

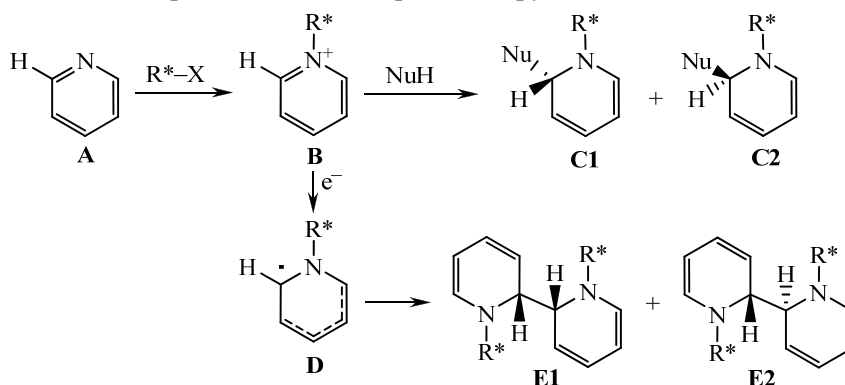
И. Н. Егоров^{а*}, В. Л. Русинов^{а,б}, О. Н. Чупахин^{а,б}

АСИММЕТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ В РЕАКЦИЯХ
ХИРАЛЬНЫХ АЦИЛАЗИНИЕВЫХ СОЛЕЙ
(ОБЗОР)

Анализируется эффективность асимметрической индукции в реакциях хиральных ацилазинеиновых солей, получаемых из пиридинов, хинолинов, изохинолинов, 1,2,4-триазинов и ряда хиральных ацилирующих агентов.

Ключевые слова: ацилазинеиновые соли, изохинолины, пиридины, 1,2,4-триазины, хинолины, хлорформаты, асимметрическая индукция, диастереоселективный синтез.

Реакции стереоселективного присоединения С-нуклеофилов к азидам представляют большой практический интерес с точки зрения синтеза алкалоидов и их аналогов [1–6]. Индукция хиральности при взаимодействии азинов с нуклеофилами возможна при проведении реакции как в присутствии хирального катализатора, так и при использовании энантимерно чистых субстрата и/или нуклеофила [7]. Представляет несомненный интерес такой вариант генерирования хиральности, как ацилирование азинового цикла **A** при помощи хирального ацилирующего агента (R^*-X), что позволяет получить энантимерно чистый субстрат **B**. В результате взаимодействия последнего с нуклеофилом может наблюдаться асимметрическая индукция. В результате реакции образуются соединения **C1** и **C2**, представляющие собой пару диастереомеров, преобладание одного из которых определяется стереохимией субстрата. Другим путём асимметрической индукции для *N*-ацилазинеиновых солей **B** является превращение в делокализованный радикал **D**, димеризация которого приводит к соединениям **E1** и **E2**, количественное соотношение которых зависит от хиральной группы R^* .



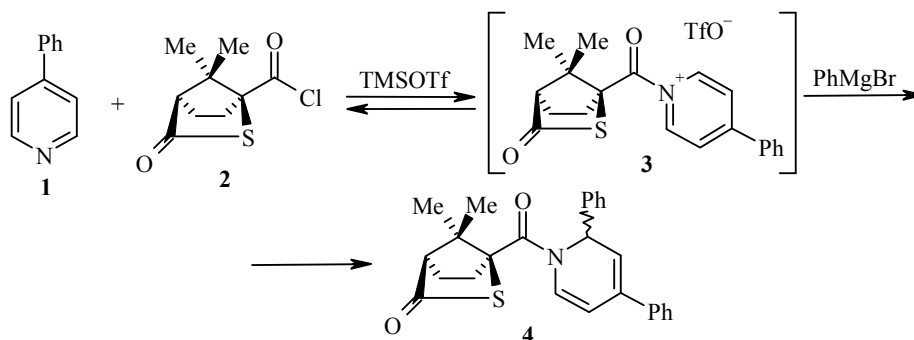
Данный обзор охватывает известные случаи реакций хиральных ацилазинеиновых солей, описанные с 2005 по 2011 г., и разделён на две части. Первая часть обзора посвящена реакциям ацилазинеиновых солей с нуклеофилами, вторая часть – реакциям димеризации радикалов, получаемых из ацилазинеиновых солей. Работы до 2005 г. представлены в ранее опубликован-

* Здесь и далее в номере фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечена звёздочкой.

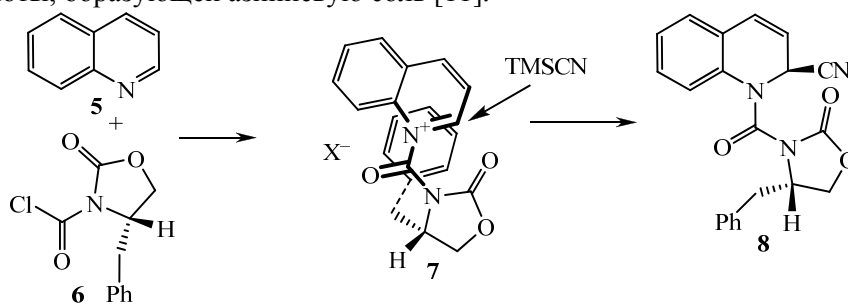
ном обзоре [7]. В обзоре [8], опубликованном в 2012 г., подробно рассмотрены реакции пиридиниевых солей, однако совершенно не затронуты реакции прочих азиниевых солей. Обзор [9], посвящённый реакциям Райссерта, протекающим в присутствии хиральных катализаторов, не затрагивает реакций хиральных азиниевых солей.

1. Реакции присоединения нуклеофилов к ацилазиниевым солям

В реакции 4-фенилпиридина (1) с (1*S*,4*R*)-4,7,7-триметил-3-оксо-2-тиабицикло[2.2.1]гептан-1-карбонилхлоридом (2) *in situ* образуется *N*-ацилазиниевая соль 3, которая при последующем взаимодействии с фенилмагни-бромидом образует соединение 4 с выходом 50%. Диастереоселективности в данном случае не наблюдалось [10].



