

Захидов Сабир Тишаевич — доктор биологических наук, профессор.  
stz49@mail.ru

Sabir T. Zakhidov — Doctor of Biological Sciences, Professor.

Текст настоящей статьи представляет собой дополненный вариант публикаций «Нанокорпускулярный мутагенез» (электронный журнал «НБИКС — Наука. Технологии». 2022. № 15(6). С. 59–65) и «Новая форма органической материи» («Независимая газета». 2020. 23 июня).



# Открытие нанокорпускулярного мутагенеза и перспективы его применения в генетических исследованиях

Научная статья

УДК: 575

DOI: 10.33917/es-1.187.2023.78-85

Для цитирования: Захидов С.Т. Открытие нанокорпускулярного мутагенеза и перспективы его применения в генетических исследованиях // Экономические стратегии. 2023. № 1(187). С. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.33917/es-1.187.2023.78-85>

Нанокорпускулярный мутагенез — это свойство наночастиц и (или) наноматериалов вызывать генетические изменения или мутации.

Исследования этого недавно открытого явления, безусловно, расширят поле деятельности генетиков и биологов, поскольку ученые будут располагать новым инструментарием. В идеале эти исследования создадут принципиально новую экспериментальную основу для более глубокого познания процессов развития живой материи, дополняют наши знания о том, что можно делать с природой, а чего нельзя. В теоретическом плане также можно допустить, что средства нанокорпускулярного мутагенеза проложат новый путь к получению и познанию генетических и биологических форм, выгодно отличающихся от тех, на которые в течение сотен миллионов лет опирался естественный отбор на нашей планете. С практической точки зрения можно ожидать, что методология нанокорпускулярного мутагенеза в соединении с другими прогрессивными методами исследования откроет новые интересные перспективы в сфере генетических технологий, направленных, как известно, на решение таких глобальных, жизненно важных задач, как:

- индукция наследственного иммунитета;
- борьба с вирусными и онкологическими заболеваниями;
- создание новых уникальных сортов культурных растений и пород животных с признаками, которые окажутся чрезвычайно полезными и ценными для сельскохозяйственной экономики.

Словом, нанокорпускулярный мутагенез, вероятно, станет еще одним средством глубокого реформирования фундаментального аппарата наследственности и, как следствие, преобразования онтологии живых систем, а также внесет ценный вклад в генетическую науку, открыв новые, доселе неизвестные явления и закономерности.

*Ключевые слова*

Нанотехнологии, наночастицы и наноматериалы, аппарат наследственности, гены и хромосомы, ДНК, мутагенез, наномутагены, генетические технологии, генетическая безопасность.

«Достаточно изобрести одно новое слово, и это слово становится творцом...»

Анри Пуанкаре

«...два-три новых термина двигают науку вперед...»

Д.С. Лихачев

Ускоренное развитие нанотехнологий в ближайшее время с неизбежностью приведет к формированию третьего исторического этапа в экспериментальных исследованиях наследственной мутационной изменчивости. Он будет связан с появлением нового направления в генетической науке, а именно нанокорпускулярного мутагенеза, под которым следует понимать индукцию наследственных перемен наночастицами и (или) наноматериалами [1–3].

Под наночастицами специалисты видят вновь открытые дискретные единицы материи, состоящие из связанных атомов или молекул размером от 1 до 100 нм. Наночастицы демонстрируют принципиально другие физико-химические свойства, чем их микро- и макроскопические аналоги. Рождение новой метрической формы, содержащей иную качественную реальность, происходит в результате критических топологических и онто-

метрических сдвигов в структуре материи микро-частиц, в которых, как известно, сочетаются несколько начал — инертная масса, энергия, электрическое и магнитное поле, спин. В свободной интерпретации наночастицы, полученные искусственным путем, — это микрочастицы-«мутанты», в структуре которых хранится пока еще «непонятная информация». В живых системах для наночастиц, в силу их сверхмалых размеров и высокой реакционной способности, нет контроля проницаемости, нет остановок на барьерах.

