

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

PLENARY TALKS

УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КАК КЛЮЧЕВОЙ СПОСОБ ПРЕБИОТИЧЕСКИХ СИНТЕЗОВ НА ОСНОВЕ ВОДНО-ФОРМАМИДНЫХ СИСТЕМ

*В.Г. Штырлин¹, В.А. Борисенок², Н.Ю. Серов¹, В.Г. Симаков^{2,3}, В.А. Брагунец³,
С.А. Кошкин¹, И.Р. Трунин^{2,3}, И.А. Терешкина^{2,3}, М.С. Бухаров¹,
Э.М. Гилязетдинов¹, А.В. Захаров¹, Е.Е. Шестаков^{2,3}*

¹Химический институт им. А.М. Бутлерова Казанского федерального университета, г. Казань, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

³РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Крупнейшей проблемой современной науки является проблема происхождения жизни. Очевидно, что знание истории развития любого явления позволяет адекватно оценить его современное состояние и прогнозировать его эволюцию в будущем. Применительно к жизни знание ее истории позволит решить ряд ее крупных современных проблем (включая лечение многочисленных заболеваний и, прежде всего, рака), а также даст возможность оценить перспективы дальнейшего развития жизни на Земле и, возможно, на других планетах. Для решения проблемы происхождения жизни необходимо выяснение условий и механизмов эффективного пребиотического синтеза органических соединений на нашей планете. Ключевым способом осуществления пребиотических синтезов мы считаем воздействие ударных волн на водно-формамидные системы, при котором имитируются столкновения метеоритов с поверхностью планеты в районах гидротермальных источников.

Длительное время главный вопрос происхождения жизни формулировался в виде дилеммы: "genetics-first or metabolism-first". То есть, что возникает раньше, генетический аппарат, поддерживающий наследование (первое важнейшее свойство жизни), или метаболизм – аппарат обмена веществ, поддерживающий потоки вещества и энергии на некотором удалении от равновесия (неравновесность – второе важнейшее свойство жизни)? Генетический аппарат основан на функционировании нуклеиновых кислот – дезоксирибонуклеиновых (ДНК) и рибонуклеиновых (РНК), а метаболизм регулируется катализаторами – ферментами (энзимами), белковыми соединениями, часто включающими в себя ионы металлов. Некоторое время назад казалось, что отмеченная дилемма близка к разрешению, поскольку были обнаружены так называемые рибозимы, то есть, РНК, обладающие функциями энзимов, и, следовательно, совмещающие в себе одновременно генетические и метаболические функции. Однако вскоре оказалось, что каталитическая активность рибозимов недостаточна для поддержания метаболизма. В результате оптимизм так называемого «РНК-мира» постепенно сменяется пессимизмом. Вероятно, решение проблемы происхождения жизни лежит в другой плоскости, а именно, не только генетический аппарат и аппарат метаболизма, но и третий аппарат – обособления протоклетки и ее

компарментов – возникли одновременно из одних и тех же предшественников в процессе самоорганизации. Важнейшим из таких предшественников мы считаем формамид (HCONH_2). Формамид содержит связи углерод-водород, углерод-кислород, углерод-азот и азот-водород. Установлено, что из формамида, хотя и в несколько различных условиях, могут быть получены карбоновые кислоты, аминокислоты, все пять оснований нуклеиновых кислот, ациклонуклеозиды, сахара и аминсахара, то есть, почти все необходимые предшественники компонентов известных клеточных организмов [1]. Однако формамид не содержит связей углерод-углерод. С образования именно этих связей и начинается жизнь. Связь углерод-углерод не разрушается водой (не гидролизуется), что обеспечивает необходимую устойчивость органических соединений. Понимание исключительной важности образования связей углерод-углерод и положено в основу теории строения органических соединений, одним из создателей которой является Александр Михайлович Бутлеров – основатель Казанской школы химиков.

Важно, что формамид может при нагревании превращаться в циановодород путем отщепления молекулы воды или в формиат аммония путем присоединения молекулы воды; более того, формамид может превращаться в формальдегид, однако этот процесс реализуется в весьма специфических условиях – при ультрафиолетовом облучении в присутствии катализатора – диоксида титана [1]. Проблему превращения формамида в формальдегид в более подходящих условиях пребиотического синтеза мы рассмотрим ниже. Как и вода, отмеченные соединения – циановодород, формамид и формальдегид – повсеместно распространены в космосе, но поскольку из формамида могут быть получены как циановодород, так и формальдегид, именно формамид может быть ключевым прекурсором пребиотических синтезов наряду с водой. Однако формамид имеет некоторое преимущество перед водой, поскольку, будучи так же ассоциированной жидкостью, он кипит при более высокой температуре (210°C) и может накапливаться в горячих бассейнах, где могли проходить эффективные пребиотические синтезы с его участием. Тем не менее, формамида и воды недостаточно для образования всех предшественников биологических соединений. Для этого необходимы соединения фосфора в виде солей фосфорной кислоты – фосфатов. Дело в том, что, во-первых, фосфатные остатки связывают фрагменты сахаров в нуклеиновых кислотах, во-вторых, гидролиз фосфатных связей аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) обеспечивает энергией все основные синтезы в биологических системах (следовательно, АТФ является универсальной энергетической монетой организмов), и в-третьих, фосфаты нужны для образования фосфолипидов, образующих мембраны клеток. То есть, фосфор нужен для обеспечения всех трех основных систем клеток – генетического аппарата, аппарата метаболизма и системы компартментализации (создания мембран). Можно заключить, что триада – вода, формамид и фосфаты – может быть тем родоначальником, который достаточен для осуществления всех пребиотических синтезов. Источником энергии для таких синтезов могут быть ударные волны, вызываемые падением метеоритов, а катализатором в этих синтезах может стать материал метеоритов.

