

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:
27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

ЗАХИРИДДИН
МУҲАММАД БОБУР
НОМИДАГИ АНДИЖОН
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE
UNIVERSITY NAMED
AFTER ZAKHIRIDDIN
MUKHAMMAD BABUR

ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика
Тадқиқотлари
(Махсус сон)

SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and
Mathematical Research
(Special Issue)

Андижон
2023 йил

Муассис

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси
томонидан 2019-йил 26 декабрда
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:
27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

Таҳририят манзили:

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: adu_xabarnoma@mail.ru Расмий сайт: uzjournals.edu.uz/adu

Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.

М.Х.Ашуров¹, Б.Л.Оксенгендлер², С.Х.Сулейманов², С.Е.Максимов³, З.И.Каримов⁴, Н.Н.Никифорова², Ф.А.Искандарова⁴.

¹Институт Ядерной Физики Академии Наук Республики Узбекистан;

²Институт Материаловедения НПО "Физика-Солнце" Академии Наук Республики Узбекистан;

³Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.У.А.Арифова Академии Наук Республики Узбекистан;

⁴Центр развития нанотехнологий при Национальном Университете Узбекистана имени М. Улугбек

Аннотация. Проблемы радиационной деградации объектов живой и неживой природы рассмотрены в рамках концепции сложности. Построены элементарные модели проявления эффектов спиновой химии и квантовой запутанности в процессах подпороговой радиационной физики

Ключевые слова: радиационная деградация, Оже-деструкция, спиновый катализ, квантовая запутанность, лазерные материалы, кислородный мостик, водородная связь, ДНК.

И.Введение. Исторический обзор развития радиационной физики (начиная с середины XIX века и по настоящее время) с большой степенью правдоподобия указывает на три причины ощутимого прогресса в этой области:

- (1) Появление нового типа облучающих установок;
- (2) Появление новых материалов и структур – объектов облучения;
- (3) Появление и формулировка новой концепции в радиационной физике конденсированного состояния (РФКС).

К началу XXI века эти элементы, сочетаясь и комбинируясь, принципиальным образом изменили облик РФКС, и теперь стали кодовыми понятиями: (1) нелинейность и неравновесность, вызванные облучением высокоинтенсивной радиации с широким энергетическим спектром; (2) материалы, у которых в радиационном отклике большее значение имеют структура, нежели их физико-химические свойства; (3) появление общей теоретической концепции – «COMPLEXITY», являющейся детищем синергетики. Она на настоящий момент стала наиболее мощным подходом в изучении «**сложных систем**».

Такая метаморфоза охватила большую часть направлений РФКС, в том числе и разнообразные аспекты **радиационной деградации** материалов и приборов на их основе, включая и биологические объекты (см., напр. [1-4]).

Цель данной работы – рассмотрение (в краткой форме) ряда новых особенностей в проблеме деградации, имеющих значение как для неживой, так и для живой Природы. Естественно, что наш анализ производится в общих рамках «COMPLEXITY», причем с учетом нескольких новых фундаментальных достижений в физике, химии, биологии и кибернетике.

II. Концепция спинового катализа [5]. Спиновый катализ (СК), т.е. использование спина в качестве катализатора, является замечательным примером сочетания кристаллохимии с квантовой физикой (так называемая концепция «**bonds and bands**»). Суть СК его состоит в следующем (рис.1.).

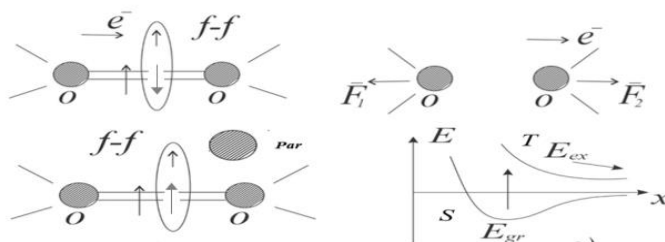


Рис.1. Схема f-f процесса приводящего к реакции $S \rightarrow T$ с последующим распадом молекулы при поглощении фотона.

