УДК 57.011
DOI 10.29003/m4692.0514-7468.2020_47_2/242-249
EDN EIYCZC

О ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ЖИЗНИ С УЧЁТОМ ПАНСПЕРМИИ

М.М. Шигаев*

По результатам расчёта получена вероятность появлений простейшего репликатора (жизни) для некоторого конечного объёма Вселенной, с учётом различных начальных условий и простейшего репликатора разной сложности. Результаты превосходят почти на 1000 порядков аналогичные расчёты, ранее опубликованные в специализированной литературе. Основной спецификой проведённого исследования является представление о простейшем репликаторе как конфигурации из отдельных цепочек РНК (рибозимов), сформировавшейся благодаря панспермии. Сделаны выводы о неравномерном распределении жизни во Вселенной.

Ключевые слова: *расчёт, вероятность, репликатор, сложность, рибозим, РНК, жизнь, появление жизни.*

Ссылка для цитирования: *Шигаев М.М.* О вероятности появления жизни с учётом панспермии // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 2. С. 242–249. DOI: 10.29003/m4692.0514-7468.2020_47_2/242-249.

Поступила 09.03.2025 / Принята к публикации 28.05.2025

ON THE PROBABILITY OF THE EMERGENCE OF LIFE TAKING PANSPERMIA INTO ACCOUNT

M.M. Shigaev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

According to the results of our calculation, the appearance probability of the simplest replicator (life) has been obtained for some finite volume of the Universe, taking into account different initial conditions and the simplest replicator of different complexity. The results exceed by almost 1000 orders of magnitude similar calculations published in the specialized literature. The main specificity of this study is the idea of the simplest replicator as a configuration of individual RNA strands (ribozymes) formed due to panspermia. A conclusion about the uneven distribution of life over the Universe is drawn.

Keywords: *calculation, probability, replicator, complexity, ribozyme, RNA, life, emergence of life.*

For citation: Shigaev, M.M., "On the probability of the emergence of life taking panspermia into account", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **47**, no 2, 244–251 (2025) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4692.0514-7468.2020_47_2/242-249.

Введение. Общеизвестно, что точного определения понятию «жизнь» не существует. Это объясняется как большим количеством элементов, составляющих жизнь, так и разнообразием их характеристик. К тому же ряд свойств живой природы зачастую встречается у объектов неживой природы. Исходя из этого, численный расчёт вероятности появления жизни носит гипотетический характер, по крайней мере, до воссоздания точного биохимического механизма образования жизни. На сегодняш-

* Шигаев Михаил Михайлович – студент бакалавриата, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, *shigaevmisha@mail.ru*, ORCID: 0009-0004-3540-2787.

Примечание редакции: Статья публикуется в порядке дискуссии.

ний день в качестве основной рассматривается теория мира рибонуклеиновых кислот (РНК), которые выполняют функции хранения генетической информации и катализа химических реакций. В то же время в качестве гипотезы предполагается возможность переноса простейших живых организмов через космическое пространство – панспермия.

По мнению В.А. Мазура [3], появление жизни на Земле в результате панспермии базируется на гипотезе космологической спонтанной самосборки жизни, вероятность которой чрезвычайно близка к единице. Однако в представленных расчётах учитывается только одна из возможных цепочек, способных к саморепликации. Решение этой задачи без учёта числа молекул, способных к саморепликации, выглядит чрезвычайно сложным и не имеющим устойчивого и единственного решения.

Представляется вполне возможным синтез гипотез панспермии и РНК-мира, основанный на некоторых допущениях, который позволит получить количественные оценки вероятности зарождения жизни. С учётом ключевых свойств живых систем, связанных с саморепликацией и передачей наследственной информации в гипотезе РНК-мира, предком современной ДНК–РНК – белковой жизни являются молекулы РНК, обладающие уникальным набором необходимых для жизни свойств, связанных одновременно с процессом катализа и возможностью хранить передаваемую в последующие поколения информацию.

