

Из истории естествознания
From the History of Science

DOI: 10.31857/S020596060013006-8

**ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ
ИСКУССТВЕННОЙ ДНК: РОЖДЕНИЕ ИДЕИ
И ПЕРВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ**

РЕБРОВА Ирина Михайловна – *Всероссийский институт научной и технической информации РАН; Россия, 125190, Москва, ул. Усиевича, д. 20; E-mail: imrebrova@yandex.ru*

РЕБРОВА Ольга Юрьевна – *Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова; Россия, 117997, Москва, ул. Остроумянова, д. 1; E-mail: o.yu.rebrova@gmail.com*

© И. М. Реброва, О. Ю. Реброва

В статье представлен анализ первых публикаций, в которых высказывались идеи о возможности создания искусственных объектов, подобных объектам микромира (в том числе молекулам ДНК), которые могли бы использоваться в электронной технике. Американские ученые Р. Ф. Фейнман, Н. Винер и советский ученый М. С. Нейман в 1959–1965 гг. предположили, что такие искусственные объекты могут быть созданы и что они будут обладать возможностями, подобными возможностям объектов микромира, например свойством хранения информации большого объема. Следует подчеркнуть, что Нейман не только высказал такие идеи, но и изложил в трех своих публикациях в журнале «Радиотехника» соображения о возможных путях их реализации, а также привел некоторые предварительные расчеты. Высокая актуальность идей Неймана, высказанных 55 лет назад, подтверждается многочисленными цитированиями в последние пять лет его статей в научных публикациях ведущих мировых журналов и патентах, а также созданием устройств на основе искусственной ДНК.

Ключевые слова: Р. Ф. Фейнман, Н. Винер, М. С. Нейман, запоминающие устройства, искусственная ДНК, объекты микромира, микроминиатюризация, идеи, первые публикации.

Статья поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

**SYNTHESIZED DNA-BASED DATA STORAGE DEVICES:
THE BIRTH OF THE IDEA AND THE FIRST PUBLICATIONS**

REBROVA Irina Mikhailovna – *All-Russian Institute for Scientific and Technical Information; Ul. Usievicha, 20, Moscow, 125190, Russia; E-mail: imrebrova@yandex.ru*

REBROVA Olga Yurievna – Pirogov Russian National Research Medical University; Ul. Ostrovityanova, 1, Moscow, 117997, Russia; E-mail: o.yu.rebrova@gmail.com

© I. M. Rebrova, O. Yu. Rebrova

Abstract: This paper analyzes the early publications in which the ideas concerning the possibility of creating artificial objects similar to those of the microcosm (including DNA molecules) that could be used in electronic engineering were put forward. In 1959–1965, American scientists Richard Phillips Feynman and Norbert Wiener and a Soviet scientist Mikhail Samoilovich Neiman suggested that it is possible to create such artificial objects with capabilities similar to those of microcosmic objects, such as storing big data. It is worth emphasizing that, in his three publications in the *Radiotekhnika* journal, Neiman not just offered his ideas but expounded in detail how these ideas could be implemented and provided some preliminary calculations. The high topicality of Neiman's ideas expressed 55 years ago is reflected in numerous citations of his papers in scientific publications in the leading international journals and patents during the last five years as well as by the development of devices based on synthesized DNA.

Keywords: R. P. Feynman, N. Wiener, M. S. Neiman, storage devices, synthesized DNA, microcosmic objects, microminiaturization, ideas, first publications.

For citation: Rebrova, I. M., and Rebrova, O. Yu. (2020) Zapominaiushchie ustroystva na osnove iskusstvennoi DNK: rozhdenie idei i pervye publikatsii [Synthesized DNA-Based Data Storage Devices: The Birth of the Idea and the First Publications], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 41, no. 4, pp. 666–676, DOI: 10.31857/S020596060013006-8.

