

Нанороботы - результат взаимодействия нано- и робототехники.

Nano-robots' - result of interaction nano- and robots' technique

Академик Олег Фиговский, директор R&D of Asteros Sp. Z.o.o.

Academician (EAS, RAASN, REA), Oleg Figovsky, director R&D of Asteros Sp. Z.o.o.

Ключевые слова: нанороботы, применение в медицине, опыт в Израиле и за рубежом.

Key words: nano-robots, medical application, Israeli & foreign experience.

Аннотация: Нанороботы - когнитивный прорыв в технологиях.

Приводятся примеры применения в Израиле и за рубежом.

Annotation: Nano-robots - result of interaction nano- and robots' technique and technological advantages. Medical application in Israel and abroad.

В нашей книге "Будущее начинается сегодня. Этюды о новых тенденциях науки", изданной в декабре 2021 года в Перми были детально рассмотрены как современные нанотехнологии, так и последние достижения робототехники (книга опубликована полностью на сайте: [http://www.figovsky.iri-](http://www.figovsky.iri-as.org/%D0%91%D1%83%D0%B4%D1%83%D1%89%D0%B5%D0%B5%20%D1%81%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F.pdf)

[as.org/%D0%91%D1%83%D0%B4%D1%83%D1%89%D0%B5%D0%B5%20%D1%81%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F.pdf](http://www.figovsky.iri-as.org/%D0%91%D1%83%D0%B4%D1%83%D1%89%D0%B5%D0%B5%20%D1%81%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8F.pdf)).

Здесь же я рассматриваю нанороботов, создаваемых на стыке этих двух технологий. Приведем определение нанороботов согласно Википедии.

Нанороботы, или наноботы, — роботы, размером сопоставимые с молекулой (менее 100 нм), обладающие функциями движения, обработки и передачи информации, исполнения программ. **Нанороботы**, способные к созданию своих копий, то есть самовоспроизводству, называются репликаторами. Такие наномашинны обоснованы в известном выступлении Ричарда Фейнмана «Внизу полным-полно места» 1959 года. Это вполне может стать самым важным технологическим прорывом в истории человечества. Предпосылка проста: крошечные машины, функционирующие на клеточном уровне, способны восстанавливать ткани, уничтожать «злоумышленников» и доставлять нанолечения прицельно в определенную точку. И это не обязательно означает наполнение вашего кровотока триллионами микроскопических кусочков металла и кремния. Есть много причин полагать, что ученые могут превратить современных биологических роботов в агентов искусственного интеллекта, способных выполнять кодовые функции внутри нашего тела.

Представьте себе рой ИИ, управляемый специальной нейронной сетью, подключенной к нашему интерфейсу мозг-компьютер с единственной целью — оптимизация биологических функций. Возможно, мы не сможем решить проблему бессмертия к 2100 году, но медицинские нанороботы могут значительно сократить

этот разрыв. Поколение людей, родившихся в 2000 году и позже, может застать создание специальных медицинских нанороботов, способных функционировать на клеточном уровне. Об этом заявили эксперты издание The Next Web. Специалисты считают, что с помощью нанороботов врачи смогут точно доставлять лекарства. Кроме того, такие устройства будут использовать для регенерации поврежденных тканей и внутренних органов человека. По мнению экспертов TheNext Web, нанороботы будут представлять собой подобие бактерий-«киборгов».

Рассмотрим новейшие научные достижения в этой области. Так учёные под руководством профессора Mingming Wi разработали новые микроботы, которые могут доставлять лекарства в определенные места организма: их можно подзаряжать с помощью лазера. Авторы этой работы напечатали микроботов размером с клетку с помощью системы лазерной литографии для 3D-печати. Их сделали из гидрофобной (водоотталкивающей) смолы. Для того, чтобы питать и направлять микроботов, авторы использовали внешний ультразвуковой преобразователь: его нужно привести на цель, после этого звуковые волны заставляют пузырьки колебаться и толкают робота вперед. Таким образом можно управлять ими дистанционно. Новые роботы смогут без лишних вмешательств доставить лекарства к определенному органу или области в организме человека: новая разработка мобильнее, чем аналоги и быстрее перемещается по организму.