В свою очередь под термином «наноматериалы» обычно подразумевают продукты нанотехнологий — макроскопические объекты, вещества и композиции веществ, наделенные искусственной нанокорпускулярной организацией, обеспечивающей им особые функциональные свойства.

➤➤ **Есть достаточно оснований полагать, что развитие методологии нанокорпускулярного мутагенеза со временем окажет большие услуги биологии, медицине, сельскохозяйственной экономике.**

Research article

For citation: Zakhidov S.T. Otkrytie nanokorpuskulyarnogo mutagenеза i perspektivy ego primeneniya v geneticheskikh issledovaniyakh [Discovery of Nanocorpuscular Mutagenesis and Prospects for its Application in Genetic Studies]. *Ekonomicheskie strategii*. 2023. № 1(187), pp. 78–85, available at: DOI: <https://doi.org/10.33917/es-1.187.2023.78-85>

## Discovery of Nanocorpuscular Mutagenesis and Prospects for its Application in Genetic Studies

Nanocorpuscular mutagenesis is the property of nanoparticles and/or nanomaterials to induce genetic changes or mutations. Research on this newly discovered phenomenon will certainly expand the sphere of activity of geneticists and biologists, since scientists will have new tools at their disposal. Ideally, these studies will create a fundamentally new experimental basis for deeper understanding of the development processes in a living matter, and will complement our knowledge of what can and cannot be done with nature. In theoretical terms, it can also be admitted that the means of nanocorpuscular mutagenesis would pave a new way to obtaining and understanding such genetic and biological forms that favourably differ from those, which served as the basis for natural selection on our planet for hundreds of millions of years. From a practical point of view, one might expect that methodology of nanocorpuscular mutagenesis in combination with other progressive research methods will open up new interesting prospects in the field of genetic technologies, aimed, as is known, at solving such global, vital problems as:

- induction of hereditary immunity;
- fight against viral and oncological diseases;
- creation of new unique varieties of cultivated plants and animal breeds with such features that will be extremely useful and valuable for agricultural economy.

In other words, nanocorpuscular mutagenesis is likely to become another means of deep reformation of the fundamental apparatus of heredity and, as a result, transformation of the living systems' ontology and will also make a valuable contribution to genetic science by discovering new, hitherto unknown phenomena and patterns.

*Keywords*

Nanotechnologies, nanoparticles and nanomaterials, heredity apparatus, genes and chromosomes, DNA, mutagenesis, nanomutagens, genetic technologies, genetic safety.

По значению, эффективности действия и широте спектра индуцируемых генетических изменений нанокорпускулярный мутагенез, вероятно, не будет уступать химическому и радиационному мутагенезам, с помощью которых на протяжении десятилетий успешно решаются многие проблемы современной генетики и селекции.

Как известно, основоположником радиационного мутагенеза был американский ученый, член-корреспондент АН СССР, лауреат Нобелевской премии (1946 г.) Герман Джозеф Меллер, а основоположником химического мутагенеза — член-корреспондент АН СССР, лауреат Ленинской премии, Герой Социалистического Труда, номинант на Нобелевскую премию (1962 г.) Иосиф Абрамович Рапопорт.

Объем материала по генетическим эффектам высокоэнергетических квантов, элементарных частиц и химических мутагенов огромен. Этот материал с большой очевидностью свидетельствует о том, что методология искусственного мутагенеза является мощным средством воздействия на живые системы.

Весьма часто в работах по экспериментальному мутагенезу предпочтение отдается химическим соединениям, наделенным мутагенным комплексом. По данным [4], химические мутагены и супермутагены могут повышать частоту мутаций на два-три порядка у растений и на четыре-пять порядков у микроорганизмов по сравнению с уровнем естественного спонтанного мутагенеза, а также радикально воздействовать на опухоли. С их помощью можно ускорять формообразовательные и селекционные процессы, мобилизовать скрытые генетические ресурсы. Это с одной стороны. С другой — хорошо известно, что многие химические мутагены несут с собой энтропию, поэтому они не только создают, но и разрушают, индуцируют вредные мутации, в том числе вызывающие злокачественные новообразования, обнаруживают повышенную токсичность. Также трудно предсказать в силу случайности мутационного процесса (события), в каком конкретном гене произойдет очередная мутация и будет ли она положительной (адаптивной) или отрицательной (губительной).