Общеизвестно [1, 5, 6 и др.], что в состав РНК входят четыре нуклеотида: А, Г, Ц, У (аденин, гуанин, цитозин, урацил), которые и зарождают первую жизнь, являющуюся по сути молекулой РНК с различной конфигурацией этих 4-х нуклеотидов. Они формируют простейший репликатор – молекулу, способную в подходящей среде создавать копии самой себя, от которой посредством естественного отбора произошёл *LUCA* (последний универсальный общий предок), а в дальнейшем и все живые организмы, ныне живущие на Земле.

Сложность конструкции простейшего репликатора вполне поддаётся теоретическим оценкам. Например, Е.В. Кунин в работе [2] оценивает сложность простейшего репликатора в 280–1800 нуклеотидов, образованных из азотистого основания, моносахарида (пентозы) и остатка фосфорной кислоты. Этим автором также рассчитана вероятность спонтанного возникновения такого простейшего репликатора сложностью 1800 нуклеотидов. Для пространственно-временного поля, ограниченного некой *H*-областью и неким временем *t*, значение этой вероятности, по мнению Е.В. Кунина, составляет 10^{-1018}. Вполне естественно, что эта вероятность очень мала, даже с учётом *H*-области размером в 10^{21} землеподобных планет, времени *t* в 10 млрд лет и скоростью синтеза один *n*-мер в секунду на 1 $см^3$ пространства.

Вероятность спонтанного возникновения простейшего репликатора остаётся низкой и для репликаторов значительно более низкой сложности. Например, для репликатора сложностью в 280 нуклеотидов вероятность его образования, рассчитанная по формуле (1), равна 10^{-83}:

$$E = H * t/N = \frac{1.5 * 10^{61}}{10^{0.6*n}} = 10^{-83} \quad (1)$$

где: *E* – количество простейшего репликатора в заданной области; *n* – сложность простейшего репликатора (*n*-мера); *t* – время, в течение которого *n*-мер мог синтезироваться – $3*10^{17}$ с; *N* – количество возможных последовательностей нуклеотидов; *H* – объём доступного пространства, пригодного для синтеза n-мера, который численно равен объёму обитаемого слоя на планете – $5*10^{22}$ $см^3$ для 10^{21} землеподобных планет.

Таким образом, способ расчёта вероятности Е.В. Кунина включает оценку спонтанного самообразования жизни методом случайного перебора всех природных вариантов *n*-мера сложностью 280–1800 нуклеотидов. Ниже рассмотрим другой способ расчёта вероятности появления простейшего репликатора.

Модель появления репликатора. Молекула РНК, обладающая каталитическим свойством, называется рибозимом. Эти молекулы способны катализировать как синтез различных цепочек РНК, так и отдельных пептидов. При этом наиболее успешно проявляют свои каталитические свойства рибозимы, имеющие в зависимости от внешних условий (температура, кислотность и др.) длину от 20 до 84 нуклеотидов. В качестве примера приведём короткий (всего 84 нуклеотида) рибозим кросс-хиральной РНК-полимеразы, который может катализировать собственную копию через катализ, создание собственной копии с альтернативной хиральностью [11]. Кроме того, на минеральных подложках удаётся синтезировать одноцепочечные РНК длиной до 50 нуклеотидов (если это полимеры одного нуклеотида) или до 20 нуклеотидов (из набора всех четырёх нуклеотидов) [7], которые к тому же могут размножать друг друга путём легирования, собирая копии из олигонуклеотидов [9].