Исследователям из технологического университета Чалмерса (Швеция) удалось создать крошечные транспортные средства, работающие только на свету. Нанеся оптическую метаповерхность на микроскопическую частицу, а затем используя источник света для управления ею, им удалось перемещать крошечные транспортные средства множеством сложных и точных способов – и даже использовать их для транспортировки других объектов. Свету присуща способность перемещать микроскопические объекты – свойство, ранее использовавшееся для разработки получившей Нобелевскую премию исследовательской идеи «оптического пинцета», в котором для управления и маневрирования крошечных частиц с невероятной точностью используется сильно сфокусированный лазерный луч. Теперь исследовательская группа из Технологического университета Чалмерса и Университета Гетеборга показала, как даже несфокусированный свет можно использовать для управляемого маневрирования микроскопических частиц. Исследователи производили автомобили размером 10 микрометров в ширину и 1 микрометр в толщину – одну тысячную миллиметра. Транспортные средства состояли из крошечной частицы, покрытой чем-то, известным как «метаповерхность».

Метаповерхности – это ультратонкие структуры из тщательно спроектированных и упорядоченных наночастиц, предназначенных для направления света интересными и необычными способами. Они предлагают захватывающие возможности для использования в передовых компонентах для оптических приложений, таких как камеры, микроскопы и электронные дисплеи. Обычно их считают неподвижными объектами, а их использование рассматривается как способность управлять светом и воздействовать на него. Но здесь исследователи посмотрели на это с другой стороны, исследуя, как силы, возникающие в результате изменения импульса света, могут быть использованы для управления метаповерхностью. Исследователи взяли свои микроскопические транспортные средства, которые они назвали «метавообразами», и поместили их на дно емкости с водой, а затем использовали слабо сфокусированный лазер, чтобы направить на них плоскую световую волну.

С помощью чисто механического процесса – тепло, выделяемое светом, не играет никакой роли в эффекте – автомобили можно было перемещать по разным схемам. Регулируя интенсивность и поляризацию света, исследователям удается контролировать движение и скорость транспортных средств с высокой точностью, перемещая их в разных направлениях и используя сложные узоры, такие как восьмерки. «Согласно третьему закону Ньютона, для каждого действия существует равная и противоположная реакция – это означает, что, когда свет попадает на метаповерхность и отклоняется в новом направлении, метаповерхность также отталкивается в другом направлении. Представьте себе игру в бильярд, когда два мяча ударяются друг о друга и отскакивают в разные стороны. В этом случае фотоны и метаповерхность похожи на эти два шара для пула», – объясняет Микаэль Келл, профессор кафедры физики Технологического университета Чалмерса, соавтор статьи и руководитель исследовательского проекта.

«Метавтомобили были стабильны, а их навигация была очень предсказуемой и управляемой. Благодаря усовершенствованным автоматизированным системам обратной связи и более сложному управлению интенсивностью и поляризацией источника света станет возможным даже более сложная навигация», – объясняет Дэниел Андрен, ранее работавший на кафедре физики в Чалмерсе и ведущий автор исследования. Исследователи также экспериментировали с использованием транспортных средств в качестве транспортеров, чтобы перемещать мелкие частицы по резервуару. Метавтомобили оказались способными с легкостью транспортировать предметы, включая микроскопические шарики полистирола и частицы дрожжей, по воде. Им даже удалось столкнуть частицу пыли, в 15 раз превышающую размер самого метавтомобиля. «При исследовании оптических сил есть много интересных эффектов, которые еще не полностью изучены. Это не приложения, которые движут этим типом исследований, а изучение различных возможностей. Впереди несколько этапов, и никогда не знаешь, что произойдет. Но тот факт, что мы показали, как метавтомобили могут использоваться в качестве транспортеров, является наиболее многообещающим потенциальным применением, например, для перемещения частиц через клеточные растворы», – объясняет Микаэль Келл.