Очень может быть, что создаваемые на основе манипуляций с отдельными атомами или молекулами генетически активные вещества, так называемые наномутагены, будут иметь низкие величины энтропии, а их действия внутри клеточных и тканевых систем окажутся более мягкими, проявят такие свойства, которые раньше не были известны у радиационных и химических мутагенов. В частности, нельзя исключить, что наномутагены будут действовать как эффективные фенотипические активаторы, экранировать гены от воздей-



**Герман Джозеф Меллер: «Все мы — гигантские роботы, произведенные ДНК для того, чтобы производить ДНК...»**



**Иосиф Абрамович Рапопорт: «Необходимые для селекции резервы наследственного разнообразия неисчерпаемы и открыты для конструктивного вмешательства...»**

ствия химических мутагенов и ионизирующих излучений. Или обнаружат способность прицельно поражать конструкцию вредных, смертоносных генов (проблема того, как класть мутагенные снаряды точно в цель, пока не решена), с одной стороны, и активизировать созидательный потенциал немых генов (эволюционный стратегический запас) — с другой. Согласно точке зрения И.А. Рапопорта, информация новых генных единиц, возникающих из пула немых генов, служит обмену веществ и формообразованию, повыше-



➤➤ **Нанотехнологии не в состоянии, как, впрочем, и химия, самостоятельно указать на вещества, обладающие мутагенной активностью.**

нию иммунитета, образованию дополнительных ферментативных устройств, помогающих в защите генетического аппарата. Хорошо известно, что в живой природе существуют нетронутые и, по существу, огромные резервы мутационной изменчивости.

Наночастицы, приготовленные из благородных металлов, могут оказать существенное влияние на гены вирусов и бактерий, которые в отличие от генов эукариотической клетки-хозяина чрезвычайно чувствительны к неорганике. В связи с этим предлагается использовать наночастицы для борьбы с онкологическими и другими заболеваниями. Недавно весьма осторожно было выдвинуто предположение о том, что, например, ультрамалые наночастицы золота обладают способностью полностью разрушать геном раковых клеток и вирусов.