Однако рибозимы не могут считаться первыми репликаторами, т. к. они не могут синтезировать сами себя самостоятельно. Они синтезируются либо в комплексе с другими рибозимами, либо только на определённом субстрате, либо сшиванием и разрезанием других готовых цепочек РНК различной длины. Интересно, что эти процессы не наблюдаются в современных клетках. Следует заметить, что рекомбинации разных фрагментов РНК группируются в самовоспроизводящиеся рибозимы, которые спонтанно образуют автокаталитические циклы, и тем самым успешно воспроизводят сами себя. Однако самореплицируются они не в качестве отдельных молекул, а в качестве целого автокаталитического набора [12]. В результате, если рассматривать в качестве репликатора не отдельную молекулу, а подобный «живой раствор», то этот процесс становится в большей степени похож на полноценную репликацию.

Автор вполне допускает возможность группировки искомого простейшего репликатора не из отдельных мономеров (как принято в расчёте у Е.В. Кунина), а из нескольких рибозимов, участвовавших в подобном автокаталитическом цикле. Таким образом, образование простейшего репликатора сводится к объединению нескольких относительно коротких рибозимов в одну большую молекулу РНК.

Предпосылки для расчёта. Гипотетический простейший репликатор имеет сложность от 280 до 1800 нуклеотидов. Предполагаемая средняя длина рибозимов – 20–84 нуклеотида. Соответственно, сложность репликатора уменьшается с 1800 элементов до 90. Для примера рассмотрим сборку репликатора из рибозимов со средней длиной 20 нуклеотидов. В данном случае имеем четыре граничных варианта, состоящих из 4, 14, 22 и 90 элементов.

Поскольку отдельный рибозим сам является РНК-молекулой (n-мером), то к нему вполне обоснованно применяются те же правила спонтанного самообразования, что и для синтеза первого простейшего репликатора. Например, рибозиму в 84 нуклеотида соответствует частота возникновения, которая, согласно (1), равна:

$$E = \frac{1.5*10^{61}}{10^{0.6*84}} = 5.97*10^{10}.$$

Полученное число определяет число появлений во Вселенной одного из набора рассматриваемых рибозимов. Видно, что их число значительно ниже предполагаемого

числа галактик в наблюдаемой Вселенной (100 млрд или 10^{11}), не говоря уже про число планет во Вселенной, которое значительно больше. В связи с этим особенно важным становится механизм доставки рибозимов на одну планету для репликации, который до настоящего времени не определён. Самое интересное, что такой механизм существует.

Панспермия. На возможность межзвёздной панспермии указывает ряд косвенных доказательств. Например, существует полноценное микробное сообщество, находящееся в толще земной породы на глубине более 6 км. Оно живёт без каких-либо внешних источников энергии от 3-х до 25 млн лет [8]. Другим примером возможной панспермии является наличие в метеорите «Acfer 086» белка гемолитина, который смог просуществовать там 4,6 млрд лет [10]. Поэтому предположение о возможном переносе живых организмов внутри некого астероида или внутри плотного сгустка пыли, защищённого от излучения, по сути, указывает на возможный перенос живых организмов через космическое пространство.

Рассматривая в качестве объектов переноса в ходе панспермии именно рибозимы, важно учесть их потенциальную устойчивость к внешним воздействиям в ходе путешествия между звёздными системами, что определяется главным образом схожестью их сложности (строения) с белковыми молекулами внеземного происхождения (гемолитин). Так как при этом в межзвёздной транспортировке участвуют не полноценные живые организмы, а короткие цепочки РНК (более простые по структуре элементов, чем одноклеточные бактерии), то потенциальная межзвёздная панспермия предбиологических компонентов жизни (рибозимов) становится более вероятной.

Модель распространения таких предбиологических компонентов по Галактике описана А.Д. Пановым в работе «Панспермия и механизмы возникновения жизни во Вселенной» [4]. По его мнению, попав вместе с метеоритом на планету, пригодную для адаптации, рибозим может быстро (за сотни или тысячи лет) распространиться по всей планете, вытесняя более слабые местные системы.