Биоинженеры из Китая **Jiawen Li, Li Zhang, Dong Wu** создали микророботов в форме рыб, которые направляются с помощью магнитов к раковым клеткам, где изменение уровня кислотности (pH) заставляет их открывать роты и выпускать лекарство. Исследователи напечатали 4D-микророботов в форме краба, бабочки и рыбы, используя pH-чувствительный гидрогель. Регулируя плотность печати на определенных участках формы – на краях клешней краба или крыльях бабочки, – команда закодировала изменение формы в зависимости от уровня pH. Затем они сделали микророботов магнитными, поместив их в суспензию наночастиц оксида железа. Так, например, у микроробота в форме рыбы открывается и закрывается «пасть». Команда показала, что они могут направлять рыбу через искусственные кровеносные сосуды, чтобы достичь раковых клеток в определенной области чашки Петри. Когда они снизили pH окружающей среды, рыба открыла рот, чтобы выпустить химиотерапевтический препарат, который атаковал близлежащие клетки. Авторы работы отмечают, что необходимо сделать микророботов еще меньше, чтобы они могли ориентироваться в реальных кровеносных сосудах. Также необходимо определить подходящий метод визуализации, чтобы отслеживать их движения в теле.

В Китайской академии наук разработали магнитные пиксели. Новый робот состоит из магнитных пикселей — частиц, содержащих жидкий металл, неодимовый магнит, а его эластичная матрица содержит кремний. С помощью лазера исследователи нагрели и намагнитили каждый из пикселей робота по отдельности. «Изменяя температуру, мы можем многократно «записывать» и «стирать» профили намагниченности по мере

необходимости, — объяснил Ран Чжао, ведущий изобретатель, — независимо от того, основаны они на мягких или твердых магнитных материалах, процесс намагничивания большинства мягких роботов связан с процессом их производства. Это означает, что роботы не могут реализовать перенастройку функций с помощью программ как роботы с блоками управления. Магнитным мягким роботам предстоит пройти долгий путь, прежде чем их можно будет широко применять».

Робот может сохранять фиксированную форму, просто переключившись в режим «жесткого тела». Его намагниченность и жесткость формы могут быть легко перепрограммированы. Ему создали определенный «интеллект», за счет которого он сможет выполнять огромное количество задач. «Действия и функции нашего мягкого робота перенастраиваются с помощью программирования, — говорят исследователи. Добавляя шарниры изгиба между магнитными пикселями, мы придаем мягкому роботу прочность». Магнитные мягкие роботы — это системы, которые могут изменять форму или выполнять различные действия при воздействии на них магнитного поля. Роботы будут полезны для мониторинга окружающей среды, транспортировки лекарств, биомедицинских процедур.

В Калифорнийском университете в Риверсайде под руководством **Zhiwei Li** разработали плавающую роботизированную пленку. Устройство уже работает автономно и контролирует движения, а в будущем сможет собирать нефть и очищать воду. Изначально ученые хотели создать мягких роботов, которые будут самодостаточными и смогут самостоятельно адаптироваться к изменениям окружающей среды. Для получения энергии им нужен солнечный свет, поэтому они могут работать бесконечно. К тому же такие роботы-пленки можно использовать повторно. Робота назвали Neusbot в честь нейстонов — животных, которые живут на границе воды и воздуха. В эту группу входят водомерки. Эти насекомые перемещаются по поверхности озер и медленных ручьев пульсирующими движениями. Таким же перемещениям научили и Neusbot. Прототипы роботов-пленок изобретали и раньше: они могли изгибаться под действием света, но создать регулируемые механические колебания, на которые способен Neusbot, не удавалось. А такой движения — ключ к управлению роботом, чтобы сделать его работоспособным.

Ученые решили проблему с помощью трехслойной пленки, которая работает по принципам парового двигателя. Средний слой пленки пористый — он удерживает воду и наностержни оксида железа и меди. Наностержни преобразуют световую энергию в тепло, испаряя воду и обеспечивая импульсное движение по поверхности воды. Нижний слой Neusbot гидрофобен, поэтому даже если океанская волна захлестнет пленку, она всплывет обратно на поверхность. Кроме того, наноматериалы могут выдерживать высокие концентрации солей без повреждений. Направление движения Neusbot можно контролировать, меняя угол источника света. То есть, работая только от равномерного света солнца, робот просто двигается вперед. А дополнительным источником света можно указывать Neusbot, куда плыть и что чистить. Сейчас у робота-пленки всего три слоя. Но исследовательская группа хочет протестировать другие варианты: например, добавить четвертый слой, способный впитывать масло или другие химические вещества. Обычно к местам разлива нефти отправляют суда для ручной очистки. Neusbot мог бы работать на таких задачах как робот-пылесос, но на поверхности воды. А еще ученые хотят научиться более точно контролировать режим колебаний и дать роботу возможность двигаться по более сложным схемам.