На рис.1. видно, что в процессе flip-flip, приводящего к обмену спинами, в качестве катализатора могут участвовать два различных типа электронов: либо электрон, свободно пролетающий мимо инцидентной ковалентной связи О-О (атакованной фотоном), либо электрон, локализованный на близлежащем парамагнитном ионе. Во всех случаях вероятность процесса flip-flip оценивается в рамках теории возмущения второго порядка; это дает экспоненциально сильное нарастание вероятности процесса flip-flip при уменьшении расстояния от синглетной пары до электрона-катализатора.

II.1. Разрушение кислородного мостика радиационным воздействием.

Многие функционирующие на сегодняшний день лазеры построены на материалах с ионной связью, разновидностью которых являются лазеры на стеклах [6]. Стеклообразные кислородосодержащие материалы зачастую содержат в качестве элементов структуры так называемые “кислородные мостики” О-О (рис.1.). Особенность этих мостиков состоит в том, что оба кислорода связаны друг с другом только ковалентной связью. Большое количество исследований по радиационному воздействию на подобные объекты (см. [7-9]) приводят к выводу, что именно О-О мостики являются слабым звеном, накопление которых при работе приводит к деградации параметров лазера. С учетом появления идей спинового катализа эти общие соображения могут быть конкретизированы. Действительно, по схеме представленной на рис.1, можно предположить, что радиационное воздействие (напр., рентгеновское излучение или UV) может стимулировать процесс типа flip-flip, превращая синглет ковалентной связи в триплет, естественно, с участием третьего стороннего спина, принадлежащего либо к близлежащему парамагнитному иону, либо к быстрому электрону, рожденному в ионизационных процессах радиации. Здесь важно отметить, что образовавшийся триплет, расталкивая ионы кислорода, не всегда приводят к дефекту, а именно, в тех случаях, когда электронный уровень триплетного состояния, оказываясь в зоне проводимости, становится резонансным. Это приводит к возможности его срыва с локального состояния и перемещения по свободной зоне, так что ионы кислорода не успевают разойтись. В этом случае вероятность деструкции О-О мостика домножается на множитель $\eta = \exp(-\tau_+/\tau_e) \approx \exp(-\Delta E_r/\hbar\omega_D)$; здесь ΔE_r – ширина резонансного уровня, ω_D – дебаевская частота. Если учесть, что существует множество конструкции типа О-О мостика, то такой механизм может быть ответственен за деградацию в большом количестве ситуаций.

Одним из таких характерных и важных примеров является мостиковая структура с участием кислорода в ряде ВТСП материалах первого поколения, где кислород, расположенный между плоскостями, оказывается ответственным за механическую стабильность, а также электронные свойства материала, и разрушение мостика радиацией является важным механизмом деградации [7-9].

Необходимо отметить, что во многих работах по деградации лазерных и других материалов для понимания радиационных процессов предлагались те или иные трактовки. Интересна, например, ситуация подавления деградации некоторых лазеров с помощью легирования ионами хрома кристаллов скандиевых гранатов [9]. Вместе с тем, очевидно, что **универсальность** механизма деградации через спиновый катализ весьма привлекательна. В качестве дополнительного теста для его реализации можно было бы исследовать ситуацию, когда в структуру кислородного мостика входит изотоп, ядро которого имеет неспаренный спин, и такой вариант flip-flip с участием ядерного спина, в принципе, вполне реален [5].

II.2. Изменение локальной структуры водородной связи при радиационном воздействии. Водородная связь является одним из важнейших типов связей, обуславливающая

свойства объектов как в живой, так и неживой Природе [8]. Воздействие радиации многообразно действует на такие объекты, иногда грубо их разрушая, а иногда тонко модифицируя локальную структуру, а вместе с этим и свойства.