Ранее уже предпринимались попытки пребиотических синтезов под ударным воздействием. Так, при ударном воздействии на систему метан – этан – аммиак – вода выделены четыре аминокислоты (глицин, аланин, валин и лейцин) [2]. Использование льда, содержащего воду, аммиак, диоксид углерода и метанол, привело к получению шести аминокислот (глицин, DL-аланин, DL- α -аминомасляная кислота, DL- α -аминоизомасляная кислота, DL-норвалин, DL-изовалин) [3]. В работе [4] показано, что при ударном воздействии в присутствии железа и воды молекулярный азот эффективно восстанавливается до аммиака. При ударном воздействии на систему, содержащую воду, аммиак, молекулярный азот, углерод, а также железо и никель, которые входят в состав метеоритов, получена аминокислота глицин и некоторые карбоновые кислоты и амины [5]. Использование водных растворов формиатов и карбонатов аммония позволило получить четыре аминокислоты (глицин, α -аланин, β -аланин, саркозин) и некоторые алифатические амины (метиламин, этиламин, пропиламин, бутиламин) [6]. Отметим, что в каждом из этих синтезов было получено менее десяти пребиотических продуктов. Относительную неудачу

этих синтезов можно объяснить тем, что в них были использованы соединения, не адекватные действительным прекурсорам пребиотических синтезов.

В попытке усовершенствовать ударные пребиотические синтезы мы провели их в системах на основе водного формамида, который, как уже отмечено, является наиболее вероятным пребиотическим прекурсором. Для этого был сконструирован реактор, схема которого показана на рис. 1, где представлен контейнер с корпусом и мишенным блоком, а также малая и большая гайки, герметизирующие реакционный объем, задаваемый кольцом. Реактор изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т на предприятии «Сапфир» в Ардатове Нижегородской области.

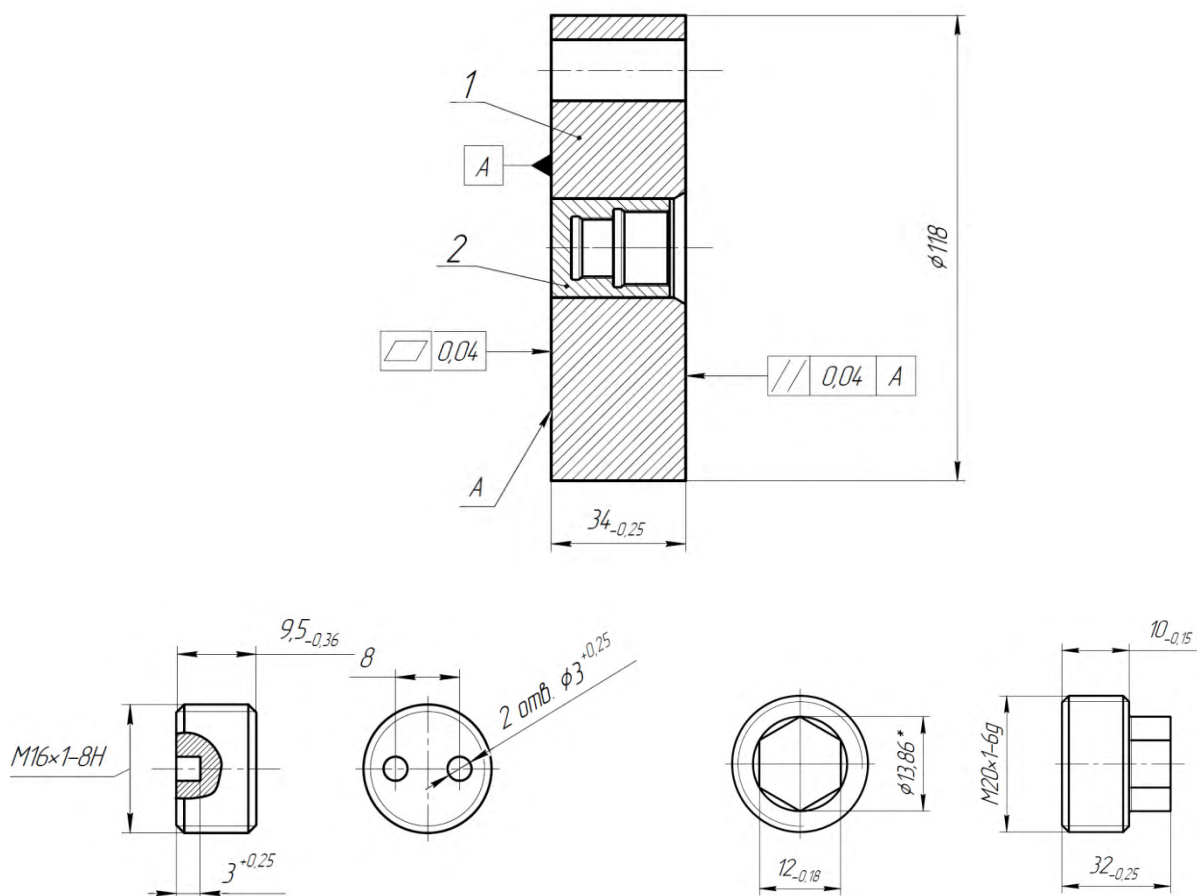


Рисунок 1. Конструкция реактора, использованного в ударных синтезах

В качестве ключевых компонентов ударных синтезов нами использованы формамид, вода, гидрокарбонат калия (KHCO_3), повсеместно встречающийся в океанах, а также триметафосфат натрия ($\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$), который содержится в газовых извержениях вулканов [7]. Варьирование скорости воздействия ударника на реактор позволило нам изменять температуру и давление в реакционной системе.