В настоящее время интенсивно развивается научно-техническое направление, целью которого является создание устройств для хранения больших объемов информации на основе искусственных (синтезированных) молекул ДНК. В публикациях последних лет в высокорейтинговых мировых естественно-научных журналах описываются результаты исследований и уже разработанные технологии и устройства такого назначения, в частности устройство, созданное с участием компании «Майкрософт»¹.

В данной статье рассматриваются некоторые ранние публикации, в которых высказывались идеи о возможности создания запоминающих

¹ Church, G. M., Gao, Y., Kosuri, S. Next-Generation Digital Information Storage in DNA // *Science*. 2012. Vol. 337. № 6102. P. 1628; Goldman, N., Bertone, P., Chen, S. et al. Towards Practical, High-Capacity, Low-Maintenance Information Storage in Synthesized DNA // *Nature*. 2013. Vol. 494. No. 7435. P. 77–80; Takahashi, C. N., Nguyen, B. H., Strauss, K., Ceze, L. Demonstration of End-to-End Automation of DNA Data Storage // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number 4998.

устройств на основе искусственных объектов, подобных объектам микромира, в частности молекул ДНК и РНК. Также впервые обращается внимание на то, что, помимо ссылок в печатных изданиях на высказывания по данному вопросу американских ученых Р. Ф. Фейнмана² и Н. Винера³, в последние годы в научных статьях⁴ и патентах⁵ появились и ссылки на статьи советского ученого М. С. Неймана.

29 декабря 1959 г. выдающийся американский физик Ричард Филлипс Фейнман прочитал на собрании Американского физического общества в Калифорнийском технологическом институте лекцию под названием «Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики»⁶. Сокращенный перевод этой лекции был опубликован на русском языке⁷.

В этой лекции, позднее перепечатанной в нескольких изданиях, излагаются перспективы создания искусственных объектов, подобных объектам микромира и обладающих подобными или даже большими возможностями, поэтому Фейнман считается пророком

² *Adleman, L. M.* Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems // Science. 1994. Vol. 266. No. 5187. P. 1021–1024.

³ *Ceze, L., Nivala, J., Strauss, K.* Molecular Digital Data Storage Using DNA // Nature Reviews Genetics. 2019. Vol. 20. No. 8. P. 456–466; *Dong, Y., Sun, F., Ping, Z. et al.* DNA Storage: Research Landscape and Future Prospects // National Science Review. 2020. Vol. 7. No. 6 P. 1092–1107.

⁴ *Brunet, T. D.* Aims and Methods of Biosteganography // Journal of Biotechnology. 2016. Vol. 226. P. 56–64; *Ceze, Nivala, J., Strauss.* Molecular Digital Data Storage...; *Heckel, R., Mikutis, G., Grass, R. N.* A Characterization of the DNA Data Storage Channel // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Article number 9663; *Nguyen, H. H., Park, J., Hwang, S. et al.* On-Chip Fluorescence Switching System for Constructing a Rewritable Random Access Data Storage Device // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article number 337; *Nurse, P., Hayles, J.* Using Genetics to Understand Biology // Heredity. 2019. Vol. 123. P. 4–13; *Organick, L., Ang, S. D., Chen, Y.-J. et al.* Random Access in Large-Scale DNA Data Storage // Nature Biotechnology. 2018. Vol. 36. P. 242–248; *Ping, Z., Ma, D., Huang, X. et al.* Carbon-Based Archiving: Current Progress and Future Prospects of DNA-Based Data Storage // GigaScience. 2019. Vol. 8. No. 6. P. 1–10; *Shomorony, I., Heckel, R.* Capacity Results for the Noisy Shuffling Channel // arXiv:1902.10832v1. February 27, 2019; *Крючин А. А., Беляк Е. В., Крючина Е. А., Потебня А. В.* Стан і проблеми створення ДНК-пам'яті // Медична інформатика та інженерія. 2015. № 3. С. 9–16.