Исследователи из Фрайбургского университета (Германия) **Dr. Stefan Schiller** and **Dr. Matthias Huber** разработали искусственную мышцу исключительно на основе натуральных белков. Сокращения мышцы можно

контролировать с помощью изменений кислотности среды и температуры. Материал, который использовали ученые, основан на эластине, природном волокнистом белке, который также встречается у людей: он придает эластичность коже и кровеносным сосудам. Исследователи разработали два эластиноподобных белка, один из которых реагирует на колебания уровня кислотности (рН), а другой – на изменения температуры. Ученые объединили два белка с помощью фотохимического перекрестного связывания, чтобы сформировать двухслойный материал. Так, реагируя на изменения в уровне рН в водной среде, куда поместили материал, или температуру, искусственная мышца смогла ритмически сокращаться. В случае с изменениями температуры химическая реакция начиналась примерно при 20 градусах по Цельсию. При этом можно было запрограммировать определенные состояния мышцы и снова сбросить их с помощью другого стимула.

Ученые из университета Вермонта, университета Тафтса и Гарвардского университета использовали эмбриональные клетки лягушки *Xenopus laevis* для создания биологических машин шириной в миллиметр — так называемых «ксеноботов». Первые ксеноботы были созданы еще в 2020 году — тогда ученые смогли разработать алгоритм, который собирал клетки вместе для создания различных биологических машин. Когда ксеноботов активировали, клетки начали формировать «тела», которые могли выполнять различные задачи, например — перемещение и ориентация в различных пространствах, запоминание небольшого количества информации, а также исцеление самих себя в случае повреждения. Теперь ученые обнаружили, что организмы могут объединять вместе сотни отдельных клеток и собирать их в «детей ксеноботов». По словам ученых, вновь собранные клетки «становятся новыми ксеноботами, которые выглядят и двигаются точно так же, как они сами».

Майкл Левин, соруководитель исследования, рассказал, что у исследователей был «полный, неизменный геном лягушки, который не давал даже намека на то, что эти клетки могут работать вместе над новой задачей». Но выяснилось, что ксеноботы могут действовать подобно «Пакману» — они собирают клетки «ртом», сжимая их в копии самих себя и создавая то, что другой автор работы, Сэм Кригман, назвал «детьми», «внуками», «правнуками» и «праправнуками» ксеноботов. Согласно сообщению ученых, кинематическая репликация хорошо известна на уровне молекул, но никогда ранее не наблюдалась в масштабе целых клеток или организмов. «Мы создали ксеноботов, которые «ходят». Потом мы создали ксеноботов, которые «плавают». А теперь, в этом исследовании, мы нашли ксеноботов, которые кинематически воспроизводятся», — заявил Джошуа Бонгард, ученый-компьютерщик и эксперт по робототехнике из Университета Вермонта. По словам Левина, исследование может оказаться полезным для будущего регенеративной медицины, а Бонгард добавил, чтоб в конечном итоге ксеноботы научились «делать полезную работу» — например, убирать микропластик в океане.

Химиотерапия убивает рак, но также атакует здоровые клетки. Это неблагоприятное условие приводит к болезненному состоянию и может нанести долгосрочный ущерб здоровью пациента. Сильнодействующие лекарства остаются распространенным средством против рака только потому, что их положительное действие, спасающее жизни, перевешивает побочные эффекты. Сегодня известный международный госпиталь Шиба (Израиль), отзывы о котором написаны на многих языках мира, исследует способ, чтобы обойти негативные стороны химиотерапии. Медицинский центр им. Хаима Шиба является не только самой крупной государственной больницей страны, но и мощнейшим

исследовательским центром, а также площадкой для проведения клинических испытаний. Госпиталь оснащен современным оборудованием для диагностики и хирургии (роботизированными системами с интраоперационной визуализацией). На его территории работают лаборатории для проведения молекулярного анализа болезней пациентов, а также создания действенных и безопасных лекарств на основе генной инженерии.

Одна из новейших разработок, которую исследуют в центре Шиба – доставка химиотерапии с помощью нанороботов. Транспортировка лекарств непосредственно там, где это необходимо, не только минимизирует побочные эффекты, но и делает препараты более эффективными. Вот зачем исследователи разработали крошечных роботов, выпускающих активное вещество, только когда найдут раковые клетки.