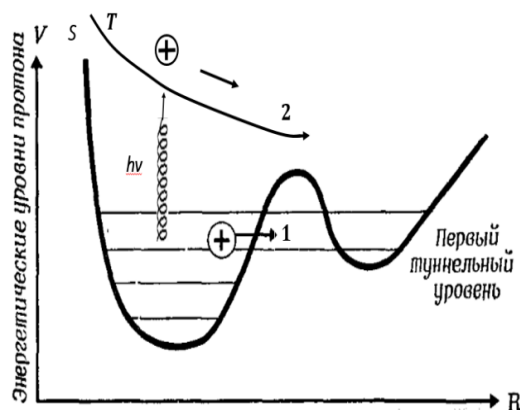


Рис. 2. Потенциальная функция (терм) для протона (водородная связь) во фрагменте ДНК: 1- туннельное перемещение в соседнее метастабильное состояние; 2-перемещение протона в результате поглощения фотона при реакции $S \rightarrow T$ (соблюдение правил спиновой симметрии обусловлено участием ядерного спина протона как спин-катализатора).

На рис.2. представлен фрагмент молекулярной структуры, обусловленной водородной связью, например, именно такова ситуация, реализующаяся в ДНК [10]. Обычно считается, что спонтанные мутации обусловлены тунелированием из более глубокой ямы в менее глубокую (Рис.2.). В случае же индуцированных мутаций (например, при воздействии света) реорганизация водородной связи происходит иначе: при поглощении фотона синглетная связь, путём переворота одного из спинов, превращается в триплетную, и водород атермически перемещается в соседнюю потенциальную яму (путь 2). Однако «простая» реакция $S \rightarrow T$ возможна лишь при участии третьего спина. Природа предусмотрела и эту ситуацию путем того, что третьим спином является спин протона, который, переворачиваясь, участвует в процессе flip-flip. Естественно, что и этот процесс является промежуточным через виртуальное состояние и описывается в рамках теории возмущения второго порядка. Небезынтересно отметить, что вполне возможны и спонтанные превращения водородной связи, в которых участвует спин протона, т.е. и здесь может найти применение спиновый катализ.

III.1. Концепция квантовой запутанности [11]. Понятие «квантовой запутанности», неожиданно возникшее (уже на фоне победного шествия квантовой механики!) в 1935 году в дискуссии А.Энштейна с соавторами, Э.Шрёдингером и Н.Бором, лишь только в наши дни стала обретать очертания углубленного понимания квантовой теории и её новых приложения (Нобелевская премия 2022года –А. Аспе, Д. Клаузер, А. Цайлингер). В результате появились, по крайней мере, три крупнейших новых направления, которым предназначено стать базовыми в XXI веке: квантовое материаловедение, квантовая информатика и квантовая телепортация [12]. Предельно кратко, суть квантовой запутанности может быть обозначена следующим образом. Если проанализировать распад сложного квантового объекта на некие его компоненты и изучить свойства этих компонентов - в смысле их обусловленности первичным сложным паттерном, то будет выяснено на сколько связанность этих элементов в первичном паттерне повлияла на их индивидуальные свойства после разделения. Как известно [13] в современной синергетике

и в Complexity имеется свойство – так называемая **эмерджентность**, которое указывает на величину «нового», которое превалирует над простой суммой исходного. А что будет, если все эти объекты обладают квантовой природой? Какова квантовая корреляция между исходными квантовыми свойствами и квантовостью результатов? Считается, что именно степень запутанности в исходном квантовом объекте и определяет уровень квантовой эмерджентности, т.е. совокупность квантовых свойств продуктов. Оказалось, что этот процесс может быть описан квантовой энтропией [11]. Глубокая проработка этой базовой идеи, в совокупности с принципом дополнительности Нильса Бора пока является достаточной для описания и анализа многих новых явлений, упомянутых выше. Ниже будет представлена попытка использования этой новой идеологии, т.е. квантовой запутанности, к процессу Оже-деструкции при ионизации различных материалов (собственно мы полагаем, что различия результата этого механизма деструкции для разных материалов может быть понята путём учёта идей запутанности).

III.2. Деструкция молекулярной системы при кулоновском взрыве.