Как видно из смоделированных по известной программе [8] зависимостей температуры и давления в реакторе от времени при ударном воздействии (рис. 2), при скорости ударника 614 м/с через 0.8 мкс после удара температура достигает максимального значения ~570 К, а давление – ~13 ГПа. Через 4 мкс после такого воздействия температура опускается до ~450 К, а давление – до ~0.9 ГПа. В то же время при скорости ударника 536 м/с через 0.8 мкс после удара температура достигает максимального значения ~500 К, а давление – ~11 ГПа. Через 4 мкс после этого температура опускается до ~410 К, а давление – до ~0.9 ГПа. Таким образом, варьируя скорость ударника, можно изменять не только давление и температуру в реакторе, но и условия его охлаждения.

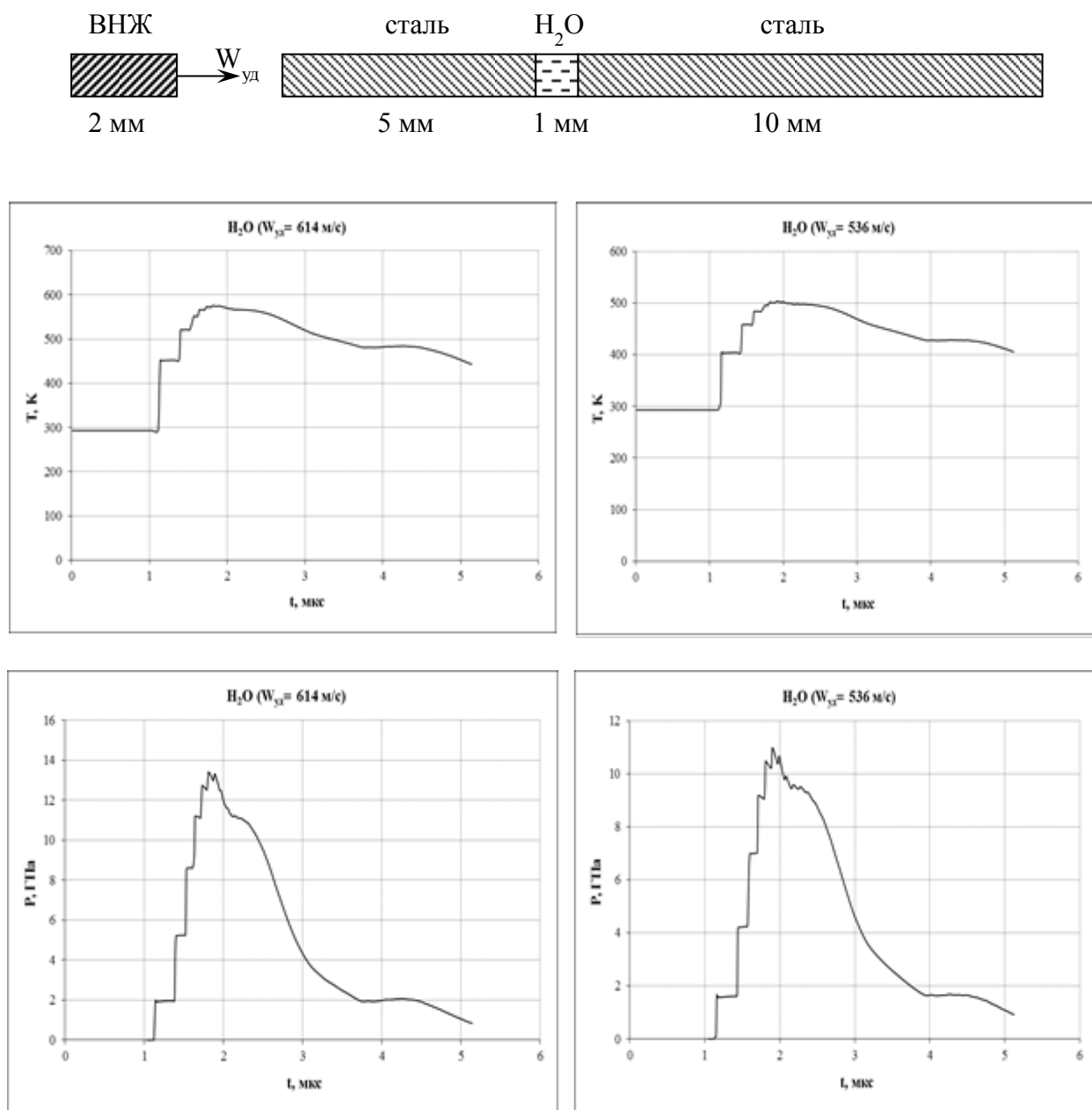


Рисунок 2. Смоделированные зависимости температуры и давления в реакторе от времени при ударном воздействии при скорости снаряда 614 м/с (слева) и 536 м/с (справа)

Всего в работе выполнено более 50 ударных экспериментов в системах вода – формамид – гидрокарбонат калия ($Na_3P_3O_9$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $Cu_2(OH)_2CO_3$, Fe, Ni, FeS, NiS, бейделлиты, цеолиты) с поддержанием pH введением гидроксида натрия и барботированием растворов высокочистыми газами (N_2 или CO_2). Анализ продуктов синтеза проводился методом tandemной хромато-масс-спектрометрии (LC-MS-MS) в положительной (катионной) и отрицательной (анионной) ионизации. Здесь мы рассмотрим только несколько примеров такого анализа.

В табл. 1 для системы вода – формамид – триметафосфат натрия – порошковое железо при pH 9.6 в атмосфере азота наряду с другими параметрами указаны площади хроматографических пиков, передающие относительные концентрации ионов, а также идентифицированные формулы ионов. Как видно из табл. 1, в указанной системе зафиксировано 15 соединений.