Представьте себе армии миллионов миниатюрных роботов, путешествующих по кровотокам, чтобы подкрасться к опухоли. Звучит фантастически, но израильские ученые нашли способ, как превратить это в реальность и уже поместили нанороботов из ДНК в тараканов.

Созданные нанороботы способны взаимодействовать с клетками животного, а также между собой, и выпускать лекарства. Для исследования ученые отметили крошечных роботов флуоресцентным материалом, чтобы отслеживать их движения и действия внутри тел тараканов. В будущем эту технологию планируют использовать для лечения разных заболеваний, включая рак.

Команда исследователей из Университета Бар-Илан в Израиле успешно продемонстрировала возможность использования нитей ДНК для создания нанороботов, функционирующих внутри живого таракана

По итогам проведенных исследований, ученые опубликовали статью в журнале [Nature Nanotechnology](#). В ней подробно описан процесс создания нескольких нанороботов на основе нитей ДНК, которые затем были введены в организм лабораторных тараканов. Нанороботы работали вместе, подобно единому компьютеру, и могли влиять на функции организма с помощью различных молекул. Исследования, проведенные ранее, показали, что нити ДНК можно программировать и создавать из них простейшие компьютерные цепи, способные выполнять элементарные математические задачи. Программирование возможно благодаря естественной способности нитей реагировать на различные белки.

Заслуга израильских ученых состоит в том, что им впервые удалось продемонстрировать возможность подобного программирования непосредственно внутри живого организма. Исследователи «размотали» нити ДНК, а затем «связали» их в новую структуру, похожую на коробку-оригами. В нее затем поместили по одной химической молекуле. Ученые создали несколько вариантов таких «коробок», взаимодействующих друг с другом и белками внутри таракана. Смысл этих действий заключался в том, чтобы создать несколько сценариев, которые автоматически откроют «коробку» при столкновении с определенными белками. Добавление нескольких наноструктур, взаимодействующих с белками, позволяет увеличить количество возможностей нанороботов. Фактически же, речь идет о широких вычислительных возможностях нанороботов, находящихся внутри организма. Причем эта биосистема способна удаленно взаимодействовать с обычной электроникой. В ходе экспериментов, исследователи смогли запрограммировать ДНК-оригами для соединения с молекулами гемолимфы, которые находятся внутри сосудистой системы таракана

и сообщили, что все роботы исправно выполняли заложенную в них программу, открывая «коробку» в соответствии с заложенным сценарием.

Исходя из полученных результатов, можно говорить об огромном потенциале технологии и широчайших возможностях ее применения в будущем. Например, нанороботы смогут обнаруживать и уничтожать раковые клетки или токсичные молекулы, защищая организм носителя от отравления. Также нанороботы могли бы выпускать молекулы антидепрессантов и транквилизаторов в ответ на состояние агрессии. Подобная терапия может стать хорошей альтернативой тюрьмам и другим исправительным учреждениям. Очевидно, что технология одновременно чрезвычайно привлекательна и для тех, кто не дружит, с законам, ведь использование нанороботов фактически позволит удаленно управлять поведением человека.

Ученые из Университета Бар-Илан разработали первых в своем роде нанороботов, предназначенных для лечения таких болезней, как шизофрения, эпилепсия и депрессия. Согласно сообщению, форма нанороботов была разработана при помощи «Оригами ДНА», который создает заранее определенную двухмерную и трехмерную конфигурацию. Лекарственные препараты находятся внутри наноробота и высвобождаются при необходимости. Речь идет о более эффективном лечении когнитивных расстройств. С помощью электромагнитов врачи могут запрограммировать высвобождение препарата в заранее определенное время, тем самым усиливая его действие. Более того, процесс может управляться с помощью мозговых волн.

Впервые ученые смогли впустить лекарственные препараты в живую ткань с использованием роботов. Посредством алгоритма компьютер исследователей вычисляет время, когда мозг человека находится в стадии интенсивного использования (например, при решении математического уравнения), – и роботы высвобождают препарат при усилении мозговой активности. По словам ученых, речь идет о гораздо более эффективном лечении когнитивных расстройств. Нанороботы входят в число многих новейших разработок израильских ученых.

Именно на стыке нанотехнологий и робототехники можно ожидать новых технических прорывных достижений.