⁵ *Banyai, W., Peck, B. J., Fernandez, A. et al.* De Novo Synthesized Gene Libraries. United States Patent No. 9833761B2. December 5, 2017; *Banyai, W., Peck, B. J., Fernandez, A. et al.* De Novo Synthesized Gene Libraries. United States Patent No. 9839894B2. December 12, 2017; *Banyai, W., Peck, B. J., Fernandez, A. et al.* Devices and Methods for Oligonucleic Acid Library Synthesis. United States Patent No. 9981239B2. May 29, 2018; *Peck, B. J., Indermuhle, P., Marsh, E. P. et al.* Functionalized Surfaces and Preparation Thereof. United States Patent No. 9895673B2. February 20, 2018.

⁶ *Feynman, R. P.* There's Plenty of Room at the Bottom // Engineering and Science. 1960. Vol. 23. No. 5. P. 22–36 (см. также: <http://calteches.library.caltech.edu/1976/1/1960Bottom.pdf>).

⁷ *Фейнман Р. Ф.* Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Российский химический журнал. 2002. Т. 46. № 5. С. 4–6.



Рис. 1. Ричард Филлипс Фейнман
(<https://www.britannica.com/biography/Richard-Feynman>)

нанотехнологий⁸. В качестве одного из объектов микромира, по образу которого может быть создано устройство хранения больших объемов информации, он называет молекулу ДНК:

Этот факт – то, что огромное количество информации может быть внесено в чрезвычайно малое пространство, – конечно, хорошо известен биологам и разрешает тайну, существовавшую до того, как мы всё это ясно поняли – как могло случиться, что в маленькой клетке может храниться вся информация для организации такого сложного существа, как мы. Вся эта информация [...] содержится в очень маленькой части клетки в виде длинноцепочечных молекул ДНК, в которых приблизительно 50 атомов используются для одного бита информации о клетке⁹.

Далее Фейнман ставит логичный вопрос – можем ли мы создать объект для хранения информации, подобный микроскопическому биологическому объекту, выполняющему эту функцию.

Биологический пример написания информации в малом масштабе вдохновил меня на размышления о чем-то, что должно быть возможно. Биология – это не просто запись информации, это какое-либо использование этой информации. Биологическая система может быть чрезвычайно мала. Многие клетки очень малы, но они очень активны, они производят различные вещества, передвигаются, шевелятся и делают множество замечательных вещей – всё в очень малом масштабе. Они также хранят информацию. Подумаем о возможности того, что мы тоже можем сделать очень малый объект, который делает то, что мы хотим – что мы можем изготовить объект, который функционирует на таком уровне!¹⁰

Он отмечает, что с точки зрения законов физики не считает невозможным создание элементов, которые были бы намного меньшими по сравнению с существующими. Таким образом, Фейнман, рисуя перспективы создания микроминиатюрных объектов, является первым,

⁸ Ball, P. Feynman's Fancy // Chemistry World. 2009. January. P. 58–62 (см. также: <https://www.chemistryworld.com/features/feynmans-fancy/3004592.article>); Зайцев Д. Д. Фейнман, Ричард // <http://thesaurus.rusnano.com/wiki/article11079>.

⁹ Feynman. There's Plenty of Room ... P. 24. Здесь и в ссылке 10 перевод текста выполнен авторами статьи.

¹⁰ Ibid. P. 25.

кто публично высказал соображения общего характера о возможности создания устройств, подобных микробиологическим объектам, в том числе молекулам ДНК.

В 1964–1965 гг. идея о возможности создания запоминающих устройств на основе искусственных молекул ДНК и РНК была высказана в СССР Михаилом Самойловичем Нейманом ¹¹ в его трех статьях по вопросам микроминиатюризации ¹². Можно с большой степенью уверенности считать, что Нейман не был знаком с упомянутой лекцией Фейнмана и ее последующими перепечатками. Он был человеком высочайшей личной и научной честности и, если бы был знаком с текстом лекции Фейнмана, обязательно сослался бы на нее в своих статьях по вопросам микроминиатюризации. Следует также учесть, что в СССР зарубежные научные издания были в то время малодоступны.