При ацилировании по атому азота хинолина (5) либо изохинолина (9а) (*S*)-4-бензил-2-оксооксазолидин-3-карбонилхлоридом (6) образуются хиральные ацилазиниевые соли 7 и 10. Последующее присоединение к этим солям цианид-ионов, генерируемых *in situ* из триметилсилилцианида (TMSCN), приводит к образованию соединений Райссерта 8 и 11 с умеренной диастереоселективностью [7, 11]. Основной причиной наблюдаемой диастереоселективности авторы называют стерические затруднения с одной из сторон гетарена, создаваемые за счёт π-π-взаимодействия хирального заместителя с бензильным фрагментом. Также было отмечено, что на диастереоселективность в данной реакции заметное влияние оказывает тип противоиона кислоты, образующей азиниевую соль [11].

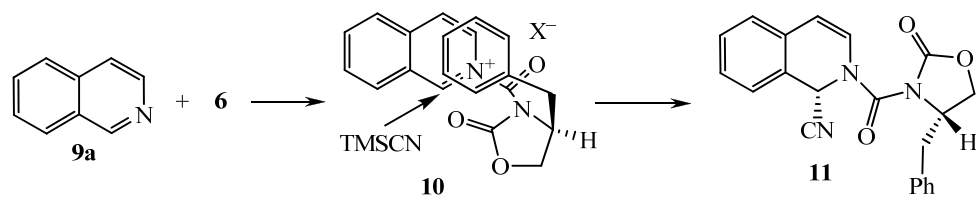


X ⁻	T, °C	Выход*, %	dr**
Cl ⁻	20	88	55:45
TfO ⁻	20	70	83:17
NfO ⁻ ***	40	60	84:16

* Общий выход смеси диастереомеров.

** *dr* определено ВЭЖХ.

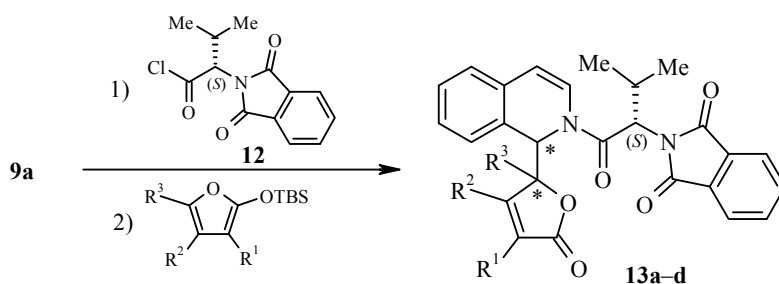
*** NfO⁻ – нонафлат (CF₃CF₂CF₂CF₂SO₃⁻).



X ⁻	T, °C	Выход*, %	dr
Cl ⁻	20	76	60:40
TfO ⁻	20	35	15:85
TfO ⁻	40	95	29:71

* Общий выход смеси диастереомеров.

При ацилировании изохинолина (**9a**) хлорангидридом *N*-фталоил-(*S*)-валина (**12**) и последующей реакции с замещёнными фуранами образуется ряд соединений **13a–d**. Абсолютная конфигурация соединений авторами не определялась [12].

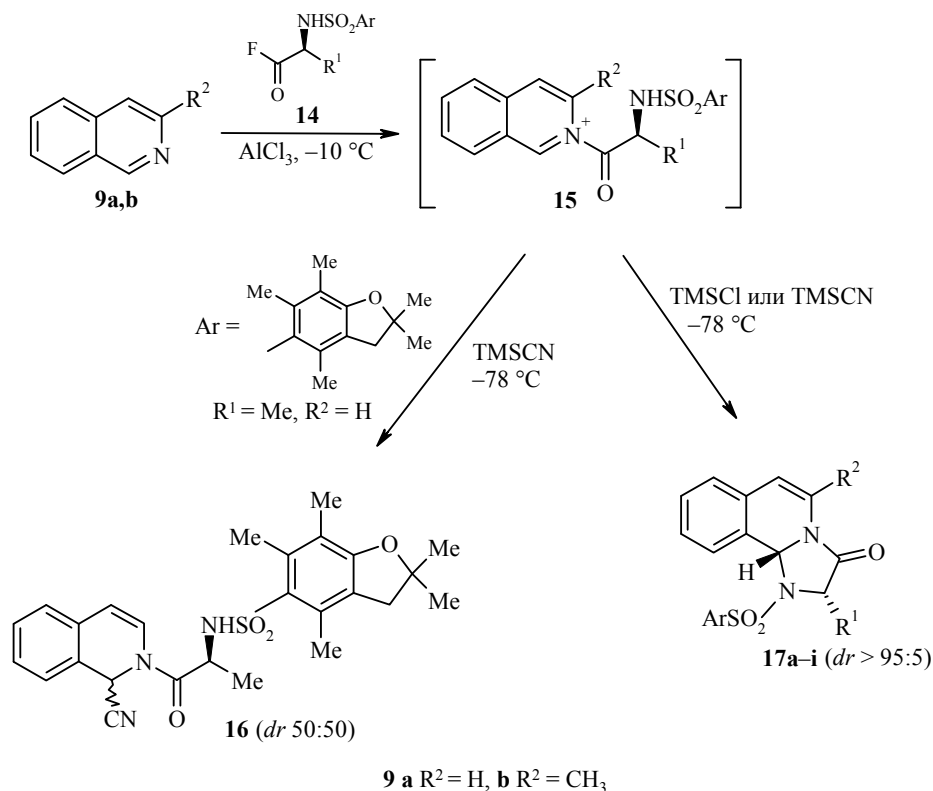


Соединение	R ¹	R ²	R ³	Выход, %	Соотношение изомеров*
13a	H	H	H	99	96:3:<1:<1
13b	Me	H	H	94	89:8:2:1
13c	H	Me	H	88	91:6:2:1
13d	H	H	Me	77	94:3:2:1

* Соотношение изомеров определено ВЭЖХ.