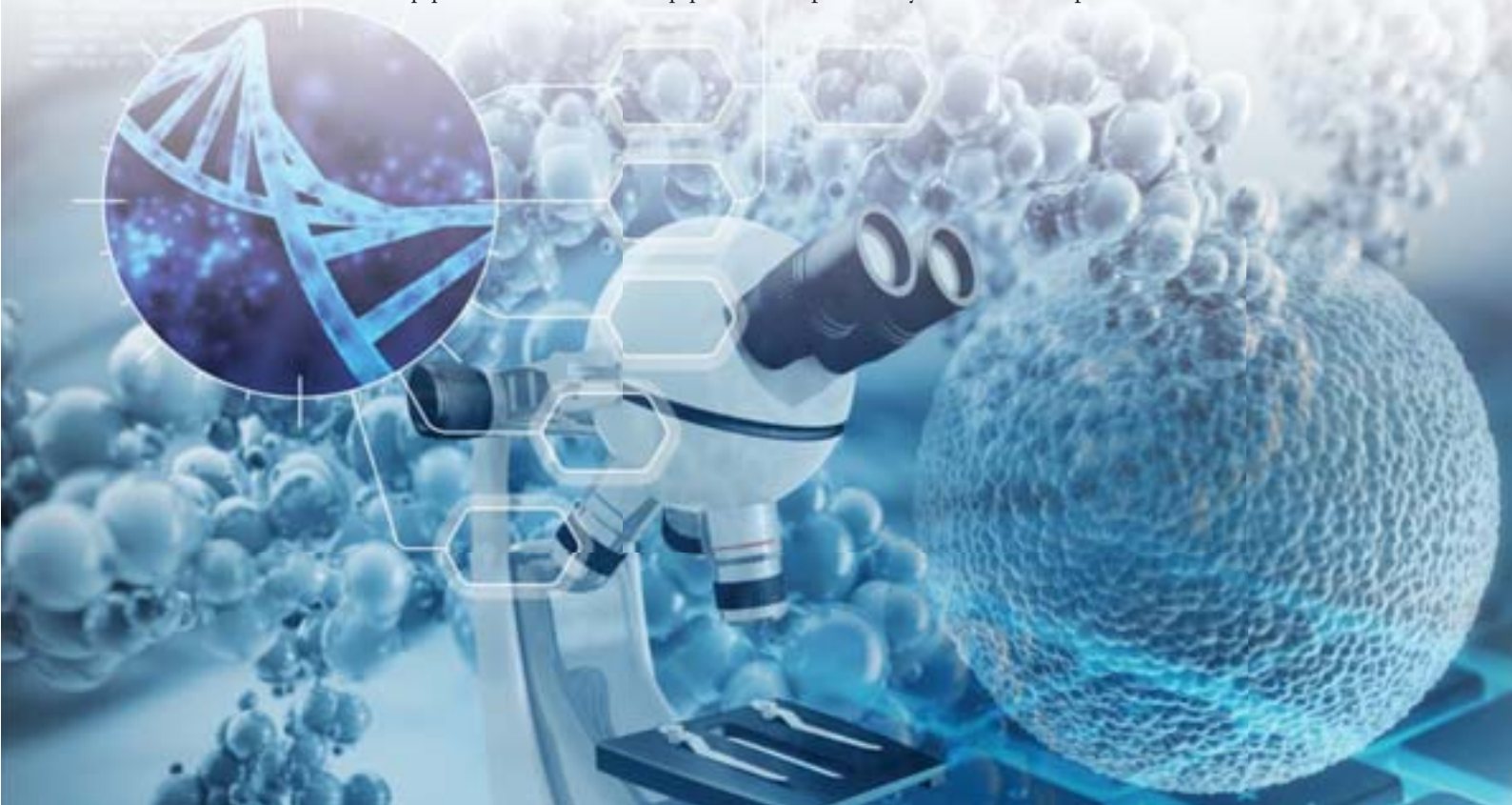
В тех же случаях, когда какие-то разновидности наночастиц не будут обладать собственным прямым генетическим эффектом или этот эффект

будет слабым, их взаимодействия в цитоплазматической среде с органическими молекулами, наделенными мутагенным комплексом, могут действовать более высокими показателями выхода новых мутаций. Также действие наночастиц на наследственный материал может осуществляться опосредованно. Например, в результате ферментных аномалий, вызываемых наночастицами, в клетке может образовываться большое количество промежуточных продуктов, способных взаимодействовать с геномом.

В общем, нанокорпускулярный мутагенез, вероятно, станет еще одним средством глубокой реформации фундаментального генетического аппарата, и, как следствие, преобразования онтологии биологических систем.

С практической точки зрения нанокорпускулярный мутагенез открывает новые интересные перспективы в сфере генетических технологий<sup>1</sup>, которые направлены на решение таких жизненно важных задач, как индукция наследственного иммунитета; борьба с вирусными и онкологическими заболеваниями; создание новых уникальных и ценных сортов культурных растений, более гибких, жизнестойких, продуктивных, устойчивых к фитопатогенам.

Таким образом, есть достаточно оснований полагать, что развитие методологии нанокорпускулярного мутагенеза со временем окажет большие





**Плодовая мушка (*Drosophila melanogaster*) — привилегированный объект генетических исследований**

услуги биологии, медицине, сельскохозяйственной экономике.

Вместе с тем широкое внедрение продуктов нанотехнологий в реальную практику — промышленное производство, биотехнологии и медицина — непременно поставит перед мутационной генетикой дополнительную задачу. Речь идет об оценке генетических рисков искусственно создаваемых нановеществ, в первую очередь лекарственных препаратов и средств их доставки к местам назначения, поскольку нанотехнологии не в состоянии, как, впрочем, и химия, самостоятельно указать на вещества, обладающие мутагенной активностью.

