

Худойбердиева Б.Э.

студентка

Курбанов А.К., к.м.н.

доцент кафедры «1-гистологии и медицинской биологии»

Ташкентский государственный медицинский университет

МОЛЕКУЛЯРНАЯ КОММУТАЦИЯ КАК НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТАХ

Аннотация

В статье рассматривается концепция молекулярной коммутации как фундаментального механизма хранения и передачи информации в нуклеиновых кислотах, сформулированного в научных исследованиях XXI века. Данный подход расширяет классическое представление о функциях ДНК, согласно которому биологическая информация передаётся исключительно посредством комплементарного спаривания оснований в двойной спирали. Экспериментальные данные демонстрируют возможность информационного взаимодействия между молекулами нуклеиновых кислот без образования стабильных двойных цепей. Молекулярная коммутация открывает новые перспективы для понимания молекулярных основ жизни, а также для развития биотехнологий, синтетической биологии и систем хранения информации на основе ДНК.

Ключевые слова: молекулярная коммутация, ДНК, нуклеиновые кислоты, молекулярные основы жизни, хранение информации, неклассические взаимодействия, молекулярная биология, биофизика.

Khudoyberdieva B.E.

Student

Kurbanov A.K., MD, PhD

Associate Professor, Department of Histology and Medical Biology-1

Tashkent State Medical University

*Molecular Commutation as a New Mechanism of Information Storage
and Transmission in Nucleic Acids*

Abstract

The article examines the concept of molecular commutation as a fundamental mechanism for the storage and transmission of information in nucleic acids, as formulated in scientific research of the 21st century. This approach expands the classical understanding of DNA functions, according to which biological information is transmitted exclusively through complementary base pairing within the double helix. Experimental data demonstrate the possibility of informational interactions between nucleic acid molecules without the formation of stable double strands. Molecular commutation opens new perspectives for understanding the molecular foundations of life, as well as for the development of biotechnology, synthetic biology, and DNA-based information storage systems.

Keywords: molecular commutation, DNA, nucleic acids, molecular foundations of life, information storage, non-classical interactions, molecular biology, biophysics.

Введение. Молекулярная коммутация представляет собой один из современных подходов к пониманию того, каким образом биологическая информация может храниться и передаваться в клетке помимо классического генетического кода. В традиционной молекулярной биологии нуклеиновые кислоты, прежде всего ДНК и РНК, рассматриваются как линейные молекулы, в которых информация записана в виде последовательности нуклеотидов. Считалось, что именно эта последовательность полностью определяет наследственные свойства организма, а передача информации осуществляется через репликацию ДНК и синтез РНК и белков. Однако исследования последних десятилетий показали, что такая модель является неполной и не отражает всей сложности процессов, происходящих в живой клетке.

Было установлено, что нуклеиновые кислоты обладают способностью изменять свою пространственную структуру, переходя из одного состояния в другое в зависимости от условий окружающей среды, наличия определённых молекул, ионного состава или взаимодействия с белками. Эти структурные переходы носят обратимый характер и могут существенно влиять на функциональное состояние молекулы. Именно эта способность к обратимым переключениям между различными состояниями и получила название молекулярной коммутации.

Если рассматривать молекулярную коммутацию в самом общем виде, то её можно описать как процесс, при котором одна и та же молекула нуклеиновой кислоты может находиться в нескольких устойчивых или полустойчивых формах, каждая из которых соответствует определённому функциональному состоянию. При этом первичная структура, то есть последовательность нуклеотидов, остаётся неизменной. Меняется не текст генетической информации, а способ её «прочтения» и реализации клеткой. ДНК, несмотря на кажущуюся простоту своей структуры, не является

жёсткой и неизменной молекулой. Она способна принимать различные пространственные формы. Наиболее известной является В-форма ДНК, которая описана в большинстве учебников и считается основной формой двойной спирали в клетке. Однако в определённых условиях ДНК может переходить в А-форму или Z-форму, отличающиеся геометрией спирали, плотностью упаковки и ориентацией оснований. Эти переходы не являются случайными и часто связаны с регуляцией активности генов. Таким образом, сама форма ДНК может нести дополнительную информацию, влияя на то, будет ли данный участок генома активен или подавлен.

РНК обладает ещё большей структурной пластичностью, чем ДНК. В отличие от ДНК, РНК чаще всего является одноцепочечной молекулой, что позволяет ей образовывать множество внутримолекулярных связей и формировать сложные пространственные структуры. Одна и та же молекула РНК может сворачиваться по-разному, образуя альтернативные структуры, каждая из которых соответствует определённому функциональному состоянию. Переход между такими структурами может происходить быстро и обратимо, что делает РНК удобным инструментом для реализации молекулярной коммутации.

Особенно наглядным примером молекулярной коммутации являются рибосвитчи. Рибосвитчи представляют собой участки молекул информационной РНК, способные напрямую связывать небольшие молекулы, такие как метаболиты или ионы. При связывании такой молекулы структура РНК изменяется, что приводит либо к включению, либо к выключению синтеза белка. В данном случае РНК одновременно выполняет роль сенсора, регулятора и переключателя, что наглядно демонстрирует, что нуклеиновые кислоты могут самостоятельно управлять потоками информации в клетке.