Таблица 1. Результаты LC-MS анализа в системе вода – формамид (3.0 М) – триметафосфат натрия (0.2 М) – гидроксид натрия при рН 9.6 в атмосфере азота после ударного воздействия при скорости ударника 612 м/с (M/z – отношение массы иона к заряду, RT – время удержания, формулы ионов в положительной ионизации соответствуют монопротонированным веществам $[M+H]^+$, а в отрицательной – монодепротонированным $[M-H]^-$)

Положительная ионизация				Отрицательная ионизация			
M/z	RT , мин.	Площадь	Формула	M/z	RT , мин.	Площадь	Формула
97.0775	1.15	126	$C_5H_9N_2^+$	93.0354	0.95	408	$C_6H_5O^-$
102.1293	1.15	120	$C_6H_{16}N^+$	136.0169	1.1	466	$C_3H_7NO_3P^-$
128.1442	2.25	438	$C_8H_{18}N^+$	137.0248	0.95	385	$C_7H_5O_3^-$
129.1027	1.15	120	$C_6H_{13}N_2O^+$	143.1082	1.1	417	$C_8H_{15}O_2^-$
143.1183	1.2	212	$C_7H_{15}N_2O^+$				
170.1288	1.15	298	$C_8H_{16}N_3O^+$				
185.1651	9.65	230	$C_{10}H_{21}N_2O^+$				
272.2576	16.1	1979	$C_{16}H_{34}NO_2^+$				
288.2521	15.55	274	$C_{16}H_{34}NO_3^+$				
300.2885	18.4	975	$C_{18}H_{38}NO_2^+$				
387.1906	17.35	239	$C_{17}H_{24}N_8O_3^+$				

Как следует из табл. 2, в системе, содержащей водный формамид и гидрокарбонат калия, при щелочных значениях рН от 8.63 до 10.44 в атмосфере азота образуется довольно много основных соединений [9]. Обратим внимание на очень высокое содержание известного уротропина (метенамин, соединение 2). Все соединения идентифицированы по продуктам их распада в MS-MS эксперименте, которые подчиняются известным правилам, накопленным за многие годы в хромато-масс-спектрометрии [10]. На Схемах 1 и 2 показаны два примера довольно сложных путей распада 2-(фениламино)этан-1-ола (6) и N-[2-(пирролидин-1-ил)пропил]ацетамида (10), по которым проводилась идентификация соединений. Отметим, что высокая точность определения масс ионов однозначно задает формулы соединений. Всего в результате подробного анализа в системе вода – формамид – гидрокарбонат калия – гидроксид натрия идентифицировано 21 соединение.

Таблица 2. Условия и результаты ударных экспериментов в системе вода – формамид (FA) – бикарбонат калия – гидроксид натрия с продувкой азотом (согласно LC-MS-MS анализу, относительные интенсивности сигналов в LC-MS спектре даны в скобках)

№	Состав образца	Условия	Продукты ударного синтеза
1	3.0 М FA, 0.2 М $KHCO_3$, рН 8.63	$V = 585$ м/с, $T_{max} = 545$ К, $P_{max} = 12.5$ ГПа	$C_6H_{15}N$ 1 (136), $C_6H_{12}N_4$ 2 (10385), $C_8H_{13}N$ 4 (89), $C_8H_{11}NO$ 6 (1015), $C_6H_{12}N_2O$ 7 (328), $C_7H_{14}N_2O$ 8 (490), $C_{10}H_{20}N_2O$ 11 (620), $C_{12}H_{24}N_2O$ 13 (318), $C_9H_{16}N_2O$ 14 (274), $C_{15}H_{16}N_2O$ 15 (337), $C_5H_8N_2$ 16 (375), $C_8H_{14}N_2$ 18 (509), $C_{11}H_{18}N_2O_2$ 21 (253)

Продолжение таблицы 2

№	Состав образца	Условия	Продукты ударного синтеза
2	3.0 M FA, 0.2 M KHCO ₃ , pH 9.46	$V = 530$ м/с, $T_{\max} = 500$ K, $P_{\max} = 10.8$ ГПа	C ₆ H ₁₂ N ₄ 2 (24115), C ₈ H ₁₁ N 5 (424), C ₈ H ₁₁ NO 6 (586), C ₇ H ₁₄ N ₂ O 8 (357), C ₈ H ₁₆ N ₂ O 9 (1039), C ₉ H ₁₈ N ₂ O 10 (2737), C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O 11 (2274), C ₁₁ H ₂₂ N ₂ O 12 (1245), C ₁₂ H ₂₄ N ₂ O 13 (798), C ₇ H ₁₂ N ₂ 17 (875), C ₈ H ₁₄ N ₂ 18 (2382), C ₉ H ₁₆ N ₂ 19 (703), C ₁₀ H ₁₈ N ₂ 20 (565)
3	3.0 M FA, 0.2 M KHCO ₃ , pH 10.44	$V = 563$ м/с, $T_{\max} = 520$ K, $P_{\max} = 11.8$ ГПа	C ₁₀ H ₂₆ N ₄ 3 (359), C ₈ H ₁₁ N 5 (771), C ₈ H ₁₁ NO 6 (666), C ₈ H ₁₆ N ₂ O 9 (913), C ₉ H ₁₈ N ₂ O 10 (1556), C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O 11 (1137), C ₁₁ H ₂₂ N ₂ O 12 (407), C ₇ H ₁₂ N ₂ 17 (635)