Как известно, идентификация мутагенов (генотоксикантов) обязательно требует генетического эксперимента. Ведь здоровье человека во многом зависит от обеспечения генетической безопасности, под которой понимается состояние защищенности генома человека от воздействия мутагенных факторов окружающей среды. При этом не в последнюю очередь должно изучаться воздействие средств нанокорпускулярного мутагенеза на гены и хромосомы клеток зародышевого пути, поскольку именно наследственные структуры половых клеток хранят в своих глубинах историю всего живого, служат мостиком, связывающим между собой поколения, и тем делают жизнь бесконечной и непрерывной.

Короче говоря, речь идет о *нанокорпускулярной безопасности* как комплексе условий, при которых должна обеспечиваться безопасная работа

людей в научно-исследовательских лабораториях и на предприятиях, производящих продукцию нанотехнологий.

И хотя сегодня еще нет безупречного аппарата анализа эффектов действия наночастиц и наноматериалов на аппарат наследственности, в литературе уже можно найти данные, полученные с помощью известных индикаторных методик, которые указывают на способность наночастиц возмущать молекулу ДНК, нарушать ее пространственную упаковку, индуцировать хромосомные и генные мутации [5–13].

В 2012 г. итальянскими учеными Джузеппе Веккио и другими [14] в опытах на дрозофиле были получены первые в мире наномутанты. Так, у потомства фруктовых мушек, обработанных наночастицами золота, были выявлены разнообразные изменения в структуре глаз, крыльев и груди.

Много лет назад И.А. Рапопорт [15] постулировал, что нет ни одного случая, когда бы найденный в химическом опыте с дрозофилой мутаген не был активен для очень многих организмов. В ходе наших первых разведывательных опытов, выполненных на лабораторных мышах, было установлено, что ультрамалые наночастицы золота, в зависимости от выбранных условий эксперимента, могут выступать в трех ипостасях: как мутаген, антимутаген и комутаген [16]. На модели кроветворных клеток рыб нами также было показано (неопубликованные данные), что наночастицы золота могут индуцировать выход огромного числа хромосомных аномалий, значительно превышающего природную норму.

С другой стороны, есть данные, свидетельствующие о том, что в целом ряде случаев наночастицы оказывают крайне слабое воздействие на гены и хромосомы либо вовсе не проявляют мутагенных свойств [17–19].

Все эти пока еще немногочисленные и порой противоречивые факты должны учитываться специалистами, занимающимися разработками в области нанотехнологий.

В целом же решение проблемы генетической безопасности материалов, создаваемых на базе методов нанотехнологического синтеза, скорее всего потребует многолетних и трудоемких исследований. В современных условиях только так можно будет поставить барьер, препятствующий попаданию генетически опасных нановеществ в окружающую природную среду. К сказанному важно добавить, что генетическую и биологическую безопасность человека можно обеспечить не только за счет недопущения наномутагенов в окружающую среду, но и путем создания эффективных антимутагенов или каких-то веществ-



«детергентов», связывающих и вымывающих наночастицы из внутриклеточной среды.

И последнее. По аналогии с радиационной генетикой и химической генетикой предлагаем называть новое направление, изучающее влияние средств нанокорпускулярного мутагенеза (наночастиц и наноматериалов) на изменения наследственных свойств у животных, растений и микроорганизмов, *нанокорпускулярной генетикой*, а индуцированные ими мутации — генные, хромосомные, геномные — *наномутациями*.

