в азотфиксирующих образцах SiO_2 [10]:



Мощный хелатирующий эффект двух соседних гидроксильных групп, экранируемых *трет*-бутильными заместителями в пирокатехинах **20** и **22**, проявляется в легкости образования различных металлокомплексов практически со всеми металлами периодической системы [11]. Электронное состояние лиганда в этих комплексах зависит от природы металла и степени его окисления и изменяется в ряду пирокатехат—семихинолят—хинон:

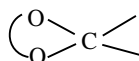


В образовании хелатных комплексов могут принимать участие нуль-валентные металлы, их оксиды, соли [12]. Процессы комплексообразования осуществляются как в твердой фазе, так и в растворах. Помимо металлов узловым звеном в циклической группировке

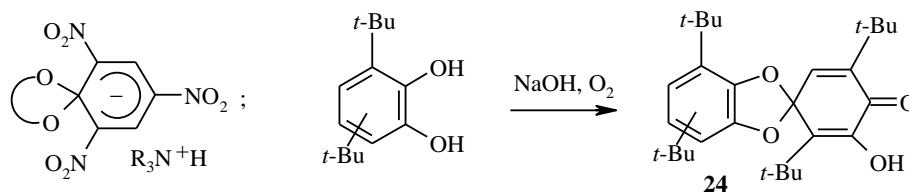


могут быть атомы углерода, серы, фосфора. Гетероциклические соединения, содержащие подобный структурный фрагмент, образуются в разнообразных реакциях пирокатехинов **20** и **22**, а также редокс-сопряженных хинонов **21** и **23**.

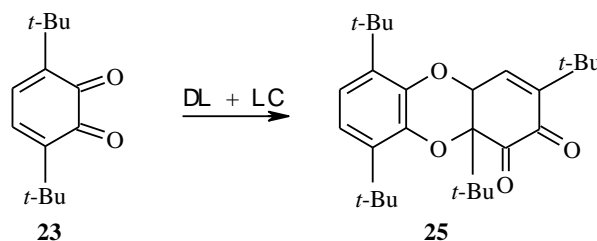
Так, образование цикла



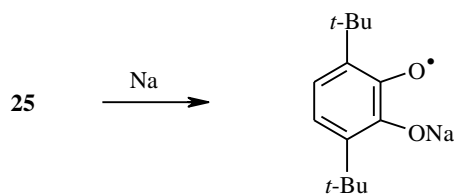
происходит в реакциях пирокатехинов с карбонильными соединениями [13], диалкил- и диарилкарбонатами [14], ди- [15], три- и тетрагалогенметанами, дигалокарбенами [16], а также в реакциях хинонов **21** и **23** с диазометаном [17] и илидами [18, 19]. Циклические эфиры обладают высокой устойчивостью и не претерпевают раскрытия цикла при действии кислот, щелочей, окислителей. Одним из наиболее наглядных проявлений этой особенности производных пирокатехина **22** является чрезвычайно высокая стабильность тринитроциклогесадиенатных комплексов Мейзенгеймера с 1,3-бенздиоксолановым циклом [20]. Близкие по структуре устойчивые спироциклические соединения **24** образуются при окислительной автоконденсации пирокатехинов **20** и **22** в присутствии оснований:



К гетероциклическому соединению **25** приводит димеризация хинона **23** под воздействием высокого давления (ВД) и сдвиговых деформаций (ДС) [21].