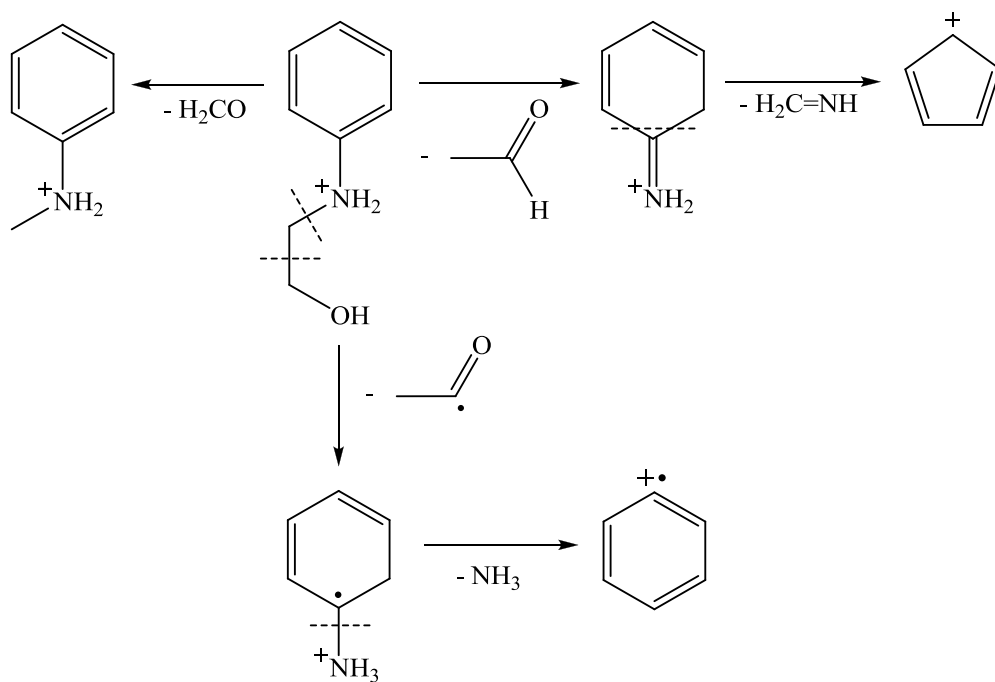


Схема 1

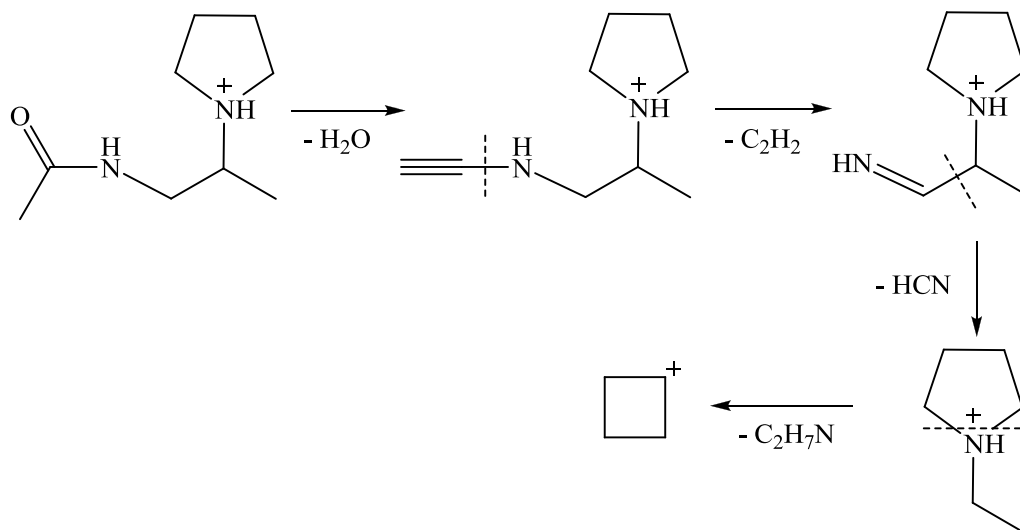


Схема 2

Все эти соединения представлены на Схеме 3 [9]. Как видим, они относятся к классам аминов (соединения 1, 4), полиаминов (соединения 2, 3), производным анилина (соединения 5, 6), карбоксиамида или ацетамида с замещенными пирролидина (соединения 7-13), пиррола (соединение 14), мочевины (соединение 15) и имидазола (соединения 16-21). Присутствие гомологичных серий среди детектированных соединений (7-9, 10-13, 16-20) наиболее рационально объясняется реализацией синтезов типа Фишера-Тропша с гетерогенным катализом на поверхности капсулы сохранения из нержавеющей стали. Это предположение подтверждается следующими тремя фактами.

Во-первых, достигающиеся при ударном воздействии высокие температуры обеспечивают протекание известных реакций (1)-(3) распада формамида до циановодорода, аммиака, монооксида углерода, молекулярного водорода и изоциановой кислоты [11-13], которые по данным квантово-химических расчетов [11] имеют близкие энергии активации, 73-78 ккал/моль. Во-вторых, известно, что железо является эффективным катализатором в синтезах типа Фишера-Тропша в присутствии водорода, монооксида углерода и аммиака [14, 15]. В-третьих, рассчитанное для ударного воздействия высокое давление промотирует эффективную адсорбцию водорода и монооксида углерода на поверхности нержавеющей стали даже в присутствии воды. Кроме того, следует принять во внимание возможность гидрогенизации циановодорода на поверхности металлического катализатора, подтвержденную квантово-химическими расчетами [16], а также учесть легкость процессов трансамидирования с участием формамида или ацетамида (согласно [17]). Известно, что в синтезах типа Фишера-Тропша на поверхности металлического катализатора адсорбируются реакционно-способные частицы (помечены индексом (а)), такие как H, CH, CH₂, NH, NH₂, HCN, H₂CNH [14-16] и другие, которые способны объяснить образование таких соединений, как ацетамид (в реакции (4)) для синтеза соединений 11-13 и аминонитрил (в реакции (5)) или аминоацетонитрил (в реакции (6)) для синтеза соединений 7-13. В таком случае с учетом реакций (4)-(6) и процессов трансамидирования (для соединений 7-9 с формамидом и 10-13 с ацетамидом) образование 19 из 21 соединения (кроме соединений 2 и 15) можно представить в обобщенном виде (без рассмотрения возможных интермедиатов) как реакции (7)-(16) с участием адсорбированных частиц, включая H, CH, CH₂, NH₂, H₂CNH, CHOH, аминонитрил (NH₂CN) и аминоацетонитрил (NH₂CH₂CN).