### Addendum

*«Мы можем наблюдать объект лишь в том случае, если дадим ему взаимодействовать с чем-то внешним по отношению к нему...»*

Поль Дирак

В 2013 г., выступая на заседании Президиума РАН в рамках обсуждения научного сообщения Ю.М. Евдокимова «Структурная нанотехнология нуклеиновых кислот...», я впервые постули-

➤ **Здоровье человека во многом зависит от обеспечения генетической безопасности, под которой понимается состояние защищенности генома человека от воздействия мутагенных факторов окружающей среды.**

ровал, что наночастицы золота, попадая в поле действия молекулы ДНК, сами могут становиться объектом изменения и перепрограммирования, а именно изменения всего спектра химико-физических свойств и перенормировки энергетических характеристик. Иначе говоря, взаимодействие наночастиц с генетическими матрицами гипотетически можно рассматривать как специфический рекомбинационный процесс, как своеобразный обмен информацией. Также постулировано, что, диффундируя в жидкокристаллические молекулы ДНК, наночастицы золота могут переходить из состояния хаоса в состояние высокой упорядоченности, то есть понижать константу своей энтропии. Это в свою очередь подтверждает один из фундаментальных постулатов мутационной генетики, сформулированный И.А. Рапопортом: там, где наблюдается увеличение мутационного выхода под влиянием мутагенов или супермутагенов, одновременно происходит параллельное уменьшение энтропии этих раздражителей [2, 6, 20]. Как известно, уменьшение энтропии нередко достигается за счет резонансного взаимодействия между уровнями.

➤➤ Именно наследственные структуры половых клеток хранят в своих глубинах историю всего живого, служат мостиком, связывающим между собой поколения, и тем делают жизнь бесконечной и непрерывной.

В этом контексте нельзя не вспомнить еще одну работу, в которой было показано, что нити ДНК определяют форму наночастиц золота [21]. Авторам данной работы было интересно узнать, могут ли различные участки ДНК стать своеобразным «генетическим кодом», который будет задавать направление синтеза наночастиц, как это происходит при синтезе белка. Когда молекулы ДНК связываются с гранями зародышей золота, последовательность оснований в цепочке определяет направление роста наночастиц. Поскольку последовательности разные, то и форма частиц варьирует. В своих экспериментах исследователи обнаружили, что цепочка из нескольких аденинов заставляет образовываться простую круглую частицу золота, тимины диктуют звездчатую форму, цитозины — форму плоского диска, а гуанины формируют шестиугольник. «Испытание с участием комбинации двух оснований, например последовательности из десяти *T* (тимин) и двадцати *A* (аденин), показало, что формы конкурируют друг с другом и дают промежуточные варианты, хотя *A* доминирует над *T*. ДНК-закодированный синтез может дать нам легкий и весьма необычный путь получения наночастиц определенной формы и с заданными свойствами. Наше открытие может оказать серьезное влияние на бионанотехнологии в целом», — заключили авторы этой работы [21].

Надо сказать, что наблюдения этих ученых чрезвычайно интересны, революционны, поскольку, как постулировал еще в 1973 г. И.А. Рапопорт [22],

«до сих пор не было известно о том, что генное поле оказывает влияние на молекулу», попавшую в область действия «атома» наследственности. Таким образом, средства нанокорпускулярного мутагенеза открывают нам возможность наблюдать поведение генома в разных плоскостях. ■

ПЭС 22057

Статья поступила в редакцию 13.08.2022;

принята к публикации 28.08.2022.

#### Примечание

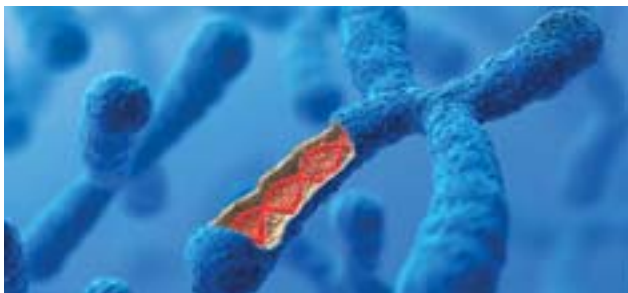
1. Под генетическими технологиями следует понимать совокупность методов и подходов, преобразующих генетические ресурсы в конечные продукты в виде фенотипических новшеств. При их помощи достигается цель — создание и отбор новых приспособлений, обновление геномов культурных растений и пород животных, микроорганизмов в соответствии с современными задачами, стоящими перед селекцией и сельским хозяйством, микробиологической промышленностью и медициной.