Первичным продуктом радиационного воздействия часто бывает высокоэнергичное электронное возбуждение (например, плазмонное или К-ионизация атомов кристалла). Эти возбуждения всегда короткоживущие и, распадаясь, зачастую приводят к локальному положительному многозарядному состоянию (заряд $Z \gg 1$). Это кулоновски неустойчивое состояние решетки разрешается либо локальной деструкцией («кулоновский взрыв»), либо электронным «заливанием» (нейтрализацией) локального положительного заряда: ясно, что выбор этой альтернативы зависит от соотношения двух времен: времени разлета ионов (τ_+) и временем «заливания» (τ_e). Анализ показал [2], что вероятность деструкции σ_d при этом пропорциональна множителю $\exp(-\tau_+/\tau_e)$. τ_+ , почти стандартно $\sim 10^{-13}$ сек, тогда как τ_e крайне сильно зависит от природы облучаемого объекта (для металлов $\tau_e \approx 1/\omega_{pl} \sim 10^{-16}$ сек); для неметаллов τ_e варьируется в широком диапазоне 10^{-14} сек – 10^{-12} сек; понятно, что в металлах доминирует заливание (дефектов не образуется), а в неметаллах, во многих случаях, «заливание» не препятствует образованию дефектов. Показательна ситуация для Оже-деструкции (био-) полимеров, см. рис.3. [2].

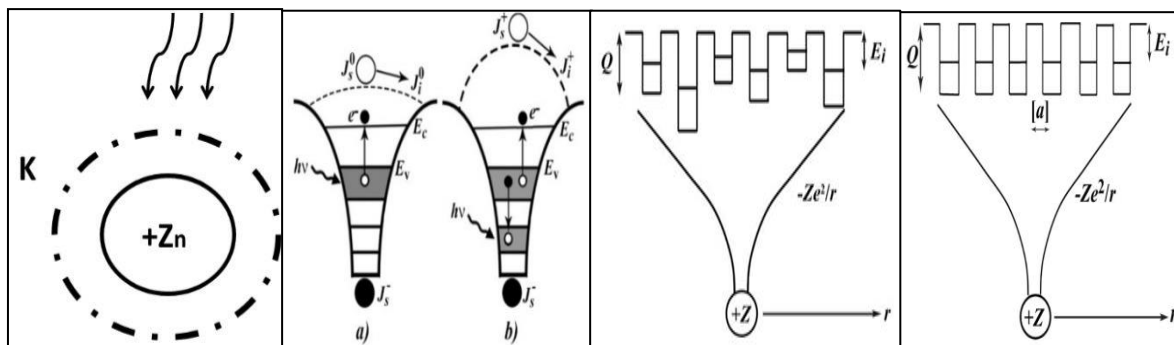


Рис.3. Трехстадийная схема Оже-дефектообразования в квазиодномерной полимерной цепи (слева направо: К-ионизация, локальная кулоновская неустойчивость, реакция среды на заряд в периодических и не периодических цепочках).

Малая величина τ_e в металлах обусловлена нейтрализацией плазмонами, когда все электроны участвуют когерентно; большая величина τ_e обусловлена некогерентной электронной нейтрализацией. В современных терминах об этом можно говорить, как о **квантовой запутанности** [11] – в металлах и в **квантовой незапутанности** – в цепочках типа Андерсона (крайний правый рисунок). Отсюда ясно, что при очень большом заряде (Z) некогерентная нейтрализация становится когерентной, т.е. запутанной, поскольку большой заряд, срывая электроны из неодинаковых ям, превращает их в каплю металла, но со своим малым плазмоном, который дает меньшую ω_{pl} , и посему для этого случая всё

равно $\tau_e > 10^{-16}$ сек. Важно отметить, что описанный эффект Оже-деструкции вполне реально реализуется как во всех полупроводниках [3,4], так и в разрушении некоторых полимеров (например, РНК вирусов, в том числе и SARS-2V) что оказалось эффективным методом лечения некоторых типов COVID-пневмонии [2,3].

Таким образом, в случае Оже-каскада с участием тяжелых атомов в неупорядоченной среде мы можем наблюдать удивительную ситуацию, когда несвязанные состояния превращаются в связанные, обеспечивающие проявление **запутанности**. Эта метаморфоза, по всей видимости, может быть адекватно описана как в рамках теории RPA [14], так и на основе идеи дефазировки отдельных электронов в атомном плазмоне [15].