Идея о возможности создания устройств на основе искусственных молекул ДНК и РНК, способных выполнять функции записи, хранения и считывания больших объемов информации, а также весьма сложные функции логического характера, была высказана Нейманом впервые в статье «Некоторые принципиальные вопросы микроминиатюризации» (поступила в редакцию 20 сентября 1963 г.) ¹³. В ней рассматриваются общие аспекты проблемы микроминиатюризации дискретных



Рис. 2. Михаил Самойлович Нейман
(собственное фото авторов)

¹¹ Михаил Самойлович Нейман (1905–1975) – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР, в 1946–1974 гг. – заведующий кафедрой радиопередающих и антенно-фидерных устройств факультета радиотехники летательных аппаратов Московского авиационного института им. С. Орджоникидзе. О его научной и педагогической деятельности см.: <https://sites.google.com/site/msneiman1905/>.

¹² Нейман М. С. Некоторые принципиальные вопросы микроминиатюризации // Радиотехника. 1964. Т. 19. № 1. С. 3–12; Нейман М. С. О связях между надежностью, быстродействием и степенью микроминиатюризации на молекулярно-атомном уровне // Радиотехника. 1965. Т. 20. № 1. С. 1–9; Нейман М. С. О молекулярных системах памяти и о направленных мутациях // Радиотехника. 1965. Т. 20. № 6. С. 1–8. Тексты статей см. в: <https://sites.google.com/site/msneiman1905/publikacii/fulltexts>.

¹³ Нейман. Некоторые принципиальные вопросы...



Рис. 3. Норберт Винер
(http://lichnosti.net/people_2803.html)

электронных элементов. Обсуждается современное состояние теории биологической передачи наследственной информации и интенсивное изучение в этой области процессов, которые носят характер индивидуальных микропроцессов, но в то же время протекают вполне регулярно и в достаточной степени подчинены строгой управляемости биологического характера. Отмечается, что при этих процессах выполняются, с одной стороны, функции записи, хранения и считывания больших объемов информации, а с другой, — весьма сложные функции логического характера. Таким образом, имеют место достаточно жестко детерминированные процессы как раз того типа, который нужен для технических целей создания информационных машин.

Эта идея развивалась Нейманом в его второй статье по микроминиатюризации «О связях между надежностью, быстродействием и степенью микроминиатюризации на молекулярно-атомном уровне» (поступила в редакцию 8 января 1964 г.)¹⁴. В ней обсуждаются принципиальные возможности и ограничения для построения технических систем обработки и хранения информации с использованием атомно-молекулярного уровня процессов. Рассчитывается соотношение между степенью надежности, степенью микроминиатюризации и быстродействием информационных систем для случая использования дискретных квантовых переходов на молекулярном или атомном уровне. Отмечается высокая степень детерминированности и надежности, обеспечиваемая при генетических процессах на молекулярном уровне.

24 февраля 1964 г. в американском издании «Юнайтед стейтс нью энд уорлд рипорт» было опубликовано интервью знаменитого американского ученого, «отца кибернетики» Норберта Винера¹⁵. При обсуждении перспектив миниатюризации вычислительных машин он говорил о возможном пути миниатюризации памяти — применении «веществ, близких к генам» (*substances allied to genes*).

После кончины Винера, последовавшей 18 марта 1964 г., это интервью, оказавшееся для него последним, было переведено на русский язык и опубликовано в воскресном приложении «Неделя» к газете

¹⁴ Нейман. О связях между надежностью...

¹⁵ Machines Smarter than Men? Interview with Dr. Norbert Wiener, Noted Scientist // U. S. News and World Report. February 24, 1964. P. 84–86.

«Известия»¹⁶. Приведем фрагмент этого перевода, касающийся миниатюризации памяти вычислительных машин:

ВОПРОС. Что вы можете сказать о будущем вычислительных машин?