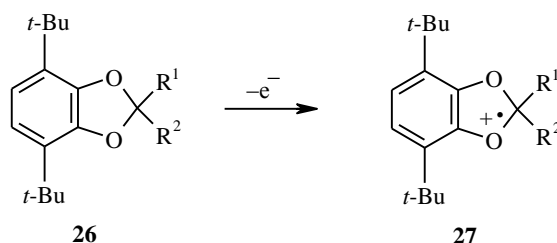


Ретроциклизация такого димера может быть осуществлена под действием одноэлектронных восстановителей:

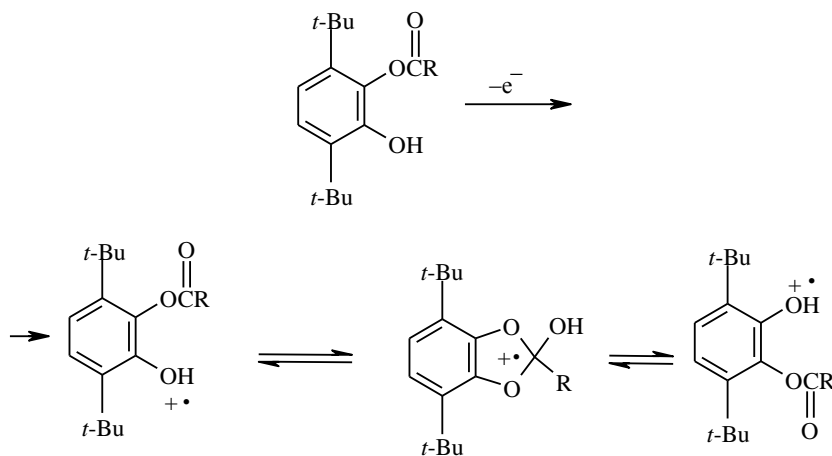


Интересной особенностью гетероциклических соединений **24** и **25** является их способность к одноэлектронному окислению без разрушения структуры. Образующиеся катион-радикалы идентифицированы методом ЭПР [22].

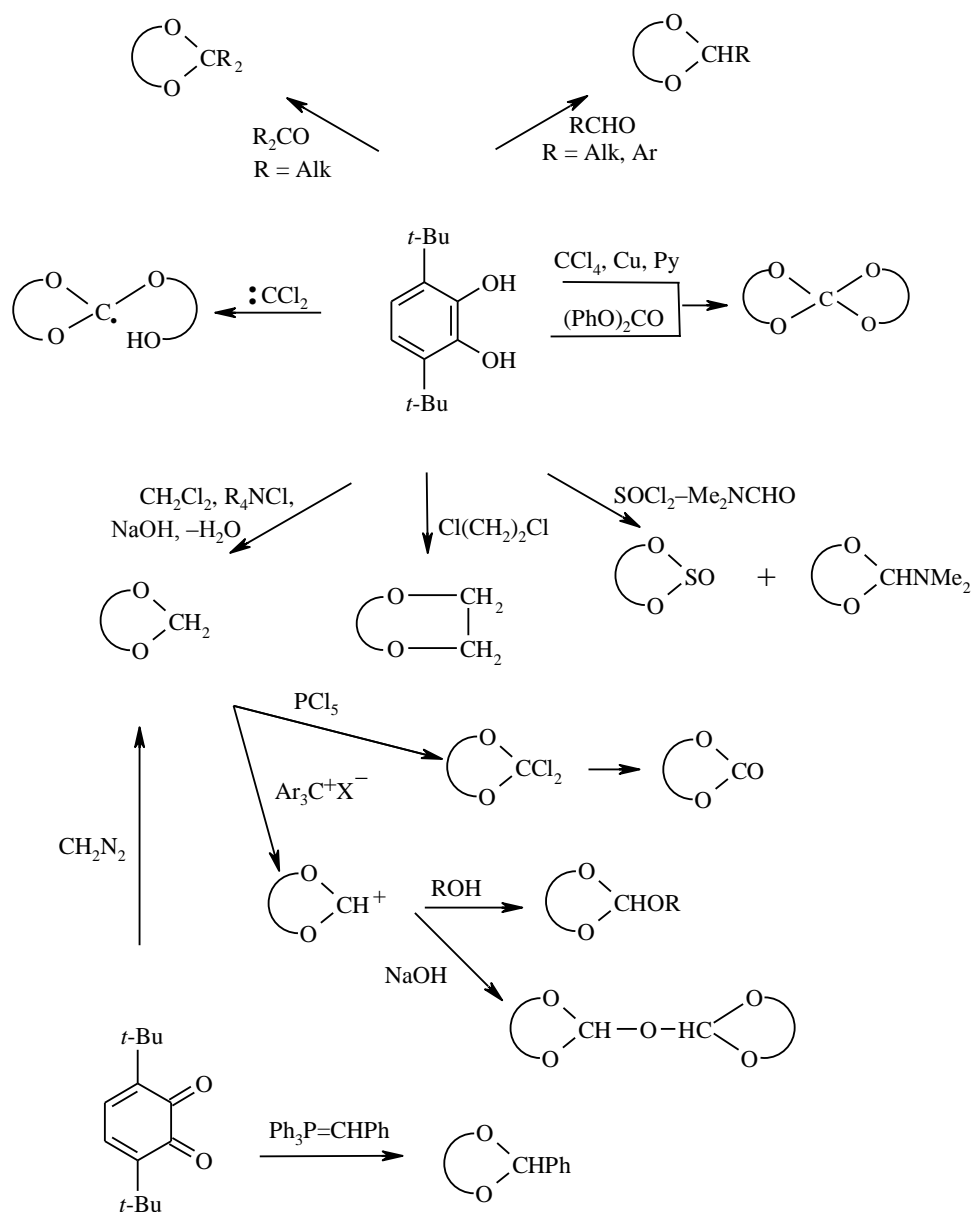
В дальнейшем было обнаружено, что достаточно стабильные катион-радикалы образуются также при окислении бенздиоксоланов:



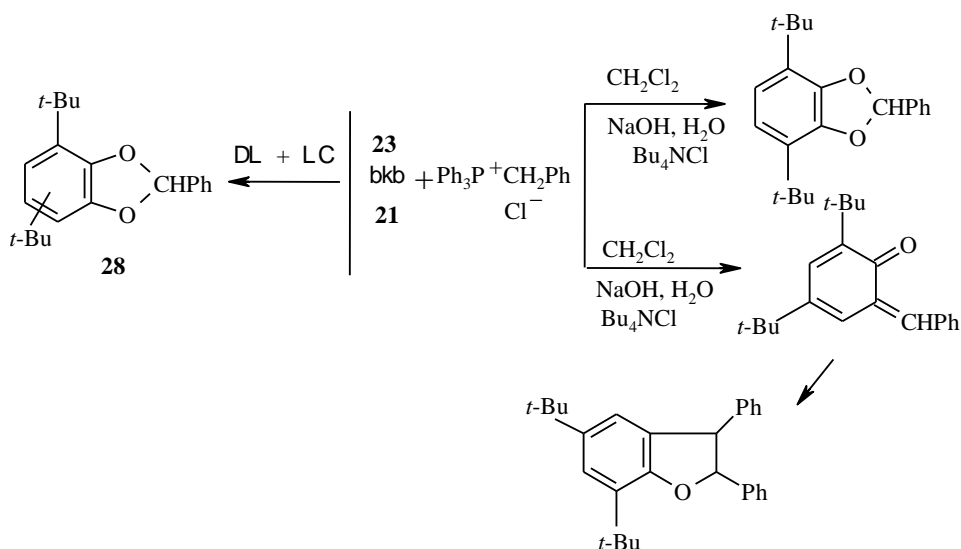
Исследованы спектральные параметры большого ряда катион-радикалов на основе бенздиоксоланов с различными заместителями R^1 и R^2 [23]. Установлено, что гетероциклические катион-радикалы типа **27** (с $R^1 = \text{OH}$) образуются как промежуточные соединения при окислении монокарбонных эфиров пирокатехина **22**, претерпевающих вырожденную изомеризацию с миграцией ацильной группы [24]:



Способность к донированию электрона в совокупности с протонноакцепторными свойствами соединений **26** послужила предпосылкой к использованию их в качестве ингибиторов термоокислительной деструкции полимеров с выделением галогеноводородов (ПВХ и подобные галогенолефины) [25, 26]. Наличие практически полезных свойств у бенздиоксоланов **26** стимулировало детальную разработку методов их синтеза. Варианты осуществленных синтезов представлены на следующей схеме:

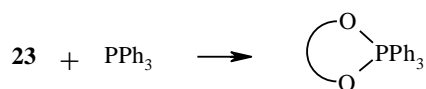


Следует отметить, что структурно родственные изомерные пирокатехины **20** и **22** и редокс-сопряженные хиноны **21** и **23** являются близкими аналогами по реакционной способности, но тем не менее имеют ряд существенных различий. Так, взаимодействие хинонов **21** и **23** с бензил-идентрифенилфосфораном, генерируемым в двухфазной каталитической системе, приводит к образованию структурно различных гетероциклических соединений в зависимости от стерической ситуации у карбонильных групп [18]:

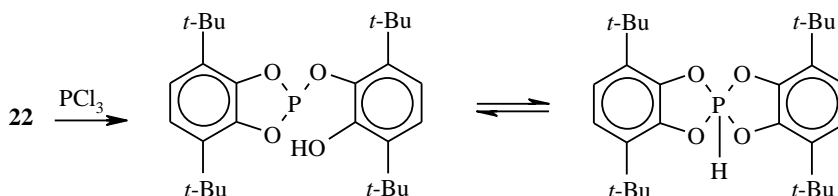


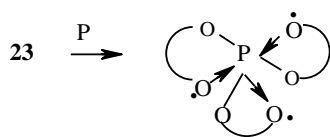
При осуществлении твердофазного варианта процесса в трехкомпонентной системе хинон—бензилтрифенилфосфоний хлорид—NaOH под воздействием высокого давления и сдвиговых деформаций в обоих случаях образуются изомерные бенздиоксоланы (производные пирокатехинов **20** и **22**), что свидетельствует об изменении механизма взаимодействия в этих условиях, по-видимому, вследствие изменения электронной структуры иллада и реализации в обоих случаях единого реакционного пути [19].

Интересно отметить, что наряду с эфирами **28** наблюдается образование некоторого количества фосфоранов в результате реакции хинонов с выделяющимся на первой стадии трифенилфосфином:

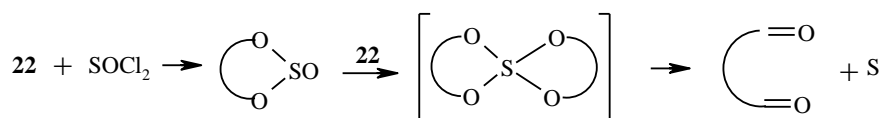
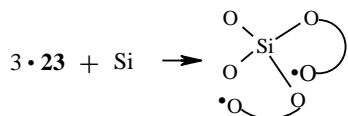
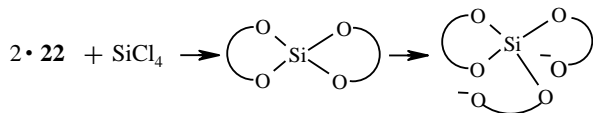


Гетероциклические эфиры пирокатехинов с узловым атомом фосфора образуются при взаимодействии соединения **22** с PCl_3 [27], другими соединениями фосфора, а также при взаимодействии хинонов с белым фосфором [28]. Характерной особенностью этих реакций является замещение пирокатехиновым (или семихинолятным) лигандом максимального числа координационных вакансий при атоме фосфора с образованием фосфорановых структур:

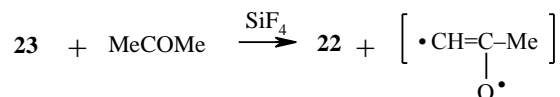




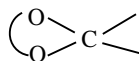
Эта же тенденция координационного насыщения проявляется при взаимодействии пирокатехина **22** и хинона **23** с кремнием и его производными [29], с SOCl_2 [14] и с диарилкарбонатами [14]:



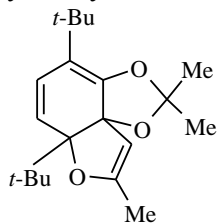
подавляющее большинство гетероциклических соединений на основе изомерных пирокатехинов **20** и **22** (и соответствующих хинонов) образовано с участием обеих гидроксильных (или карбонильных) групп. Однако для производных 3,6-изомера обнаружен ряд реакций с гетероциклизацией по кольцу. Так, комплекс хинона **23** с SiF_4 , являясь сильным окислителем [30], способен дегидрировать ацетон:



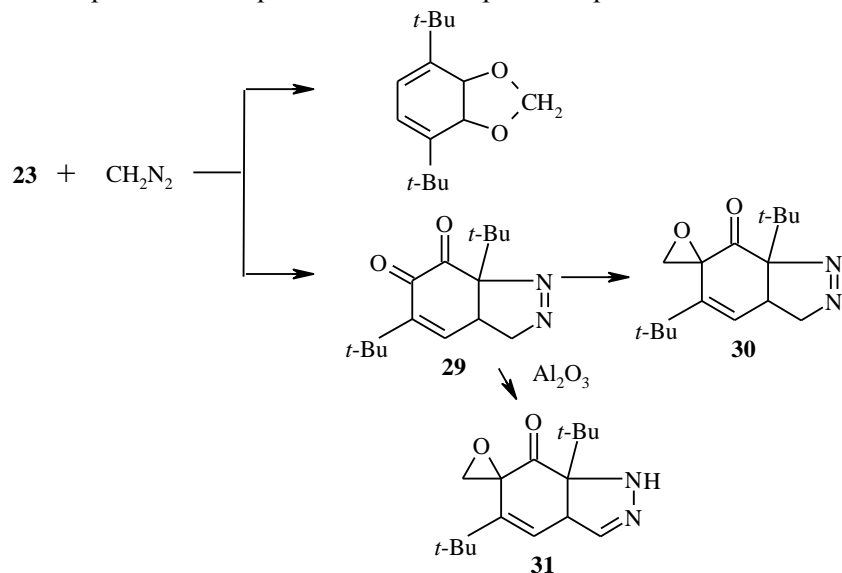
Конденсация образующегося пирокатехина **22** с ацетоном приводит к бенздиоксолану:



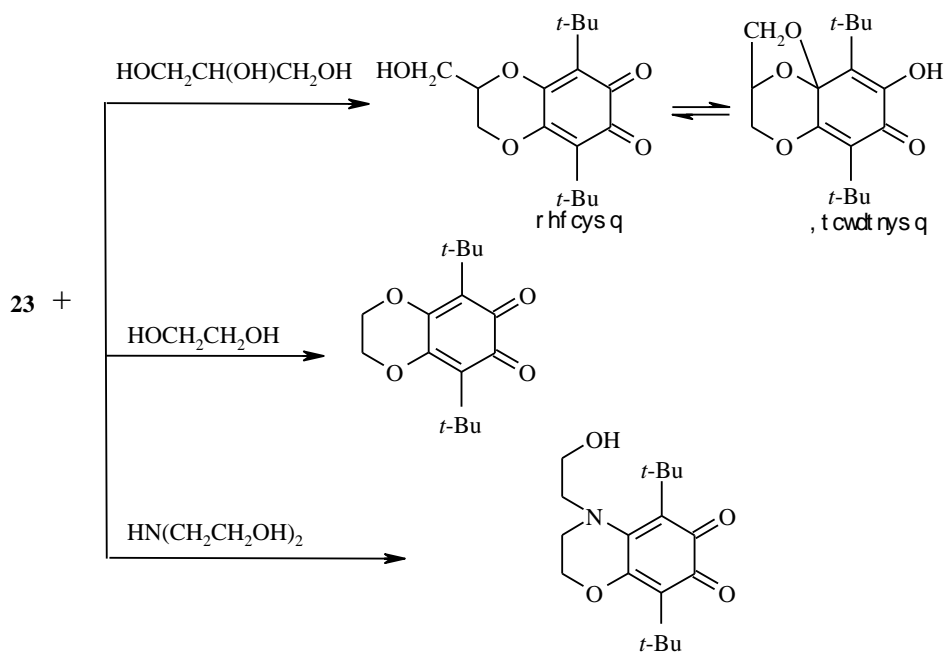
Взаимодействие последнего с дегидроацетоном приводит к образованию гетероциклического аддукта с участием связи $\text{C}=\text{C}$ кольца:



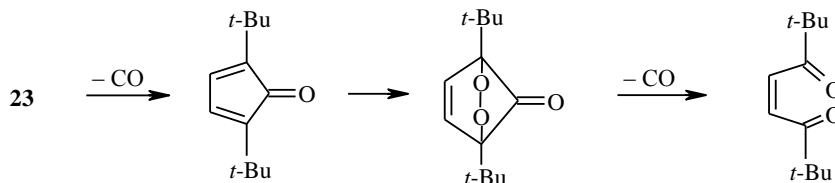
Оба изомерных ди-*tert*-бутил-*o*-бензохинона при взаимодействии с диазометаном образуют циклические эфиры с отщеплением N₂. Однако в случае изомера **23** параллельно образуется аддукт с диазометаном по связи C=C кольца – производное пиразолина **29**, а также продукт его взаимодействия с CH₂N₂, содержащий оксирановый цикл **30** [17]; пиразолин **29** устойчив в условиях термолиты, но на Al₂O₃ претерпевает прототропную изомеризацию с образованием изомерного пиразолина **31**:



С участием связей C–N кольца протекает дегидроконденсация хинона **23** с этиленгликолем, глицерином и диэтаноломином, приводящая к образованию гетероциклических производных хинона [31]. В случае глицерина дегидроаддукт проявляет индикаторные и термохромные свойства, обусловленные взаимопревращением двух изомерных форм:



В самое последнее время обнаружен новый тип превращения хинона **23** в условиях фотолиза при доступе кислорода. Образование в качестве продукта фотопревращения 1,2-дипивалилэтилена заставляет предположить, что реакция протекает постадийно через образование ди-*трет*-бутилциклопентадиенона, его циклического аддукта с дикислородным мостиком, потерю второй карбонильной группы и характерную для циклических перекисей изомеризацию с образованием дикарбонильного соединения:



Фотопревращение заведомого ди-*трет*-бутилциклопентадиенона, полученного в результате фотолиза хинона **23** в отсутствие кислорода, также приводящее к дипивалилэтилену, подтверждает предполагаемую схему его образования. Представляется возможным осуществление подобных превращений природных замещенных пирокатехинов и хинонов при участии атмосферного кислорода и солнечного света.

Приведенные примеры гетероциклизации в превращениях одно- и двухатомных ди-*трет*-бутилфенолов дают представление о возможностях использования фенолов в химии гетероциклических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, В. Б. Вольева, В. В. Ершов, Л. Н. Борисова, О. М. Глозман, Л. Д. Смирнов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 703 (1986).
2. В. Б. Вольева, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 784 (1996).
3. В. Б. Вольева, И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1310 (1996).
4. В. Б. Вольева, И. С. Белостоцкая, О. В. Шишкин, Ю. Т. Стручков, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1549 (1995).
5. Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, О. В. Шубина, В. В. Ершов, В. Н. Вознесенский, И. И. Червин, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2186 (1988).
6. И. С. Белостоцкая, В. Б. Вольева, Н. Л. Комиссарова, М. О. Декаприлевич, В. Н. Хрусталева, А. Ю. Кармилов, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1328 (1997).
7. В. Б. Вольева, Т. И. Прокофьева, А. И. Прокофьев, И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1789 (1995).
8. В. Б. Вольева, И. С. Белостоцкая, А. Ю. Бундель, Н. Л. Комиссарова, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 398 (1997).
9. В. Б. Вольева, А. И. Прокофьев, Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, Т. И. Прокофьева, В. В. Ершов, *ХГС*, 1445 (2002).
10. В. Б. Вольева, А. И. Прокофьев, А. Ю. Кармилов, Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, Т. И. Прокофьева, В. В. Ершов, *Изв. АН, Сер. хим.*, 1975 (1998).
11. Н. Н. Бубнов, С. П. Солодовников, А. И. Прокофьев, М. И. Кабачник, *Успехи химии*, **67**, 1048 (1978).
12. В. Б. Вольева, В. А. Жорин, В. В. Ершов, Н. С. Ениколопан, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1437 (1984).
13. И. С. Белостоцкая, Э. В. Джуарян, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2808 (1973).
14. В. Б. Вольева, Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1635 (1984).