При ацилировании изохинолинов **9a,b** с помощью фторангидридов α -сульфоаминокислот **14** также предполагается промежуточное образование ацилизохинолиниевых солей **15**, имеющих стерические затруднения для атаки нуклеофилом с одной из сторон азиниевого цикла. При использовании цианид-иона в зависимости от типа сульфонильной группы образуются вещества **16** или **17**. Соединения **17** были получены с диастереоселективностью более чем 95:5 по данным ЯМР ¹H спектроскопии. Заместители в положении 3, а особенно в положении 1 изохинолина, создают стерические препятствия для образования дигидроимдазоизохинолинов **17a–i**. Так, 3-метилизохинолин (**9b**) образует соответствующий продукт реакции **17i** с меньшим выходом (12%), в то время как 1-метилизохинолин и 6,7-диметокси-1-метилизохинолин оказались нереакционноспособными в данных условиях. В реакции изохинолина с фторангидридом пентаметилбензофурилсульфонилаланина и TMS-CN образуются не соединения **17a–i**, а соединения

Райссерта **16** в виде рацемической смеси. Очевидно, что стерические препятствия, создаваемые метильными группами бензофурилсульфонильного фрагмента, затрудняют циклизацию и поэтому меньший по размерам цианид-ион атакует положение 1 соответствующей промежуточно образующейся *N*-ацилазиниевой соли **15** [13].

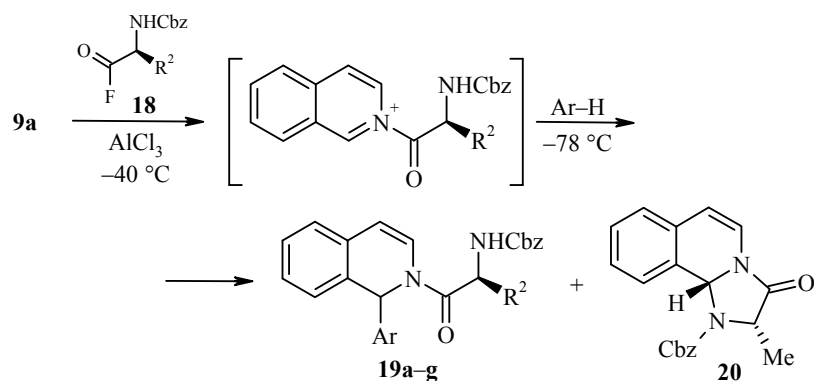


R ¹	R ²	Ar	Соединение	Выход, %
Me	H	4-МеС ₆ Н ₄	17a	47
Me	H	2-Нафтил	17b	46
Me	H	4-BrС ₆ Н ₄	17c	46
Me	H	Бензтиазол-2-ил	17d*	24
Bn	H	4-МеС ₆ Н ₄	17e	45
<i>i</i> -Pr	H	4-МеС ₆ Н ₄	17f	44
<i>i</i> -Pr	H	2-Нафтил	17g	46
<i>i</i> -Bu	H	4-МеС ₆ Н ₄	17h	46
Bn	Me	4-МеС ₆ Н ₄	17i	12

* Использован *N*-(бензотиазол-2-ил)аланилхлорид вместо фторида.

Исследование кислот Льюиса, участвующих в активации фторангидридов аминокислот в данной реакции, показало бóльшую эффективность AlCl₃ в сравнении с ZnCl₂, ZnF₂ и Et₂AlCl [13].

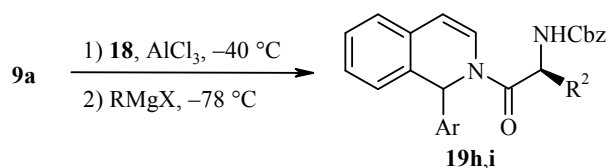
В реакциях изохинолина (**9a**), ацилированного (*S*)- α -Cbz-аминоацилфторидами **18**, с π -избыточными (гет)аренами образуется смесь соответствующих 1-арил-2-ацил-1,2-дигидроизохинолинов **19a-g** и имидазоизохинолина **20**. Реакция в большинстве случаев протекает диастереоселективно (*dr* 2:1 – 6:1, по данным спектров ЯМР ¹H) [14].



R^2	Ar	Соединение	Выход, %	<i>dr</i>
Me	4-Et ₂ NC ₆ H ₄	19a	21	6:1
Bn	4-Et ₂ NC ₆ H ₄	19b	48	3:1
Bn	4-Me ₂ NC ₆ H ₄	19c	44	3.55:1
Me	4-Me ₂ NC ₆ H ₄	19d	—*	—
Me	Пиррол-2-ил	19e	47	5:1
Bn	Индол-2-ил	19f	63	2:1
Me	Индол-2-ил	19g	56	2:1
Me		20	55	1:1
Me	Бензофуран-3-ил	20	35	2.6:1
Me		20	35	3.5:1

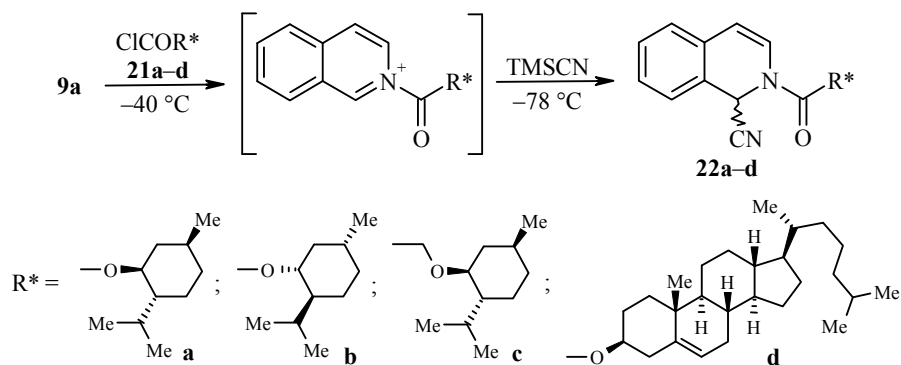
* Смесь соединений **19d** и **20**, 1:1.6. Выход и *dr* не определялись.

Аналогичная реакция с реагентами Гриньяра приводит к образованию соединений **19h,i** (*dr* 2.7 : 1 и 2.0 : 1 по данным спектров ЯМР ¹H) [14].