ОТВЕТ. Важное направление, связанное с вычислительными машинами, – это миниатюризация, то есть резкое уменьшение размеров элементов машин [...] Один из основных факторов прогресса миниатюризации машин – введение новых типов «памяти», памяти, основанной на физике твердого тела – на транзисторах и подобных им вещах.

Нас все больше начинает интересовать вопрос: «Как запоминает человеческий мозг?» Теперь мы впервые стали получать реальное представление об этом.

Видите ли, генетическая память – память наших генов – определяется, по существу, комплексами нуклеиновых кислот. На протяжении последнего года появились основания думать, что память нервной системы имеет такую же природу. На это указывает открытие в мозге комплексов нуклеиновых кислот, обладающих свойствами, которые в принципе могли бы быть хорошей основой памяти. Я полагаю – и я не одинок, – что примерно в следующем десятилетии подобные принципы будут использованы в технике.

ВОПРОС. Иными словами, вместо магнитной ленты в блоках памяти вычислительной машины будут гены?

ОТВЕТ. Будут вещества, сходные с генами. Это потребует новых фундаментальных исследований. Как осуществить ввод и вывод информации для генетической памяти, как использовать эту память в машине, – решение таких задач связано с обширными исследованиями, которые сейчас еще только-только начаты. Некоторые из нас полагают (это еще не проверено), что ввод и вывод информации можно осуществить, используя молекулярные спектры испускания и поглощения комплексов нуклеиновых кислот. Сбудется ли это, я не возьмусь утверждать. Но саму идею некоторые из нас рассматривают серьезно.

ВОПРОС. Должна ли такая перспектива внушать людям страх?

ОТВЕТ. Перспектива всегда страшит людей. Но она действительно опасна лишь тогда, когда достижения науки используются неразумно. При разумном же применении перспективные машины могут стать очень ценным инструментом.

ВОПРОС. Можете ли вы описать вычислительную машину, в блоках памяти которой использовались бы гены? На что способна такая машина?

ОТВЕТ. Разговор на эту тему сейчас слишком походил бы на фантастику.

ВОПРОС. Какова будет производительность такой машины по сравнению с современными вычислительными машинами?

ОТВЕТ. Во много раз больше, а размеры ее будут гораздо меньше ныне существующих. Она сможет перерабатывать гораздо больший объем информации¹⁷.

¹⁶ Люди и машины. Последнее интервью «отца кибернетики» Норберта Винера // Известия (газета). Приложение «Неделя». 22–28 марта 1964 г. № 13 (213). С. 12–13, 20–21.

¹⁷ Там же. С. 12–13.

Важно отметить, что здесь Винер выражает по данному вопросу не только свое мнение, но и мнение других ученых, он говорит: «Я полагаю — и я не одинок...», «Некоторые из нас полагают...», «...саму идею некоторые из нас рассматривают серьезно». Имен этих ученых он не называет. Его выражение «нас» говорит о том, что это, скорее всего, круг ученых, с которыми он непосредственно взаимодействовал. Можно лишь предполагать, кого он имел в виду — только некоторых ученых США или также каких-либо ученых из других стран.

Нам не удалось обнаружить других публикаций Винера, касающихся возможности создания памяти на основе «веществ, сходных с генами». Нам не известно также, были ли в тот период опубликованы работы других ученых, которых он имел в виду в своем интервью и которыми высказывалась бы подобная идея. Возможно, со временем это удастся выяснить.

Совершенно очевидно, что Нейман не мог ознакомиться с оригиналом интервью Винера в «Юнайтед стейтс ньюс энд уорлд рипорт», поскольку в то время в СССР это издание увидеть было практически невозможно. Но он прочитал перевод этого интервью, опубликованный в «Неделе», и пишет об этом в своей третьей статье.