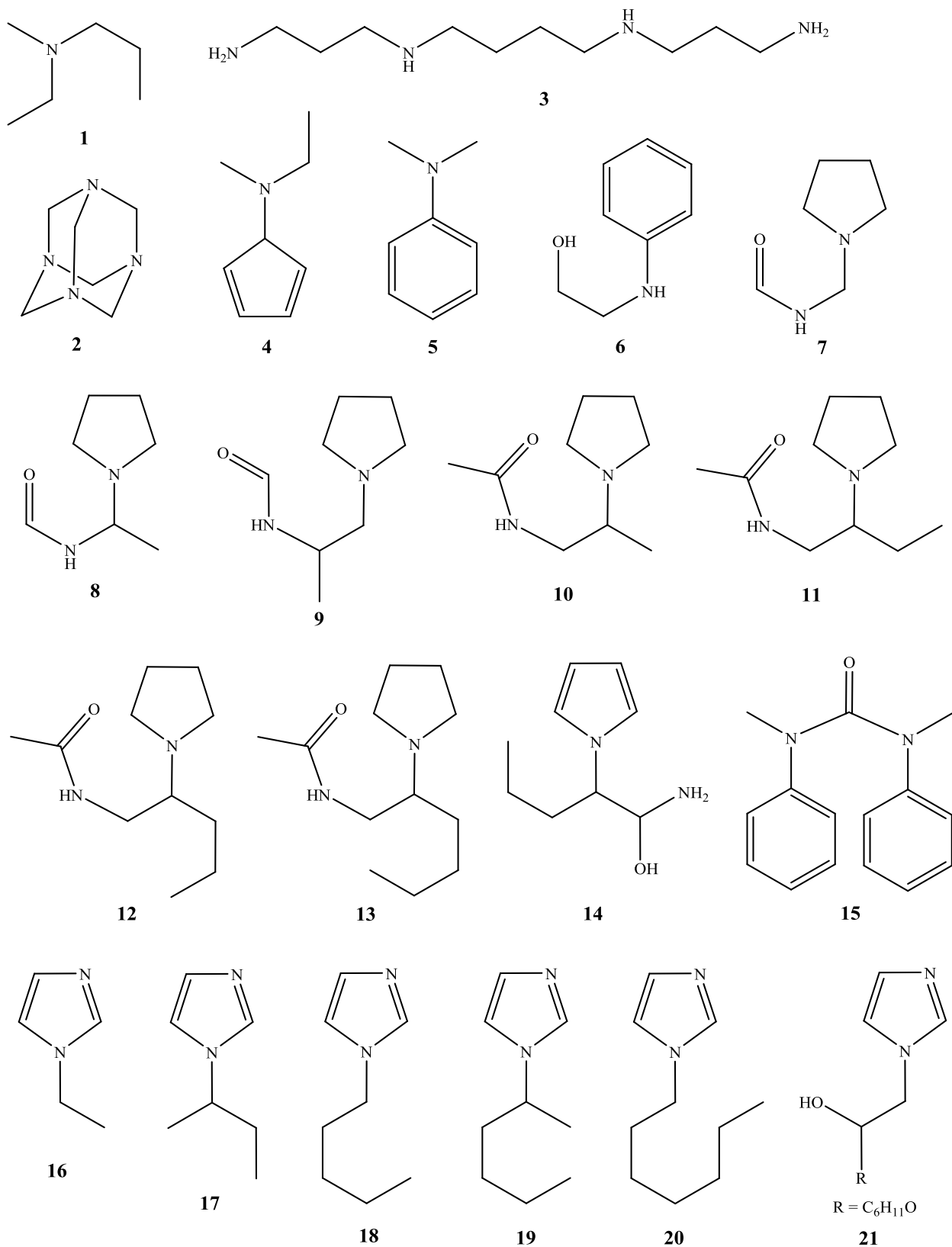
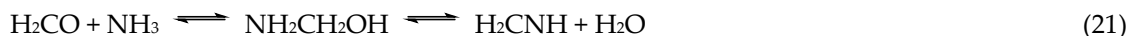
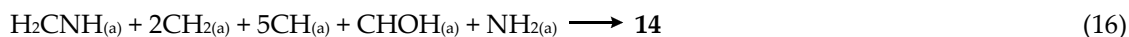
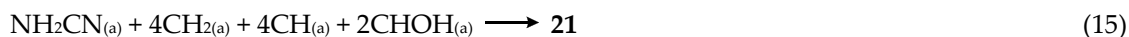
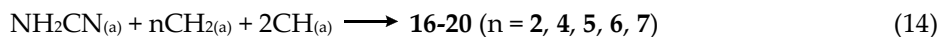
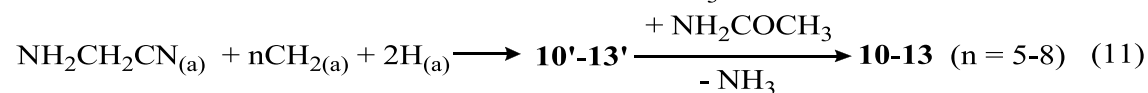
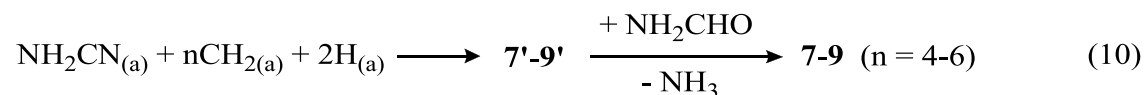
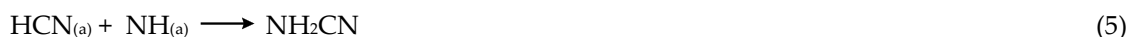