R^2	RMgX	Соединение	Выход, %	<i>dr</i>
Me	PhMgCl	19h	50	2.7:1
Bn	PhCH_2MgBr	19i	69	2.0:1

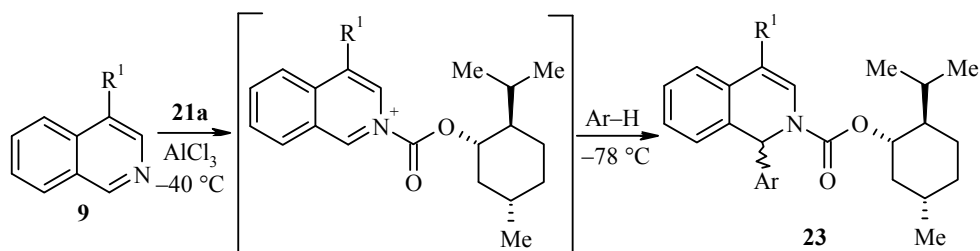
При ацилировании изохинолина (**9a**) (–)-(*R*)-ментилхлорформиатом (**21a**) и его аналогами **21b–d** в дихлорметане с последующим добавлением TMSCN образуются соединения **22a–d** в виде рацемических смесей. Небольшая диастереоселективность наблюдалась лишь в реакции с участием хлорформиата холестерина (**21d**) [15, 16].



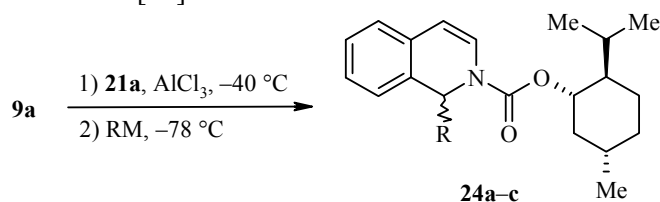
Соединение	Выход, %	<i>dr</i> *
22a	96	50:50
22b	98	50:50
22c	67	47:53
22d	91	41:59

* *dr* определено ВЭЖХ.

Взаимодействие изохинолинов **9** с (–)-(*R*)-ментилхлорформиатом (**21a**) с последующим добавлением (гет)аренов, обладающих π-избыточной электронной плотностью, таких как индолы, анилины, фенолы, тиофены, приводит к образованию соответствующих 1-арил-2-ацил-1,2-дигидроизохинолинов **23** с выходами 33–97%. Диастереоселективности в данной реакции авторами не наблюдалось [14].



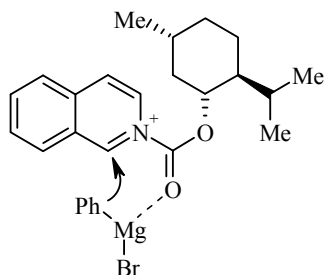
Арены, не обладающие избыточной π-электронной плотностью, способны участвовать в реакции с *N*-ацилизохинолинами в виде магний- или цинкорганических производных с образованием соединений **24a–c** с умеренной диастереоселективностью [14].



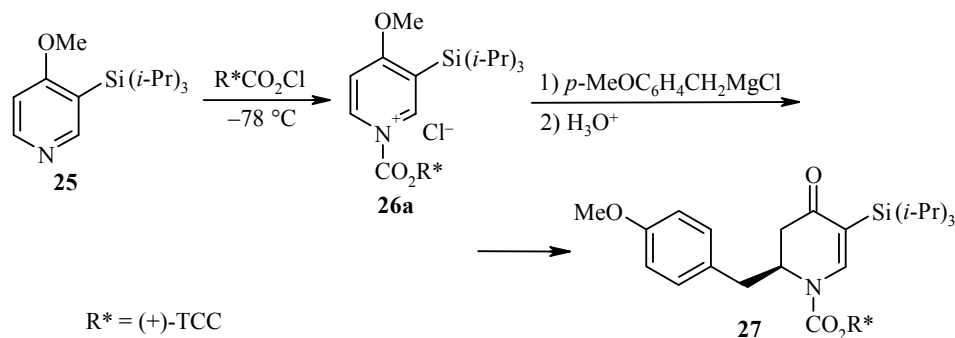
Соединение	RM	Растворитель	Выход, %	<i>dr</i> *
24a	PhMgBr	ТГФ	82	55:45
24a	Ph ₂ Zn	ТГФ	76	64:36
24a	Ph ₂ Zn	Толуол	78	70:30
24b	4-BrC ₆ H ₄ MgBr	ТГФ	62	1:1
24c	BnMgBr	ТГФ	55	60:40
24c	Bn ₂ Zn	ТГФ	87	60:40

* *dr* определено ВЭЖХ.

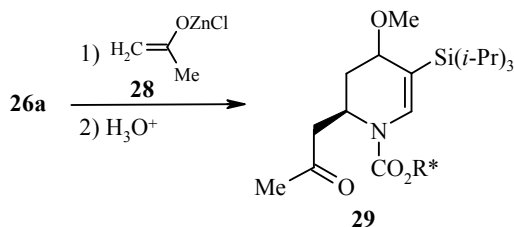
В качестве объяснения повышения значений диастереоселективности в реакции с металлоорганическими соединениями авторы предлагают схему образования соединения **24**, в которой металлсодержащий реагент RM взаимодействует с атомом кислорода промежуточной N -ацилазинеиевой соли с образованием жёсткого переходного состояния, предотвращающего нежелательное образование ротамеров вдоль связи $N-CO$ [14].



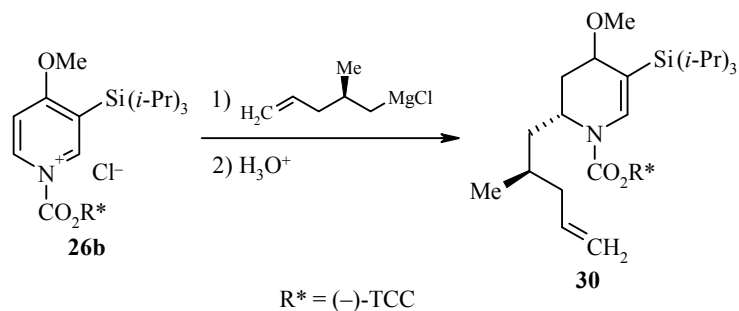
Пиридины способны присоединять нуклеофилы по нескольким положениям. Поэтому для региоселективного присоединения нуклеофилов используют пиридины, замещённые в положении 4 метоксигруппой, а в положении 3 – триизопропилсилильной группой. Ацилирование такого пиридина **25** хлорформиадом (+)-*транс*-2-(α -кумил)циклогексанола ((+)-ТСС) приводит к образованию ацилпиридиниевой соли **26a**, которая при последующем взаимодействии с реагентом Гриньяра превращается с выходом 90% в смесь диастереоизомеров **27** (*dr* 95:5) [17].