Последняя (третья) статья Неймана по вопросам микроминиатюризации «О молекулярных системах памяти и о направленных мутациях» поступила в редакцию 29 января 1965 г.¹⁸ В ней устанавливается связь между технической проблемой создания запоминающих устройств на молекулярном уровне и биологической проблемой управления наследственностью при помощи направленных мутаций. Рассматривается случай запоминающей системы, состоящей из цепочки одинаковых звеньев, что аналогично биологическим системам генетической памяти. Обсуждаются возможные направления первоначальных исследований для разработки электромагнитных, электронных и ионных методов записи и считывания информации в длинных цепочечных полимерных молекулах.

В этой статье имеется следующий фрагмент с упоминанием высказываний Винера:

В опубликованных ранее наших работах была поставлена проблема радикальной миниатюризации элементов хранения и обработки дискретной информации путем использования для этих целей элементов и процессов на молекулярно-атомном уровне [...]

После выхода в свет первой из отмеченных работ (январь 1964 г. — *И. Р., О. Р.*) и после отсылки в журнал второй из них (статья поступила в редакцию 8 января 1964 г. — *И. Р., О. Р.*) было опубликовано последнее интервью с Норбертом Винером, данное им незадолго до смерти, последовавшей 18 марта 1964 г.

В интервью высказаны идеи и положения, очень близкие к изложенным в наших работах. На вопрос: «Что Вы можете сказать о будущем вычислительных

¹⁸ *Нейман. О молекулярных системах памяти...*

машин?» Н. Винер ответил: «Важное направление, связанное с вычислительными машинами, – это миниатюризация». И далее: «Видите ли, генетическая память – память наших генов – определяется, по существу, комплексом нуклеиновых кислот. На протяжении последнего года появились основания думать, что память нервной системы имеет такую же природу [...] Я полагаю – и я не одинок, – что примерно в следующем десятилетии подобные принципы будут использованы в технике [...] Это потребует новых фундаментальных исследований. Как осуществить ввод и вывод информации для генетической памяти, как использовать эту память в машине, – решение таких задач связано с обширными исследованиями, которые сейчас еще только-только начаты». Таким образом, оказалось, что приблизительно одинаковые идеи и их оценки возникли одновременно и независимо в Советском Союзе и в США ¹⁹.

Можно согласиться с этим выводом Неймана относительно высказывания идей создания искусственных устройств, подобных объектам микромира. Следует подчеркнуть, что он не только высказал такие идеи, но и изложил соображения о возможных путях их реализации, а также произвел некоторые предварительные расчеты. Это констатируется и в книге Г. В. Веникова «Сверхбыстродействующие вычислительные устройства» ²⁰.

В ряде опубликованных в ведущих мировых научных журналах в последние пять лет статей ²¹ и патентов ²² по вопросам создания технологий и устройств памяти на основе искусственной ДНК имеются ссылки на упомянутые статьи Неймана. Такое многочисленное цитирование подтверждает высокую актуальность его идей на современном этапе развития информационных технологий. К сожалению, пока не обнаружено цитирований этих работ отечественными авторами ²³.

В числе первых публикаций, в небольшой степени касающихся вопросов создания технических устройств, подобных микробиологическим объектам, можно упомянуть еще одну работу Винера, в которой он высказывает мысли, имеющие некоторое отношение к этим

¹⁹ Там же. С. 1–2.

²⁰ Веников Г. В. Сверхбыстродействующие вычислительные устройства. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 71–74.

²¹ Ceze, Nivala, Strauss. Molecular Digital Data Storage...; Brunet. Aims and Methods...; Heckel, Mikutis, Grass. A Characterization of the DNA Data Storage...; Nguyen, Park, Hwang et al. On-Chip Fluorescence Switching System...; Nurse, Hayles. Using Genetics...; Organick, Ang, Chen. Random Access...; Ping, Ma, Huang et al. Carbon-Based Archiving...; Shomorony, Heckel. Capacity Results...; Крючин, Беляк, Крючина, Потемня. Стан і проблеми...