Схема 3





Реакции образования уротропина (2) и 1,3-диметил-1,3-дифенилмочевины (15) заслуживают особого внимания. Соединение 15 является продуктом трансамидирования N-метиланилина с мочевиной. Сама же мочевина получается по реакции (17) между аммиаком и изоциановой кислотой, образующихся, соответственно, по реакциям (2) и (3) (механизм реакции (17) предложен ранее [18]). Таким образом, в настоящих ударных экспериментах реализуется классический синтез Вёлера [19] – первый в мире синтез органического соединения из неорганического. Соединение 2 впервые было получено по реакции (18) между аммиаком и формальдегидом, называемой реакцией Бутлерова [20]. В отсутствие бикарбоната при ударном воздействии реакция Бутлерова не протекает, что указывает на образование формальдегида путем восстановления карбоната или бикарбоната адсорбированным водородом по реакциям (19) или (20). Известно также, что образование уротропина начинается с накопления метаноламина или метиленимина по реакции (21) [21]. Таким образом, в настоящих ударных экспериментах реализуется классический синтез Бутлерова. Образование уротропина в наших экспериментальных условиях чрезвычайно важно для пребиотической химии, поскольку при гидролизе уротропина в кислой среде образуются многие аминокислоты [22].

Всего в выполненных нами ударных синтезах было получено более 50 соединений. Синтезированные нами соединения помимо уже упомянутых относятся к различным классам, включая спирты, кислоты, оксикислоты, амины, аминокислоты, амиды, полиспирты, полиамиды и фосфорорганические соединения. Обнаружение громадного синтетического

потенциала формамид-содержащих систем при ударном воздействии на них составляет крупное достижение данной работы. Отметим, что наиболее продуктивные ударные синтезы в изученных системах протекают в щелочной среде при значениях рН порядка 9, которые достигаются в некоторых геотермальных зонах, например, в системах гейзеров Камчатки [23]. Этот факт указывает на возможность происхождения жизни в щелочных средах.

Важное достижение настоящей работы состоит в том, что нами впервые обнаружены каталитические синтезы типа Фишера-Тропша при ударном воздействии на водно-формамидные системы, до известной степени моделирующие процессы, которые могли протекать при падении железо-никелевых метеоритов в водно-формамидные области на ранней Земле. Заметим, что роль гетерогенного катализа в пребиотической химии пока недооценивается исследователями, хотя такой катализ может играть в пребиотической химии не менее важную роль, чем часто упоминаемая генерация свободных радикалов при УФ-облучении.

Полученные результаты подвигают нас к главной проблеме современной пребиотической химии, которой является синтез сахаров. Сахара образуются из формальдегида, получающегося в наших ударных синтезах. Каким образом осуществляется этот процесс? В 1861 году А.М. Бутлеров открыл реакцию формозы – образования сахаров из формальдегида в щелочной среде, которая впоследствии стала называться реакцией Бутлерова [24]. Реакция протекает весьма своеобразно: долгое время она почти не идет, затем начинает бурно развиваться и в конечном счете дает целую гамму сахаров, часто в виде густой массы. Долгое время механизм этой реакции не был известен. Однако в 1959 году Р. Бреслоу предложил следующий механизм этой реакции [25]. На первой стадии из двух молекул формальдегида получается гликольальдегид, присоединение к нему еще одной молекулы (в процессе так называемой альдольной конденсации) дает глицероальдегид, из которого может получиться дигидроксиацетон, присоединение к последнему или глицероальдегиду еще одной молекулы формальдегида дает тетрозы (сахара, содержащие четыре атома углерода), а последующее присоединение к тетрозе одной за другой молекул формальдегида приводит к сахарам, содержащим пять, шесть или семь атомов углерода (соответственно пентозам, гексозам и гептозам). Главной особенностью реакции Бутлерова является стадия, называемая ретроальдольной реакцией (обратной альдольной конденсацией), в которой одна молекула тетрозы разлагается на две молекулы гликольальдегида, которые снова вступают в реакцию альдольной конденсации, усиливая образование глицеральдегида. То есть, один из промежуточных продуктов реакции (тетроза) ускоряет синтез всех остальных продуктов реакции Бутлерова. Такие реакции называются автокаталитическими. Автокатализ – важнейшее свойство самоорганизованных систем, к которым относятся живые организмы.

Именно автокатализ может стать ключом к решению главной проблемы происхождения жизни – проблемы гомохиральности. Все аминокислоты и сахара, входящие в состав природных полимеров, существуют в виде двух форм, являющихся зеркальным отражением друг друга – оптических изомеров или энантиомеров, относящихся либо к левому (L) ряду, либо к правому (D) ряду. Гомохиральность состоит в том, что все мономеры природных аминокислот, входящих в состав белков, относятся только к L-ряду, а все мономеры природных сахаров – только к D-ряду. Можно предположить, что происхождение жизни и происхождение гомохиральности есть одно и то же событие. Каким образом могла возникнуть гомохиральность? Наиболее вероятно, что в конечном счете гомохиральность достигается путем постепенного усиления первоначально небольшого избытка одного из энантиомеров в автокаталитическом процессе химического отбора.

Такое автокаталитическое усиление энантиомерного избытка, не относящееся к природным соединениям, впервые было открыто группой японских исследователей под руководством Соаи [26, 27]. В реакции Соаи [26] ахиральный ароматический альдегид (пиримидин-5-карбоксальдегид) реагирует с цинкорганическим соединением – диизопропилцинком. Образующееся при этом промежуточное соединение хирально и при гидролизе превращается в энантиомерный спирт, причем в присутствии небольшого энантиомерного избытка такого спирта определенной хиральности ((S)-2-метил-1-(5-пиримидил)пропан-1-ол) гидролиз промежуточного соединения дает

преимущественно спирт такой же хиральности (*S*). Таким образом, продукт определенной хиральности катализирует образование промежуточного соединения той же хиральности с его дальнейшим превращением в новый продукт той же самой хиральности, а промежуточное соединение противоположной хиральности (*R*) постепенно превращается в исходные ахиральные реагенты. Следует отметить, что подобный автокаталитический путь постепенного накопления одного из энантиомеров был математически обоснован в модели Франка еще в 1953 году [28]. Подчеркнем, что цинкорганические синтезы были впервые разработаны А.М. Бутлеровым в 1863 году [29], а затем усовершенствованы его учеником А.М. Зайцевым и учеником последнего Е.Е. Вагнером [30]. Наиболее важно, что автокаталитическая реакция Соаи имеет некоторую аналогию с автокаталитической реакцией Бутлерова, что дает надежду на возможность достижения управляемого энантиоспецифического синтеза сахара из формальдегида.