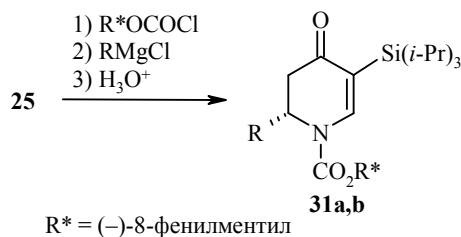
В аналогичной реакции N -ацилпиридиниевой соли **26a** с цинковым енолятом ацетона (**28**) был получен N -ацилдигидропиридон **29** с выходом 72% (*dr* > 96.5:3.5) [18].



Реакция N -ацилпиридиниевой соли **26b** с реагентом Гриньяра, полученным из (R)-4-метил-5-хлорпентена, привела к соединению **30** с выходом 76% (*dr* 94:6) [19].



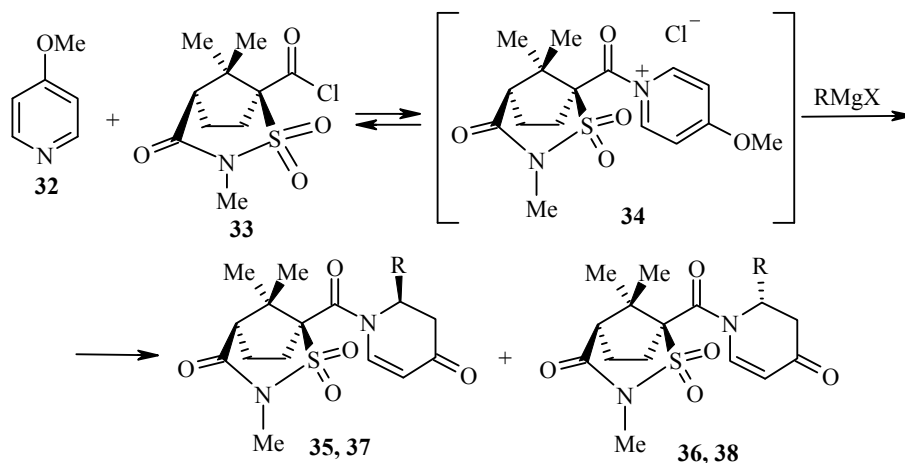
Также описан ряд реакций реактивов Гриньяра с *N*-ацилпиридиниевой солью, полученной ацилированием 4-метокси-3-(триизопропилсилил)пиридина (**25**) (-)-8-фенилментилхлорформиатом [20].



R	Соединение	Выход, %	<i>dr</i> *
(CH ₂) ₅ CH ₂ CH ₃	31a	79	99:1
(CH ₂) ₅ CH=CH ₂	31b	61	98:2

* *dr* определено ВЭЖХ.

В реакции 4-метоксипиридина (**32**) с хлорангидридом сультама **33** *in situ* образуется *N*-ацилазидиниевая соль **34**, которая при последующем взаимодействии с реактивами Гриньяра образует соединения **35–38** [10].



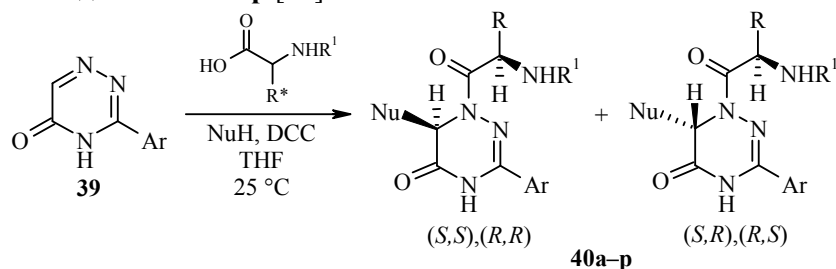
R	X	Соединения*	Выход смеси соединений, %	<i>dr</i>
Et	I	35 и 36	59	91:9
Ph	Br	37 и 38	74	61:39**

* Абсолютная конфигурация соединений не определялась.

** *dr* определено ВЭЖХ.

Большой интерес в плане изучения асимметрической индукции в реакциях присоединения представляют *N*-ацилазидиниевые соли 1,2,4-триазинонов.

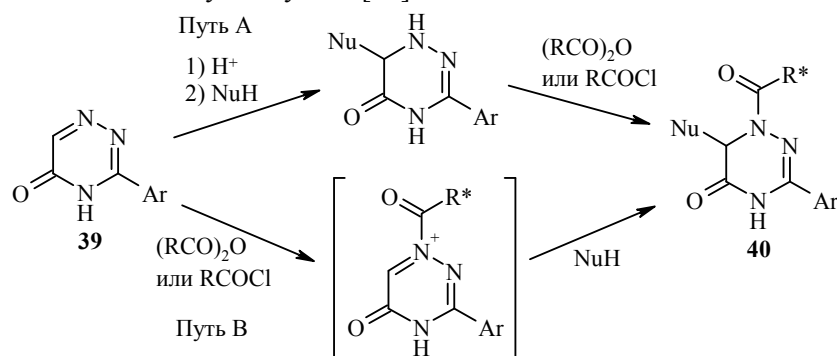
При взаимодействии 3-арил-1,2,4-триазин-5(4*H*)-онов **39** с индолами в присутствии *N*-ацил- α -аминокислот, активированных DCC, происходит образование соединений **40a–p** [21].