#### Источники

1. Захидов С.Т. Мутационная наногенетика в системе нанотехнологий // Нанотехнологии и охрана здоровья. 2010. № 3(4). С. 28–43.
2. Захидов С.Т. Выступление на заседании Президиума РАН 13 октября 2013 г. в рамках обсуждения научного сообщения Ю.М. Евдокимова «Структурная нанотехнология нуклеиновых кислот: создание „жидких“ и „твердых“ наноконструкций ДНК»: Стенографический отчет // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. С. 20–33.
3. Захидов С.Т. О нанотехнологиях в системе наук // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 3. С. 289–292.

#### References

1. Zakhidov S.T. Mutatsionnaya nanogenetika v sisteme nanotekhnologii [Mutational Nanogenetics in the System of Nanotechnologies]. *Nanotekhnologii i ohrana zdorov'ya*, 2010, no 3(4), pp. 28–43.
2. Zakhidov S.T. Vystuplenie na zasedanii Prezidiuma RAN 13 oktyabrya 2013 g. v ramkakh obsuzhdeniya nauchnogo soobshcheniya Yu.M. Evdokimova "Strukturnaya nanotekhnologiya nukleinoynykh kislot: sozdanie 'zhidkikh' i 'tverdykh' nanokonstruktsii DNK": Stenograficheskii otchet [Speech at the meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences on October 13, 2013 as part of discussion of the scientific report by Y.M. Evdokimov "Structural Nanotechnology of Nucleic Acids: Creation of 'Liquid' and 'Solid' DNA Nanostructures": Verbatim Report]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol 84, pp. 20–33.
3. Zakhidov S.T. O nanotekhnologiyakh v sisteme nauk [About Nanotechnologies in the System of Sciences]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, vol. 91, no 3, pp. 289–292.
4. Rapoport I.A. *Khimicheskii mutagenез: teoriya i praktika* [Chemical Mutagenesis: Theory and Practice]. Moscow, Znanie (repr. izd.), 2013, 86 p.
5. Kohl Y., Runden-Pran E., Mariussen E., et al. Genotoxicity of Nanomaterials: Advanced In Vitro Models and High Throughput Methods for Human Hazard Assessment: A Review. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no 10.
6. Evdokimov Yu.M. Nanochastitsy zolota "upravlyayut" upakovkoi DNK [Gold Nanoparticles 'Manage' the DNA Packaging]. *Priroda*, 2015, no 4, pp. 13–21.
7. Skuridin S.G., Dubinskaya V.A., Shtykova E.V., et al. Fiksatsiya nanochastits zolota v strukture kvazinematicheskikh sloev, obrazovannykh molekulami DNK [Fixation of Gold Nanoparticles in the Structure of Quasi-Nematic Layers Formed by DNA Molecules]. *Biologicheskie membrany*, 2011, vol. 28, pp. 191–198.
8. Yevdokimov Y.M., Skuridin S. G., Salyanov V. I., et al. A Dual Effect of Au-Nanoparticles on Nucleic Acid Cholesteric Liquid-Crystalline Particles. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 2011, vol. 2, pp. 461–471.
9. Aydin A., Sipahi H., Charehsaz M. *Nanoparticles toxicity and their routes of exposures*. Recent Advances in Novel Drug Carrier Systems (edited by Ali Demir Sezer), Publisher: InTech., 2012, pp. 483–500.
10. Di Bucchianico S., Fabbri M.R., Cirillo S., et al. Aneuploidogenic effects and DNA oxidation induced in vitro by differently sized gold nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 2014, vol. 9, pp. 2191–2204.