В заключение следует сделать одно замечание о происхождении жизни. Чарльз Дарвин предполагал, что жизнь возникла в теплом маленьком бассейне ("warm little pond") [31]. На основе результатов выполненных нами ударных синтезов мы можем модифицировать это утверждение следующим образом: «Жизнь могла возникнуть благодаря ударному воздействию метеоритов при их падении в щелочные водно-формамидные озера, расположенные вблизи вулканов на ранней Земле». Таким образом, ударное воздействие может обладать не только разрушительной, но и созидательной силой, порождающей величайший феномен жизни!

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 17-03-00133.

Список литературы

1. R. Saladino, G. Botta, Pino S., G. Constanzo, E. Di Mauro, Chem. Soc. Rev., 2012, 41, P.5526-5565.
2. A. Bar-Nun, N. Bar-Nun, S.H. Bauer, C. Sagan, Science, 1970, 168 (3930), 470-472.
3. Z. Martins, M.C. Price, N. Goldman, M.A. Sephton, M.J. Burchell, Nature Geosci., 2013, 6, P.1045-1049.
4. H. Nakazawa, T. Sekine, T. Kakegawa, S. Nakazawa, Earth Planet Sci. Lett., 2005, 235, P. 356-360.
5. Y. Furukawa, T. Sekine, M. Oba, T. Kakegawa, H. Nakazawa, Nature Geosci., 2009, 2, P. 62-66.
6. C. Suzuki, Y. Furukawa, T. Kobayashi, T. Sekine, H. Nakazawa, T. Kakegawa, Geochim., Geophys., Geosystems., 2015, 16, P. 2382-2394.
7. Y. Yamagata, H. Watanabe, M. Saitoh, T. Namba, Nature, 1991, 352, P. 516-519.
8. Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов, ВАИТ, Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1982, 3(11), С. 11-14.
9. V.G. Shtyrilin, V.A. Borissenok, N.Y. Serov, V.G. Simakov, V.A. Bragunets, I.R. Trunin, I.A. Tereshkina, S.A. Koshkin, M.S. Bukharov, E.M. Gilyazetdinov, E.E. Shestakov, A.G. Sirotkina, A.V. Zakharov, Orig. Life Evol. Biosph., 2019, P. 1-18, <https://doi.org/10.1007/s11084-019-09575-8>.
10. J.H. Gross, Mass Spectrometry, Springer, Berlin Heidelberg, 2004.
11. V.S. Nguyen, H.L. Abbott, M.M. Dawley, T.M. Orlando, J. Leszczynski, M.T. Nguyen, J. Phys. Chem. A, 2011, 41, P. 841-851.
12. M. Ferus, D. Nesvorný, J. Šponer, P. Kubelí, R. Michlčíková, V. Shestivská, J.E. Šponer, C. Svatopluk, PNAS, 2015, 112, P. 657-662.
13. H.T. Nguyen, Y.A. Jeilani, H.M. Hung, M.T. Nguyen, J. Phys. Chem. A, 2015, 119, P. 8871-8883.
14. J. van de Loosdrecht e.a. In: Comprehensive Inorganic Chemistry II, vol. 7. Reedijk J., Poeppelmeier K. (eds.) Elsevier, Oxford, 2013, P. 525-557.
15. H.R. von Henkel. The influence of ammonia on Fischer-Tropsch synthesis and formation of N-containing compounds. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2012.
16. M.-K. Hsiao, W.-T. Lo, J.-H. Wang, H.-L. Chen, J. Phys. Chem. C, 2016, 120, P. 22946-22956.
17. R.M. Lanigan, T.D. Sheppard, Eur. J. Org. Chem., 2018, 33, P. 7453-7467.

18. C.A. Tsipis, P.A. Karipidis, J. Am. Chem. Soc., 2003, 125, P. 2307-2318.
19. *Friedrich Wöhler*, Annalen der Physik und Chemie, 1828, 88, P. 253-256.
20. Butlerov A., Ann. Chem., 1860, 115, P. 322-327.
21. Огородников С.К. Формальдегид. Химия, Ленинград, 1984.
22. Fox S.W., Windsor C.R., Science, 1970, 170, P. 984-986.
23. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Shlufman K.V., Orig. Life Evol. Biosph., 2015, 45, P. 93-103.
24. Boutlerow A., C. R. Acad. Sci. Paris, 1861, 53, P. 145-147.
25. Breslow R., Tetrahedron Lett., 1959, 21, P. 22-26.
26. Soai K., Shibata T., Morioka H., Choji K., Nature, 1995, 378, P. 767-768.
27. Soai K., Osanai S., Kadowaki K., Yonekubo S., Shibata T., Sato I., J. Am. Chem. Soc., 1999, 121, P. 11235-11236.
28. Frank F.C., Biochem. Biophys. Acta, 1953, 11, P. 459-463.
29. Boutlerow A., Bull. Soc. Chim. Paris., 1863, 5, P. 582-594.
30. Wagner G., Zaytzeff A., Justus Liebigs Ann. Chem., 1875, 175, P. 351-374.
31. Darwin C. The Life and Letters of Charles Darwin, Letter to Joseph Hooker. John Murray, London, 1888, vol. 3, P. 18.