NuH	Ar	<i>N</i> -ацил- α -аминокислота	Соединение	Выход, %	<i>dr</i> *
Индол	Ph	<i>N</i> -Вос-глицин	40a	48	–
Индол	Ph	<i>N</i> -бензоил- <i>D,L</i> -лейцин	40b	34	> 95:5
Индол	Ph	<i>N</i> -формил- <i>D,L</i> -аланин	40c	28	> 95:5
Индол	Ph	<i>N</i> -ацетил- <i>L</i> -триптофан	40d	21	> 95:5
Индол	Ph	<i>N</i> -ацетил- <i>D,L</i> -фенилаланин	40e	22	> 95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>L</i> -валин	40f	24	95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>D</i> -аланин	40g	15	95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>D,L</i> -фенилаланин	40h	22	95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>L</i> -триптофан	40i	18	> 95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>D</i> -триптофан	40j	16	> 95:5
Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>D,L</i> -триптофан	40k	25	95:5
2-Ме-Индол	Ph	<i>N</i> -бензоил- <i>D,L</i> -лейцин	40l	36	> 95:5
2-Ме-Индол	Ph	<i>N</i> -ацетил- <i>L</i> -триптофан	40m	25	> 95:5
2-Ме-Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -ацетил- <i>L</i> -валин	40n	22	> 95:5
1-Ме-Индол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -бензоил- <i>D,L</i> -лейцин	40o	30	> 95:5
1-Ме-Пиррол	4-MeC ₆ H ₄	<i>N</i> -бензоил- <i>D,L</i> -лейцин	40p	14	> 95:5

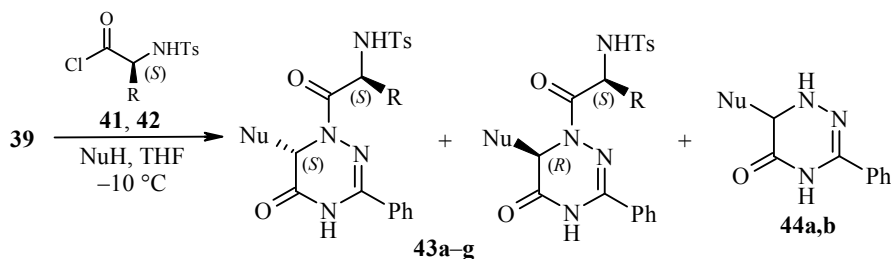
* *dr* определено ЯМР ¹H спектроскопией.

Следует отметить, что для 3-арил-1,2,4-триазин-5(4*H*)-онов **39**, в отличие от пиридинов, хинолинов и изохинолинов, обсуждавшихся выше, возможно присоединение С-нуклеофилов не только в ацилирующих условиях, но и при активации кислотами. Поэтому, хотя теоретически возможны два направления образования соединений **40**, диастереоселективное протекание реакции возможно только в случае пути В [21].



В реакциях триазинона **39** с С-нуклеофилами в присутствии хлорангидридов *N*-Ts-*L*-валина **41** или *N*-Ts-*L*-лейцина **42** образуются 6-арил-1-(2-тозиламино)ацил-3,4-дигидро-1,2,4-триазин-5(4*H*)-оны **43a–g** с выхода-

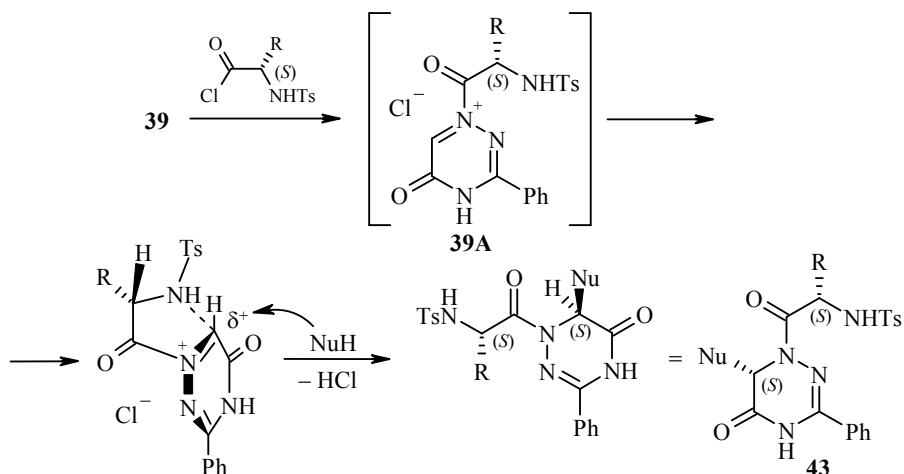
ми от 15 до 77%. При использовании в качестве ацилирующего агента *N*-Ts-*L*-валина **41** наблюдалась самая высокая диастереоселективность. Содержание (*S,S*)-изомеров **43c,f** в реакционной смеси достигает 90–95% по данным ЯМР ¹H спектроскопии [22].



NuH	R	Соединение**	Выход, %	(<i>S,S</i>):(<i>S,R</i>)*	Соединение	Выход, %
Индол	<i>i</i> -Bu	(<i>S,S</i>)- 43a	15	60:40	44a	<5
Индол	<i>i</i> -Bu	(<i>S,S</i>)- 43b	10,	45:55	44a	36
		(<i>S,R</i>)- 43b	5			
Индол	<i>i</i> -Pr	(<i>S,S</i>)- 43c	77	90:10	–	–
1-Ме-Индол	<i>i</i> -Bu	(<i>S,S</i>)- 43d	65	55:45	–	–
2-Ме-Индол	<i>i</i> -Bu	(<i>S,S</i>)- 43e	42	65:35	–	–
2-Ме-Индол	<i>i</i> -Pr	(<i>S,S</i>)- 43f	32	> 95:5	–	–
1-Ме-Пиррол	<i>i</i> -Bu	(<i>S,S</i>)- 43g	15	60:40	44b	7

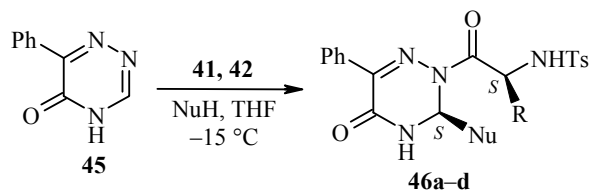
* *dr* в реакционной смеси. *dr* > 95:5 после разделения на хроматографической колонке (по данным ЯМР ¹H спектроскопии).

Объяснением наблюдаемой асимметрической индукции может служить образование *N*-ацилазидиновой соли **39A**, в которой присутствует диполь-дипольное взаимодействие между атомом азота аминогруппы аминокислотного фрагмента и электрофильным атомом углерода гетероцикла. В результате атака нуклеофилом по одной из сторон гетероцикла затруднена [22].



В реакциях триазинона **39** с замещёнными фенолами в присутствии хлорангидрида *N*-Ts-*L*-валина **41** образования соединений типа **43** не наблюдается, в результате с небольшими выходами были выделены продукты присоединения воды по положению 6 триазинового кольца [23].