С поверхности планеты предбиологические системы могут попадать в космос вместе с осколками грунта, выбиваемого с планеты крупными метеоритами, из-за чего эта планета сама становится источником панспермии. Вполне возможно, что родительская звезда этой планеты сама станет источником панспермии, если она окружена облаком «инфекции», которое передаётся другой звёздной системе в ходе межзвёздного взаимодействия.

В работе [4] рассчитана скорость распространения такой галактической панспермии. Там, например, указано, что 70 % Галактики можно заселить предбиологическими компонентами жизни за время 300 млн лет. Скоротечность этого процесса не вызывает сомнений, особенно с учётом времени возникновения простейшего репликатора в 10 млрд лет, что позволяет пренебречь временем панспермии в дальнейших расчётах.

Общеизвестно, что характерное время переноса жизни от одной звёздной системы до другой зависит от скорости движения её источника по Галактике. Распространение волны панспермии при этом не будет иметь диффузионного характера, а приобретёт характер автоволнового процесса, распространяющегося с некоторой средней постоянной скоростью. Решающее значение здесь имеет скорость волны панспермии в Галактике, равная 30 км/с, типичная для пекулярного хаотического движения звёзд. При этой скорости характерное время переноса волны панспермии составит порядка 100 тыс. лет.

Следует отметить, что данная скорость исключает возможность межгалактической панспермии, поскольку расстояние между галактиками очень велико. При движении с этой скоростью время переноса между галактиками (в случае блуждающего в межгалак-

тическом пространстве астероида) составило бы примерно 25 млрд лет для ближайшей к нам галактики — Андромеды. Это значительно превышает не только срок, в который живые системы могут существовать автономно, но и вообще всё известное нам время существования жизни.

Расчёты. Найдём ожидаемое число появлений некого *n*-мера в некой *H*-области пространства на временном интервале *t*. Для рибозимов сложностью *n*, равной 84 нуклеотидам, число их появления, согласно формуле (1), будет:

$$E = \frac{1.5*10^{61}}{10^{0.6*84}} = 5.97*10^{10}.$$

Именно в таком количестве эти рибозимы случайным образом могут появиться в любом месте Н области наблюдаемой Вселенной. Более того, согласно расчётам А.Д. Панова, посредством механизма панспермии рибозимы могут заполнить все потенциально пригодные для жизни планеты в Галактике за срок примерно 300 млн лет.

Добавим в формулу некий коэффициент панспермии k, характеризующий количество условных рибозимов, переживших космическое путешествие и добравшихся до землеподобной планеты. Численно этот коэффициент может принимать значения $0 < k < 1$. Тогда формула расчёта вероятности появления *n*-мера примет вид:

$$E = (H * t/N) * k .$$

Положим в дальнейшем, что коэффициент k близок к 1, тогда, чтобы панспермия прошла успешно, достаточно, чтобы космическое путешествие пережили всего несколько молекул рибозимов. Причём в любой из 100 миллиардов галактик, наблюдаемых во Вселенной, может случайным образом появиться хотя бы один из $5{,}97 * 10^{10}$ существующих рибозимов.

По результатам компьютерного моделирования, проведённого автором, доля галактик, где появится один рибозим или более, равняется $d = 0.453$. В случае использования для расчётов другого количества рибозимов, соответствующим образом изменится и доля галактик.

Число элементов, из которых состоит простейший репликатор, находится по формуле (2):

$$S = n_r/n \qquad (2)$$

где S – число элементов (рибозимов), из которых должен собраться простейший репликатор; n_r – сложность простейшего репликатора в нуклеотидах; n – сложность отдельного рибозима. Так, для репликатора сложностью в 1800 нуклеотидов получим:

$S = n_r/n = 1800/84 \approx 21.42$ элемента, где каждый элемент – это определённый тип рибозима.