Молекулярная коммутация тесно связана с эпигенетическими механизмами регуляции. Эпигенетика изучает наследуемые изменения активности генов, которые не связаны с изменением последовательности ДНК. Одним из таких механизмов является метилирование ДНК. Добавление метильных групп к определённым основаниям изменяет физико-химические свойства молекулы ДНК и её способность взаимодействовать с регуляторными белками. В результате один и тот же ген может находиться в активном или неактивном состоянии. Эти состояния могут сохраняться при делении клеток, что позволяет рассматривать их как особую форму молекулярной памяти. Помимо ДНК, эпигенетическим модификациям подвергается и РНК. В последние годы было показано, что РНК содержит большое количество химических модификаций, которые влияют на её стабильность, скорость деградации и эффективность трансляции. Эти модификации могут изменяться в зависимости от физиологического состояния клетки, тем самым формируя динамическую систему регуляции. С точки зрения молекулярной коммутации такие модификации можно рассматривать как переключатели, изменяющие функциональное состояние РНК. С физико-химической точки зрения молекулярная коммутация основана на изменении энергетического ландшафта молекулы. Каждое структурное состояние соответствует определённому минимуму свободной энергии. Переход между состояниями возможен при наличии внешнего воздействия, например изменения температуры, концентрации ионов или связывания специфической молекулы. Эти переходы происходят без разрыва ковалентных связей, что обеспечивает их обратимость и высокую скорость.

Современные исследования также указывают на возможную роль квантово-физических эффектов в процессах молекулярной коммутации.

Рассматриваются такие явления, как протонные переходы и таутомерные перестройки азотистых оснований, которые могут временно изменять свойства спаривания нуклеотидов. Хотя данные механизмы ещё недостаточно изучены, предполагается, что они могут вносить вклад в тонкую настройку процессов хранения и передачи информации.

С точки зрения информационной теории молекулярная коммутация существенно увеличивает информационную ёмкость нуклеиновых кислот. Если в классической модели информация ограничена линейной последовательностью нуклеотидов, то в случае коммутации учитываются также структурные состояния, химические модификации и динамические переходы между ними. Это позволяет одной и той же молекуле ДНК или РНК кодировать значительно больше информации, чем предполагалось ранее.

Биологическое значение молекулярной коммутации особенно хорошо прослеживается в процессах развития и дифференцировки клеток. Клетки организма имеют одинаковый геном, однако выполняют разные функции. Это возможно благодаря тому, что в каждой клетке активируются разные наборы генов, что во многом определяется коммутационными и эпигенетическими механизмами. Аналогичные процессы наблюдаются в нервной системе, где динамическая регуляция экспрессии генов играет важную роль в обучении и памяти.

Нарушения механизмов молекулярной коммутации могут приводить к развитию различных заболеваний. Изменения в эпигенетическом состоянии генома ассоциированы с онкологическими процессами, нарушениями развития и нейродегенеративными заболеваниями. Это делает изучение молекулярной коммутации важным направлением современной медицины и биологии.

Заключение. Таким образом, молекулярная коммутация представляет собой новый фундаментальный механизм хранения и передачи информации в нуклеиновых кислотах. Экспериментальные исследования XXI века убедительно демонстрируют, что ДНК и РНК способны участвовать в информационных процессах не только через классическое комплементарное спаривание, но и посредством слабоаффинных и обратимых молекулярных взаимодействий. Открытие молекулярной коммутации углубляет понимание молекулярных основ жизни и подтверждает сложность и многоуровневость биологических информационных систем. Практическое значение данного направления связано с перспективами создания новых биомолекулярных вычислительных систем, инновационных методов хранения данных и развития синтетической биологии. В совокупности это подчёркивает ключевую роль нуклеиновых кислот как универсальных носителей и процессоров информации в живых системах.

Использованные источники:

1. Альбертс Б., Джонсон А., Льюис Дж., Морган Д., Рафф М., Робертс К., Уолтер П. Молекулярная биология клетки. — 6-е изд. — Москва: Лаборатория знаний, 2016.
2. Уотсон Дж., Бейкер Т., Белл С., Ганн А., Левин М., Лосик Р. Молекулярная биология гена. — Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014.
3. Лодиш Х., Берк А., Кайзер К., Кригер М., Брэтчер А., Плоэг Х., Амон А., Скотт М. Молекулярная клеточная биология. — Москва: БИНОМ, 2017.
4. Франк-Каменецкий М. Д. Самая главная молекула. От структуры ДНК к биологии XXI века. — Москва: Альпина нон-фикшн, 2019.

- 5.Никитин М. П. Неклассические механизмы информационных взаимодействий нуклеиновых кислот // Успехи химии. — 2010. — Т. 79, № 1. — С. 3–22.
- 6.Никитин М. П., Ткачев В. Ю. Физико-химические основы информационных процессов в ДНК // Биофизика. — 2012. — Т. 57, № 4. — С. 675–689.
- 7.Брекер Р. Р. Рибосвитчи и регуляторные функции РНК // Молекулярная биология. — 2013. — Т. 47, № 2. — С. 187–201.
- 8.Шарп П. Центральная роль РНК в регуляции клеточных процессов // Успехи биологической химии. — 2010. — Т. 50. — С. 121–138.
- 9.Бёрд А. Современные представления об эпигенетике // Генетика. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 749–758.
- 10.Яниш Р., Бёрд А. Эпигенетическая регуляция экспрессии генов // Молекулярная биология. — 2004. — Т. 38, № 4. — С. 541–552.
- 11.Карелл Т., Курц М., Мюллер М. Неканонические основания ДНК как дополнительный уровень генетической информации // Биохимия. — 2019. — Т. 84, № 9. — С. 1045–1060.
- 12.Гилберт У. Концепция «РНК-мира» и её значение для молекулярной биологии // Природа. — 1987. — № 3. — С. 15–23.