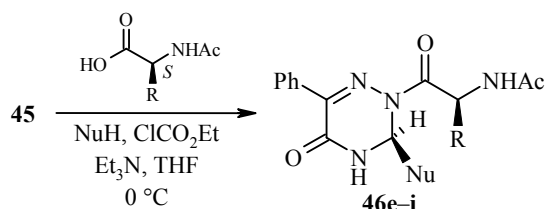
В реакции 6-фенил-1,2,4-триазин-5(4*H*)-она (**45**) с *S*-нуклеофилами и хлорангидридами аминокислот **41**, **42** происходит образование ряда 3-замещённых 2-(2-тозиламино)ацил-6-фенил-3,4-дигидро-1,2,4-триазин-5(4*H*)-онов **46a-d** с умеренными выходами и небольшой диастереоселективностью [22].



NuH	R	Соединение	Выход, %	(<i>S,S</i>):(<i>S,R</i>)*
Индол	<i>i</i> -Bu	46a	52	55:45
Индол	<i>i</i> -Pr	46b	23	65:35
1-Ме-Пиррол	<i>i</i> -Bu	46c	15	–
1-Ме-Индол	<i>i</i> -Pr	46d	32	50:50

* *dr* в реакционной смеси. *dr* > 95:5 после разделения на хроматографической колонке (по данным ЯМР ¹H спектроскопии).

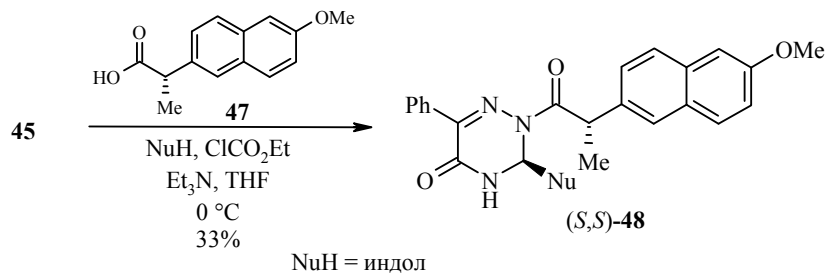
В реакции 6-фенил-1,2,4-триазин-5(4*H*)-она (**45**) с *S*-нуклеофилами и *N*-замещёнными *L*-аминокислотами в присутствии этилхлорформиата образуются 3-замещённые 2-(2-ациламино)ацил-6-фенил-3,4-дигидро-1,2,4-триазин-5(4*H*)-оны **46e-i** в виде пары (*S,S*),(*R,R*)-диастереомеров с умеренными выходами, но с высокой диастереоселективностью [24].



NuH	R	Соединение*	Выход, %
Индол	<i>i</i> -Bu	46e	49
Индол	<i>i</i> -Pr	46f	76
1-Ме-Индол	<i>i</i> -Pr	46g	40
Индол	(Индол-3-ил)метил	46h	32
Пиррол	<i>i</i> -Pr	46i	30

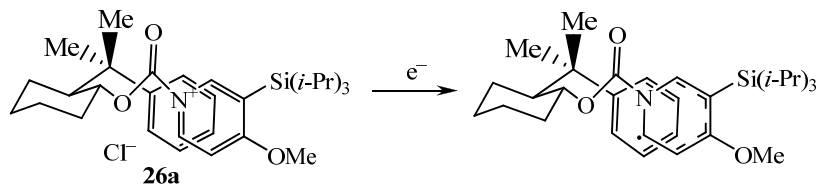
**dr* > 95:5 (по данным ЯМР ¹H спектроскопии).

При активации аминокислот сложноэфирным методом происходит их рацемизация, поэтому, несмотря на то, что в качестве исходных соединений в реакцию вступали оптически чистые аминокислоты, продукты реакции **46e-i** оптически неактивны. При введении в данную реакцию вместо аминокислот напроксена **47**, образуется энантиомерно чистое соединение **48** (*dr* 98:2 по данным ВЭЖХ) [24].

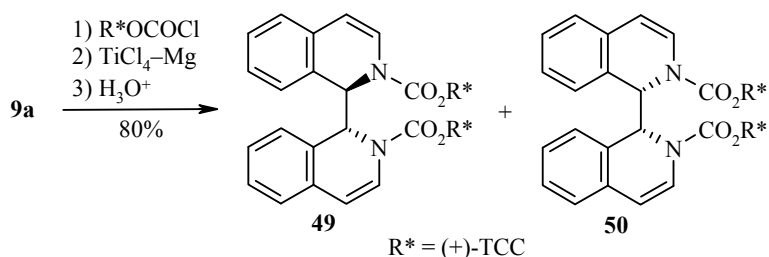


2. Реакции димеризации ацилазиниевых солей

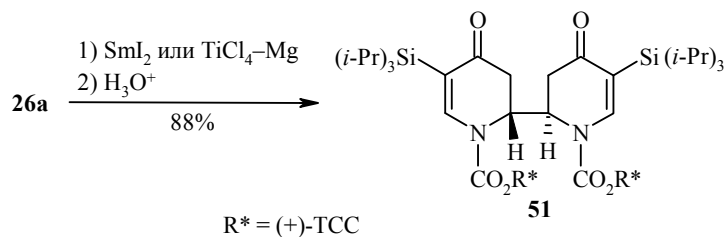
Присоединение электрона к ацилазиниевой соли **26a** способно приводить к образованию делокализованного радикала, при димеризации которого по положению 6 образуется C_2 -симметричный димер [25].



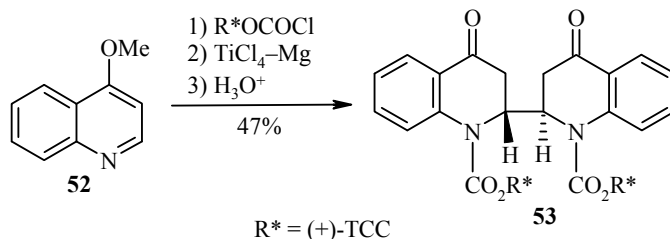
Изохинолин (**9a**), ацилированный хлорформиатом (+)-ТСС, способен к реакции радикальной димеризации с низкой диастереоселективностью (**49:50**, 60:40) [25].