15. В. Б. Вольева, И. С. Белостоцкая, И. А. Новикова, Э. В. Джуарян, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2414 (1980).
16. В. Б. Вольева, Т. И. Прокофьева, И. А. Новикова, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1632 (1984).
17. Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, В. Б. Вольева, Э. В. Джуарян, И. А. Новикова, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2360 (1981).
18. В. Б. Вольева, И. А. Новикова, Г. Д. Остапец-Свешникова, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2416 (1980).
19. В. Б. Вольева, В. А. Жорин, А. Л. Христюк, В. В. Ершов, Н. С. Ениколопян, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 444 (1983).
20. В. Н. Князев, В. Н. Липовцев, И. С. Белостоцкая, В. Б. Вольева, В. Н. Дрозд, В. В. Ершов, *ЖОрХ*, **22**, 1951 (1986).
21. В. Б. Вольева, А. И. Прокофьев, В. А. Жорин, Т. И. Прокофьева, И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, А. Ю. Кармилов, В. В. Ершов, *Хим. физика*, **15**, 16 (1996).
22. Н. А. Малышева, А. И. Прокофьев, В. Б. Вольева, Т. И. Прокофьева, М. Г. Петерлейтнер, Л. И. Денисович, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2272 (1987).
23. Н. А. Малышева, А. И. Прокофьев, Н. Н. Бубнов, С. П. Солодовников, Т. И. Прокофьева, В. Б. Вольева, В. В. Ершов, М. И. Кабачник, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1040 (1988).
24. Н. А. Малышева, А. И. Прокофьев, Н. Н. Бубнов, С. П. Солодовников, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, М. И. Кабачник, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1186 (1977).
25. К. С. Минскер, С. В. Колесов и др. А. с. № 979433 (1982); *Б. И.*, 1982, № **45**, 114.
26. Р. А. Варбанская, В. С. Пудов, Н. Л. Комиссарова, И. С. Белостоцкая, В. Б. Вольева, В. В. Ершов, А. с. № 1143752 (1984); *Б. И.*, 1985, № 9, 94.
27. И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, Т. И. Прокофьева, В. Б. Вольева, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 2385 (1978).
28. А. И. Прокофьев, А. А. Ходак, Н. А. Малышева, Н. Н. Бубнов, С. П. Солодовников, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, М. И. Кабачник, *ДАН*, **240**, 358 (1978).
29. А. И. Прокофьев, Т. И. Прокофьева, Н. Н. Бубнов, С. П. Солодовников, И. С. Белостоцкая, В. В. Ершов, М. И. Кабачник, *ДАН*, **234**, 603 (1977).
30. А. К. Чекалов, Н. Г. Гвазава, В. Б. Вольева, Т. И. Прокофьева, А. И. Прокофьев, В. В. Ершов, *Изв. АН СССР. Сер. хим.*, 1105 (1990).
31. Т. И. Прокофьева, В. Б. Вольева, А. И. Прокофьев, И. С. Белостоцкая, Н. Л. Комиссарова, В. В. Ершов, *ХГС*, 1057 (2000).

*Институт биохимической физики
им. Н. М. Эмануэля РАН,
Москва 119991 ГСП, Россия
e-mail: chembio@sky.chph.ras.ru*

Поступило в редакцию 05.06.2001