²² Banyai, Peck, Fernandez et al. De Novo Synthesized Gene Libraries. United States Patent No. 9833761B2...; Banyai, Peck, Fernandez et al. De Novo Synthesized Gene Libraries. United States Patent No. 9839894B2...; Banyai, Peck, Fernandez, et al. Devices and Methods... United States Patent No. 9981239B2...; Peck, Indermuhle, Marsh et al. Functionalized Surfaces... United States Patent No. 9895673B2...

²³ Малинецкий Г. Г., Науменко С. А. Вычисления на ДНК. Эксперименты. Модели. Алгоритмы. Инструментальные средства // Информационные технологии и вычислительные системы. 2006. № 1. С. 5–27; Малинецкий Г. Г., Митин Н. А., Науменко С. А. Нанобиология и синергетика. Проблемы и идеи // Нанотехника. 2007. Т. 10. № 2. С. 103–132.

вопросам. Это статья «Перспективы кибернетики»²⁴, опубликованная посмертно в 1965 г. Ее перевод на русский язык под названием «Перспективы нейрокибернетики» был опубликован в 1970 г.²⁵ В этой работе Винер рассматривает различные аспекты организации нервной системы, кратковременной, долговременной и наследуемой памяти. Лишь в конце статьи он пишет, что «физики будут использовать многие идеи физиологов», и предсказывает создание в будущем «новой объединенной физики», которая будет включать «явления, которые мы сейчас считаем принадлежащими исключительно к области живого».

Таким образом, идеи о возможности создания запоминающих устройств на основе искусственных биологических объектов, в том числе синтезированных молекул ДНК и РНК, была первоначально высказана независимо друг от друга несколькими учеными — Фейнманом, Нейманом и Винером — и, возможно, некоторыми неизвестными нам учеными, упоминаемыми Винером без указания их имен в его интервью. Также нельзя исключить, что существуют пока не известные нам ранние публикации по этой тематике. Следует подчеркнуть, что Нейман не только высказал такие идеи, но и изложил в своих публикациях соображения о возможных путях их реализации, а также привел некоторые предварительные расчеты. Высокая актуальность идей Неймана, высказанных 55 лет назад, подтверждается многочисленными цитированиями его статей в научных публикациях в ведущих мировых журналах и патентах в последние годы.

Авторы будут благодарны за отклики на данную статью и сообщение дополнительных сведений по рассмотренному вопросу.

References

- Ardemian, L. M. (1994) Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems, *Science*, vol. 266, no. 5187, pp. 1021–1024.
- Ball, P. (2009) Feynman's Fancy, *Chemistry World*, January, pp. 58–62.
- Brunet, T. D. (2016) Aims and Methods of Biosteganography, *Journal of Biotechnology*, vol. 226, pp. 56–64.
- Ceze, L., Nivala, J., and Strauss, K. (2019) Molecular Digital Data Storage Using DNA, *Nature Reviews Genetics*, vol. 20, no. 8, pp. 456–466.
- Church, G. M., Gao, Y., and Kosuri, S. (2012) Next-Generation Digital Information Storage in DNA, *Science*, vol. 337, no. 6102, p. 1628.
- Dong, Y., Sun, F., Ping, Z. et al. (2020) DNA Storage: Research Landscape and Future Prospects, *National Science Review*, vol. 7, no. 6, pp. 1092–1107.
- Feynman, R. P. (1960) There's Plenty of Room at the Bottom. An Invitation to Enter a New Field of Physics, *Engineering and Science*, vol. 23, no. 5, pp. 22–36.

²⁴ Wiener, N. Perspectives in Cybernetics // Progress in Brain Research. 1965. Vol. 17. P. 399–408.

²⁵ Винер Н. Перспективы нейрокибернетики // Философские вопросы биологии и биокибернетики: сборники переводов. Серия: Материалы для философских семинаров. М.: [Б. и.], 1970. Вып. 3. С. 104–122.