1-Ацилпиридиниевая соль **26a** может вступать в реакцию радикальной димеризации с образованием соединения **51** с $dr > 95:5$ [25].



4-Метоксихинолин (**52**) в аналогичной реакции димеризации ацилазиниевой соли стереоселективно образует димер **53** с выходом 47% и $dr > 95:5$ [25].



В данном обзоре рассмотрены реакции присоединения С-нуклеофилов к хиральным ацилазиниевым солям, полученным взаимодействием азинов с активированными формами карбоновых кислот, содержащих асимметрический атом углерода, а также реакции радикальной димеризации хиральных ацилазиниевых солей.

Показано, что на диастереоселективность реакций присоединения нуклеофилов влияет как тип нуклеофила, так и хиральная ацильная группа ацилазинеовой соли. Применение активированных форм производных аминокислот даёт ацилазинеовые соли, способные к индукции хиральности в реакциях с π -избыточными (гет)аренами [12, 21, 22, 24], металлоорганическими соединениями [14] и цианид-ионом [7]. В реакциях с металлоорганическими соединениями диастереоселективное протекание процесса также возможно при использовании таких ацилирующих агентов, как хлорформиаты (+)-ТСС и (-)-ТСС [4, 5, 7, 17–19], (-)-8-фенилментилхлорформиат [20], а также хлорангидриды оптически активных кислот [10]. В реакциях с цианид-ионом индукция хиральности наблюдается также при ацилировании азина при помощи (*S*)-4-бензил-2-оксооксазолидин-3-карбонилхлорида [11] и хлорформиата холестерина [15]. Для реакций радикальной димеризации ацилазинеовых солей было показано, что хлорформиат (+)-ТСС является эффективным индуктором хиральности [25].

Таким образом, наиболее универсальными ацилирующими агентами, приводящими к асимметрической индукции в реакциях ацилазинеовых солей с нуклеофилами, являются активированные производные аминокислот. Тем не менее хиральные хлорформиаты, в частности широко используемые в синтезе алкалоидов хлорформиаты (+)- и (-)-ТСС, обладают существенным синтетическим преимуществом, поскольку их остатки способны отщепляться в щелочных условиях [3, 5] с образованием азина с незамещённым атомом азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. L. Comins, S. P. Joseph, in *Advances in Nitrogen Heterocycles*, C. J. Moody (Ed.), JAI Press, Greenwich, 1996, vol. 2, p. 251.
2. D. L. Comins, S. P. Joseph, in *Comprehensive Heterocyclic Chemistry II*, A. McKillop (Ed.), Pergamon Press, Oxford, 1996, vol. 5, p. 37.
3. D. L. Comins, *J. Heterocycl. Chem.*, **36**, 1491 (1999).
4. J. T. Kuethe, D. L. Comins, *J. Org. Chem.*, **69**, 2863 (2004).
5. J. T. Kuethe, D. L. Comins, *J. Org. Chem.*, **69**, 5219 (2004).
6. D. L. Comins, J. T. Kuethe, T. M. Miller, F. C. Février, C. A. Brooks, *J. Org. Chem.*, **70**, 5221 (2005).
7. И. Н. Егоров, Г. В. Зырянов, В. Л. Русинов, О. Н. Чупахин, *Успехи химии*, **74**, 1176 (2005).
8. J. A. Bull, J. J. Mousseau, G. Pelletier, A. B. Charette, *Chem. Rev.*, **112**, 2642 (2012).
9. M. Ahamed, M. H. Todd, *Eur. J. Org. Chem.*, 5935 (2010).
10. J. Bräckow, J. Pabel, P. Mayer, K. Polborn, K. T. Wanner, *Tetrahedron*, **66**, 7279 (2010).
11. M. Pauvert, S. C. Collet, M.-J. Bertrand, A. Y. Guingant, M. Evain, *Tetrahedron Lett.*, **46**, 2983 (2005).
12. P. Hermange, M. E. T. H. Dau, P. Retailleau, R. H. Dodd, *Org. Lett.*, **11**, 4044 (2009).
13. O. Sieck, M. Ehwald, J. Liebscher, *Eur. J. Org. Chem.*, 663 (2005).
14. C. Bender, J. Liebscher, *ARKIVOC*, vi, 111 (2009).
15. H. W. Gibson, M. A. G. Berg, J. C. Dickson, P. R. Lecavalier, H. Wang, J. S. Merola, *J. Org. Chem.*, **72**, 5759 (2007).
16. C. Fuchs, C. Bender, B. Ziemer, J. Liebscher, *J. Heterocycl. Chem.*, **45**, 1651 (2008).
17. D. B. Gotchev, D. L. Comins, *J. Org. Chem.*, **71**, 9393 (2006).
18. D. L. Comins, J. J. Sahn, *Org. Lett.*, **7**, 5227 (2005).
19. B. H. Wolfe, A. H. Libby, R. S. Al-awar, C. J. Foti, D. L. Comins, *J. Org. Chem.*, **75**, 8564 (2010).

20. M. M. Martínez, L. A. Sarandeses, J. P. Sestelo, *Tetrahedron Lett.*, **48**, 8536 (2007).
21. I. N. Egorov, G. V. Zyryanov, E. N. Ulomsky, V. L. Rusinov, O. N. Chupakhin, *Tetrahedron Lett.*, **47**, 7485 (2006).
22. О. Н. Чупахин, И. Н. Егоров, В. Л. Русинов, П. А. Слепухин, *Изв. АН, Сер. хим.*, 970 (2010).
23. И. Н. Егоров, О. Н. Чупахин, М. В. Березин, Г. Л. Русинов, В. Л. Русинов, Е. В. Буравлев, И. Ю. Чукичева, А. В. Кучин, *Изв. АН, Сер. хим.*, 893 (2011).
24. I. N. Egorov, V. König, V. L. Rusinov, O. N. Chupakhin, *Mendeleev Commun.*, **18**, 99 (2008).
25. P. Bharathi, D. L. Comins, *Org. Lett.*, **10**, 221 (2008).

^a Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург 620002, Россия
e-mail: i.n.egorov@gmail.com

Поступило 17.02.2012

^b Институт органического синтеза
им. И. Я. Постовского УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 22 / ул. Академическая, 20,
Екатеринбург 620219, Россия
e-mail: chupakhin@ios.uran.ru