Далее найдём количество галактик, в которых одновременно появятся все 21.42 нужных рибозима. Именно в этих галактиках в конечном итоге сможет появиться жизнь (простейший репликатор). Для этого воспользуемся формулой (3), описывающей известную теорему об умножении вероятностей:

$$G = d^s \qquad (3)$$

Для репликатора длиной в 1800 нуклеотидов, состоящего из 21.42 рибозимов, доля таких галактик, согласно расчётам по формуле (3), равна:

$$G = 0.453^{21.42} = 4.27 * 10^{-8}.$$

Первый простейший репликатор может появиться только в этом количестве галактик. Соответственно, объём *H*-области, доступный для синтеза первого репликатора,

также пропорционально уменьшится в G раз по причине отсутствия там всех нужных разновидностей рибозимов. В таком случае, при переходе в расчётах от оценки сложности репликатора в нуклеотидах к оценке сложности в рибозимах (в которых он собирается), общее число появлений простейшего репликатора будет определяться формулой (4):

$$E_r = G * (H * t)/N_r \quad (4)$$

где E_r – число появлений простейшего репликатора сложностью n_r; N_r – количество возможных последовательностей рибозимов в данном репликаторе, которое определяется формулой (5):

$$N_r = 10^{0.6 * S} = 10^{0.6 * 21.42} = 7.11 * 10^{12} \quad (5)$$

Результаты расчёта по формуле (4) показывают, что

$$E_r = \frac{(1.5*10^{61})* 4.27*10^{-8}}{7.11*10^{12}} = 8.9*10^{40}.$$

Если же предположить, что простейший репликатор в случае своего появления на планете уже не даст на ней появиться другим репликаторам снова, поскольку он заполнит собой все доступные для появления места в H-области, то итоговое число появлений репликатора будет значительно меньше. Поэтому значение E_r будет сильно ограничено количеством землеподобных планет, рассматриваемых в H-области.

В дальнейшем будем называть результаты расчёта, полученные с этим предположением, «по числу планет», а без этого предположения – сколько раз репликатор может появиться «потенциально». Тогда получим, что репликатор появлялся во Вселенной столько раз, сколько существует землеподобных планет в галактиках. Доля этих галактик, в которых могли появиться все нужные нам 22 типа рибозимов, определяется ранее найденным значением.

С учётом общего количества землеподобных планет в рассматриваемой H-области, равного 10^{21}, количество планет, где мог появиться репликатор, будет определяться по формуле (6) с учётом ранее найденного значения:

$$E_{r\ (\text{по числу планет})} = G * 10^{21} = 4{,}27 * 10^{13} \quad (6)$$

Важно, что формула (6) применима только в том случае, если значение E_r намного больше числа планет в рассматриваемой H-области.

Результаты расчётов. Из представленного алгоритма расчётов следует, что для определения числа появлений репликатора во Вселенной существенными являются три параметра. Это объём пространства и время, в котором синтез такого репликатора может происходить, а также длины простейшего репликатора и рибозимов, из которых такой репликатор состоит.

Время t, в течение которого такой синтез может происходить, это константа. Доступный для синтеза репликатора и рибозимов объём зависит от числа землеподобных планет во Вселенной и от размера этих планет. Это статичные коэффициенты, которые легко уточнить по мере накопления астрономических данных. Наиболее спорными и трудноопределимыми являются сложность простейшего репликатора и длина рибозимов.

Получаем четыре граничных варианта расчёта, которые для наглядности сведены в **таблицу 1**. Из анализа табличных данных видно, что ожидаемое число появлений репликатора равно $15 * 10^6$ и даже больше, что превышает результаты расчёта Е.В. Кунина в 10^{-1018} раз. Это объясняется тем, что Е.В. Кунин брал оптимистичные оценки, в частности, очень большое число землеподобных планет.