4. Рапопорт И.А. Химический мутагенез: теория и практика. М.: Знание (репр. изд.). 2013. 86 с.
5. Kohl Y., Runden-Pran E., Mariussen E., et al. Genotoxicity of Nanomaterials: Advanced In Vitro Models and High Throughput Methods for Human Hazard Assessment: A Review // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. No. 10.
6. Евдокимов Ю.М. Наночастицы золота «управляют» упаковкой ДНК // *Природа*. 2015. № 4. С. 13–21.
7. Скуридин С.Г., Дубинская В.А., Штыкова Э.В. и др. Фиксация наночастиц золота в структуре квазинематических слоев, образованных молекулами ДНК // *Биологические мембраны*. 2011. Т. 28. С. 191–198.
8. Yevdokimov Y.M., Skuridin S. G., Salyanov V. I., et al. A Dual Effect of Au-Nanoparticles on Nucleic Acid Cholesteric Liquid-Crystalline Particles // *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*. 2011. Vol. 2. P. 461–471.
9. Aydin A., Sipahi H., Charehsaz M. Nanoparticles toxicity and their routes of exposures // *Recent Advances in Novel Drug Carrier Systems* (edited by Ali Demir Sezer), Publisher: InTech. 2012. P. 483–500.
10. DiBucchianico S., Fabbriz M.R., Cirillo S., et al. Aneuploidogenic effects and DNA oxidation induced in vitro by differently sized gold nanoparticles // *International Journal of Nanomedicine*. 2014. Vol. 9. P. 2191–2204.
11. Doak S.H., Liu Y., Chen C. Genotoxicity and Cancer // *Adverse Effects of Engineered Nanomaterials*. Elsevier Inc. 2012. P. 243–261.
12. Ng C-T., Li J.J., Bay B-H., Yung L-Y.L. Current studies into the genotoxic effects of nanomaterials [Электронный ресурс] // *Journal of Nucleic Acids*. 2010, Article ID 947859, 12 page shttp: // dx.doi.org/10.4061/2010/947859.
13. Yao Y., Costa M. Genetic and epigenetic effects of nanoparticles // *J. Mol. Genet. Med.* 2013. Vol. 7. P. 1–6.
14. Vecchio G., Galeone A., Brunetti V., et al. Mutagenic effects of gold nanoparticles induce aberrant phenotypes in *Drosophila melanogaster* // *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2012. Vol. 8. P. 1–7.
15. Рапопорт И.А. *Микрогенетика*. М.: Наука (репр. изд.). 2010. 530 с.
16. Захидов С.Т., Муджири Н.М., Рудой В.М., Деметьева О.В., Макаров А.А., Зеленина И.А., Маршак Т.Л. Наночастицы золота: мутаген, антимутаген, комутаген? // *Известия РАН*. 2017. № 3. С. 213–217. (Серия биология.)
17. Муджири Н.М., Захидов С.Т., Рудой В.М., Деметьева О.В., Макаров А.А., Макарова И.В., Зеленина И.А., Андреева Л.Е., Маршак Т.Л. Цитогенетическая активность наночастиц золота в половых и соматических клетках мышей линии 129 с нонсенс-мутацией в гене ДНК-полимеразы йота // *Известия РАН*. 2018. № 2. С. 137–143. (Серия биология.)
18. Pan B., Kaldone P.R., Alund A.W., Du H., et al. Mutagenicity of silver nanoparticles evaluated using whole-genome sequencing in mouse lymphoma cells // *Nanotoxicology*. 2021. Vol. 15. P. 418–432.
19. Suzuki T, Miura N., Hojo R., et al. Genotoxicity assessment of titanium dioxide nanoparticle accumulation of 90 days in the liver of *gpt delta* transgenic mice // *Genes and Environment*. 2020. Vol. 42. P. 2–6.
20. Рапопорт И.А. Открытие химического мутагенеза. М.: Наука, 1993. 304 с.
21. Wang Z., Tang L. Huey L., et al. Discovery of the DNA “Genetic Code” for Abiological Gold Nanoparticle Morphologies // *Angew chem. Int. Ed. Angl.*, 2012, 51(36), 9078–9082; цит. по: <https://smotrim.ru/article/1372563>.
22. Рапопорт И.А. Развитие структуры компакта Дирака в генетическом строении // *Сб.: Применение химических мутагенов в сельском хозяйстве и медицине*. М.: Наука, 1973. С. 7–46.