IV. Заключение. В проблемах радиационной деградации, которая является важным аспектом всей РФКС, и которая сама в свою очередь является частью современной науки о веществе, вполне отчетливо отражаются все фундаментальные явления, в том числе и новые для общей физики, химии, биологии, математики, которые в настоящее время скомбинированы в концепции Complexity [16]. Поэтому не удивительно, что такие новые понятия, как **спиновая химия, квантовая запутанность и иерархическое строение объектов** (особенно при воздействии интенсивной радиации с широким энергетическим спектром [4]) органично входят в современные представления о воздействии радиации на вещество (поскольку явно содержат элементы сложности). Это идеология (Complexity) уже сейчас более чем успешна, и попытки правдоподобно трактовать целый ряд сложных радиационных эффектов без ее учета не соответствуют путям прогресса, а скорее всего имеют шанс стать информационным шумом.

Литература:

1. Б.Л.Оксенгендлер, С.Е.Максимов, В.Н.Никифоров, Н.Ю.Тураев. Синергетика процессов распыления поверхности полиатомными ионами //Поверхность.Рентгеновские,синхротронные и нейтронные исследования.2017. №10. С.86-89. DOI: 10.7868/S0207352817100134
2. B.L.Oksengendler, A.Kh.Ashirmetov, N.N.Turaeva, N.N.Nikiforova, S.X.Suleymanov, A.F.Zatsepin, F.A.Iskandarova. The features of Auger destruction in quasi-one-dimensional objects of inorganic and organic nature //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2022.V.512.P. 66–75
3. B.L.Oksengendler, A.F.Zatsepin, A.Kh.Ashirmetov, N.N.Nikiforova, Kh.B.Ashurov. On the Concept of “Complexity” in Radiation Physics //Journal of Surface Investigation. 2022.V.16(3).P. 364–373
4. B.L.Oksengendler, A.Kh.Ashirmetov, F.A.Iskandarova, A.F.Zatsepin, N.N.Nikiforova, S.Kh.Suleimanov, N.N.Turaeva. Interaction of Radiation with Hierarchical Structures. //Journal of Surface Investigation. 2023.V.17(1).P.31–42
5. К.М.Салихов. 10 лекций по спиновой химии. Казань: УНИПРЕСС. 2000. 152с.
6. Н.В.Карлов. Лекции по квантовой электронике. Москва: «Наука». 1983. 320с
7. Дефекты в материалах квантовой электроники. З.Т.Азаматов, П.А.Арсеньев, Х.С.Багдасаров и др., Ташкент. «Фан» 1991. 206с.
8. В.П.Мартовицкий. Межслоевые напряжения в купратных ВТСП р-типа. //Краткие сообщения по физике ФИАН. 2006. №5. С.3-10
9. М.Х.Ашуров. Спектроскопия центров окраски и радиационная стойкость тугоплавких оксидных кристаллов. Автореферат диссертации на соискание уч. степени д.ф.-м.н. Москва. 1989. 53с.
10. Е.С.Крячко. Водородная связь и днк: 66-летняя ретроспектива //Biophysicalbulletin. 2020.V.43.P.148-173
11. С.М.Алдошин, А.Н.Зенчук, Э.Б.Фельдман, М.А.Юрищев. //Успехи химии. 2012.Т.81(2).С.91-104
12. С.Я.Кишин. Квантовая информация. «УФН». 1999. Том 169. №5. 507-527с.
13. Е.Н.Князева, С.П.Курдюмов. Основание синергетики. Москва: «Книжный дом, Либроком» 2024. 264с.
14. Д.Пайнс. Элементарные возбуждения в твердых телах. Москва: «Мир». 1965. 382с.
15. Б.Л.Оксенгендлер. Об одном механизме распада плазмонов Структура и свойства облученных материалов. Ташкент: «Фан». 1975. С.124-127
16. П.Бак. Как работает Природа. Москва: «УРСС». 2013. 276 с..