Здесь очень важно рассмотреть вероятность появления репликатора при пессимистичном подходе. В качестве примера предположим, что число планет у нас не 10^{21}, а

всего 10^{19}, а объём, в котором может происходить синтез рибозимов и репликатора на планете, в 10 раз меньше, уменьшив область *H* в 1000 раз. Результаты расчётов сведены в **таблицу 2.**

Таблица 1. Варианты расчёта числа появлений репликатора при оптимистичных предположениях
Table 1. Options for calculating the number of replicator occurrences under optimistic assumptions

Длина репликатора	Результаты	Рибозимы (20 нуклеотидов)	Рибозимы (84 нуклеотида)
1800 нуклиотидов	Потенциально	15×10^{6}	8.9×10^{40}
	По числу планет	15×10^{6}	4.27×10^{13}
280 нуклиотидов	Потенциально	5.97×10^{52}	1.07×10^{58}
	По числу планет	10^{21}	7.139×10^{19}

Таблица 2. Варианты расчёта числа появлений репликатора при пессимистичных предположениях
Table 2. Options for calculating the number of replicator appearances under pessimistic assumptions

Длина репликатора	Результаты	Рибозимы (20 нуклеотидов)	Рибозимы (84 нуклеотида)
1800 нуклиотидов	Потенциально	15 000	1.9×10^{-24}
	По числу планет	15 000	1.9×10^{-24}
280 нуклиотидов	Потенциально	5.97×10^{49}	2.7×10^{45}
	По числу планет	10^{19}	1.82×10^{10}

Из анализа табличных данных видно, что ожидаемое число появлений репликатора равно 1.9×10^{-24} и даже больше, что также значительно превышает результаты расчёта Е.В. Кунина в 10^{-1018} раз.

Заключение. Результаты расчётов показывают, что если принять в качестве предположения возможность панспермии, то вероятность самозарождения жизни является очень высокой, и превышает результаты расчётов Е.В. Кунина на 1000 порядков. Поэтому гипотезу о возникновении жизни с помощью панспермии следует считать более вероятной.

При этом жизнь по Вселенной распределена крайне неравномерно. Даже несмотря на то, что репликатор ни разу не появится в большинстве галактик, в отдельно взятой галактике может быть заселена практически каждая пригодная для жизни планета. Что следует из механизмов переноса рибозимов между системами.

Автор прекрасно осознает, что выполненный расчёт ничего не говорит читателю о том, сколько сможет прожить сформировавшаяся жизнь. Рассматривая рассчитанные значения вероятности появления репликатора, важно сказать, что для большинства предположений о длине репликатора и рибозимов число обитаемых планет примерно равно числу землеподобных. Так как на большинстве планет репликатор сможет появиться по несколько миллиардов раз, то вероятность того, что какие-то из этих репликаторов смогут развиться в устойчивую жизнь, достаточно велика.

Благодарности. Автор благодарен д.б.н., профессору А.В. Смурову, д.б.н., профессору А.В. Олескину и к.г-м.н., доценту А.В. Иванову за ценные советы при написании данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жеребцов Н.А., Попова Т.Н., Артюхов В.Г.* Биохимия. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2002. 696 с.
2. *Кунин Е.В.* Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции. Москва: Центрполиграф, 2014. 526 с.
3. *Мазур В.А.* Инфляционная космология и гипотеза случайного самозарождения жизни // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431, № 2. С. 183–187.
4. *Панов А.Д.* Панспермия и механизмы возникновения жизни во Вселенной // Земля и Вселенная. 2014. № 1. С. 82.
5. *Antipova O.M., Zavyalova E.G., Kopylov A.M., Golovin A.V., Pavlova G.V., Reshetnikov R.V.* Advances in the application of modified nucleotides in selex technology // Biochemistry (Moscow). 2018. Т. 83, № 10. С. 1161–1172.
6. *Greatorex J., Lever A., Gallego J., Varani G.* Structure and stability of wild-type and mutant RNA internal loops from the SL-1 domain of the HIV-1 packaging signal // J. of Molecular Biology. 2002. Т. 322, № 3. С. 543–557.
7. *Huang W., Ferris J.P.* One-step, regioselective synthesis of up to 50-mers of RNA oligomers by montmorillonite catalysis // J. Am. Chem. Soc. 2006. V. 128. P. 8914–8919.
8. *Li-Hung, Lin, et al.* Long-Term sustainability of a high-energy, low-diversity crustal biome // Science. 2006. V. 314. P. 479–482.
9. *Lincoln T.A., Joyce G.F.* Self-sustained replication of an RNA enzyme // Science. 2009. V. 323. № 5918. P. 1229–1232.
10. *Malcolm. W. McGeoch, S. Dikler, Julie E.M. McGeoch.* Hemolithin: A Meteoritic Protein Containing Iron And Lithium // Astrobiology (https://astrobiology.com/2020/02/hemolithin-a-meteoritic-protein-containing-iron-and-lithium).
11. *Sczepanski J.T., Joyce G.F.* A cross-chiral RNA polymerase ribozyme // Nature. 2014. V. 515. P. 440–442. DOI: 10.1038/nature13900/.
12. *Vaidya N., Manapat M.L., Chen I.A.R. Xulvi-Brunet, E.J. Hayden, N. Lehman.* Spontaneous network formation among cooperative RNA replicators // Nature. 2012. V. 491. P. 72–77. DOI:10.1038/nature11549/.