- Goldman, N., Bertone, P., Chen, S. et al. (2013) Towards Practical, High-Capacity, Low-Maintenance Information Storage in Synthesized DNA, *Nature*, vol. 494, no. 7435, pp. 77–80.
- Heckel, R., Mikutis, G., and Grass, R. N. (2019) A Characterization of the DNA Data Storage Channel, *Scientific Reports*, vol. 9, article number 9663.
- Kriuchin A. A., Beliak E. V., Kriuchina E. A., and Potebnia A. V. (2015) Stan i problemy stvorennia DNK-pam'iaty [State and Problems of Creation of DNA Memory], *Medychna informatika ta inzheneriia*, no. 3, pp. 9–16.
- Machines Smarter than Men? Interview with Dr. Norbert Wiener, Noted Scientist (1964), *U. S. News and World Report*, February 24, pp. 84–86.
- Malinetskii, G. G., and Naumenko, S. A. (2006) Vychisleniia na DNK. Eksperimenty. Modeli. Algoritmy. Instrumental'nye sredstva [DNA-Based Computations. Experiments. Models. Algorithms. Tools], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, no. 1, pp. 5–27.
- Malinetskii, G. G., Mitin, N. A., and Naumenko, S. A. (2007) Nanobiologiya i sinergetika. Problemy i idei [Nanobiology and Synergetics. Problems and Ideas], *Nanotekhnika*, vol. 10, no. 2, pp. 103–132.
- Neiman, M. S. (1964) Nekotorye printsipial'nye voprosy mikrominiaturizatsii [Some Fundamental Issues of Microminiaturisation], *Radiotekhnika*, vol. 19, no. 1, pp. 3–12.
- Neiman, M. S. (1965) O molekuliarnykh sistemakh pamiaty i o napravlennykh mutatsiakh [On the Molecular Memory Systems and the Directed Mutations], *Radiotekhnika*, vol. 20, no. 6, pp. 1–8.
- Neiman, M. S. (1965) O svyaziakh mezhdru nadezhnost'iu, bystrodeistviem i stepen'iu mikrominiaturizatsii na molekuliarno-atomnom urovne [On the Correlations Between the Reliability, Performance and Degree of Microminiaturization at the Molecular / Atomic Level], *Radiotekhnika*, vol. 20, no. 1, pp. 1–9.
- Nguyen, H. H., Park, J., Hwang, S. et al. (2018) On-Chip Fluorescence Switching System for Constructing a Rewritable Random Access Data Storage Device, *Scientific Reports*, vol. 8, Article number 337.
- Nurse, P., and Hayles, J. (2019) Using Genetics to Understand Biology, *Heredity*, vol. 123, pp. 4–13.
- Organick, L., Ang, S. D., Chen, Y.-J. et al. (2018) Random Access in Large-Scale DNA Data Storage, *Nature Biotechnology*, vol. 36, pp. 242–248.
- Ping, Z., Ma, D., Huang, X. et al. (2019) Carbon-Based Archiving: Current Progress and Future Prospects of DNA-Based Data Storage, *GigaScience*, vol. 8, no. 6, pp. 1–10.
- Shomorony, I., and Heckel, R. (2019) Capacity Results for the Noisy Shuffling Channel, *arXiv:1902.10832v1*.
- Takahashi, C. N., Nguyen, B. H., Strauss, K., and Ceze, L. (2019) Demonstration of End-to-End Automation of DNA Data Storage, *Scientific Reports*, vol. 9, article number 4998.
- Venikov, G. V. (1966) *Sverkhbystrodeistvuiushchie vychislitel'nye ustroystva [Ultrafast Computing Devices]*. Moskva and Leningrad: Energiia.
- Wiener, N. (1965) Perspectives in Cybernetics, *Progress in Brain Research*, vol. 17, pp. 399–408.

Received: October 18, 2019.