REFERENCES

1. Zherebtsov, N.A., Popova, T.N., Artyukhov, V.G., *Biohimija* [Biochemistry] (Voronezh: Publishing House of Voronezh State University, 2002) (in Russian).
2. Kunin, E.V., *Logic of Chance. On the Nature and Origin of Biological Evolution* (Moscow: Centerpoligraf, 2014) (in Russian).
3. Mazur, V.A., "Inflationary Cosmology and the Hypothesis of Accidental Spontaneous Generation of Life", *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences] **431** (2), 183–187 (2010) (in Russian).
4. Panov, A.D., "Panspermia and the Mechanisms of the Origin of Life in the Universe", *Zemlija i Vselennaja* [Earth and the Universe] **1**, 82 (2014) (in Russian).
5. Antipova, O.M., Zavyalova, E.G., Kopylov, A.M., Golovin, A.V., Pavlova, G.V., Reshetnikov, R.V., "Advances in the application of modified nucleotides in selex technology", B*iochemistry* **83** (10), 1161–1172 (2018).
6. Greatorex, J., Lever, A., Gallego, J., Varani, G., "Structure and stability of wild-type and mutant RNA internal loops from the SL-1 domain of the HIV-1 packaging signal", *J. of Molecular Biology* **322** (3), 543–557, (2002).
7. Huang, W., Ferris, J.P., "One-step, regioselective synthesis of up to 50-mers of RNA oligomers by montmorillonite catalysis", *J. Am. Chem. Soc.* **128**, 8914–8919 (2006).
8. Li-Hung, Lin, et al., "Long-Term sustainability of a high-energy, low-diversity crustal biome", *Science* **314**, 479–482 (2006).
9. Lincoln, T.A., Joyce, G.F., "Self-sustained replication of an RNA enzyme", *Science* **323** (5918), 1229–1232 (2009).
10. Malcolm, W., McGeoch, S., Dikler, Julie, E.M., McGeoch, "Hemolithin: A Meteoritic Protein Containing Iron And Lithium", *Astrobiology* (https://astrobiology.com/2020/02/hemolithin-a-meteoritic-protein-containing-iron-and-lithium).
11. Sczepanski, J.T., Joyce, G.F., "A cross-chiral RNA polymerase ribozyme", *Nature* **515**, 440–442 (2014). DOI:10.1038/nature13900.
12. Vaidya, N., Manapat, M.L., Chen, I.A. R. Xulvi-Brunet, E.J., Hayden, N., Lehman, "Spontaneous network formation among cooperative RNA replicators", *Nature* **491**, 72–77 (2012). DOI:10.1038/nature11549.