

УДК 531.19:539.2:539.16

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИЕРАРХИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ

© 2023 г. Б. Л. Оксенгендлер^{a, b, c, *}, А. Х. Аширметов^d, Ф. А. Искандарова^d,
А. Ф. Зацепин^c, Н. Н. Никифорова^a, С. Х. Сулейманов^b, Н. Н. Тураева^e

^aИнститут ионно-плазменных и лазерных технологий
им. У.А. Арифова Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100125 Узбекистан

^bИнститут материаловедения Академии наук Республики Узбекистан,
Научно-производственного объединения “Физика-Солнце”, Ташкент, 100084 Узбекистан

^cФизико-технологический институт Уральского федерального университета,
Екатеринбург, 620078 Россия

^dЦентр развития нанотехнологии при НУУ им. М. Улугбека,
Ташкент, 100174 Узбекистан

^eDepartment of Biological Sciences, Webster University, Saint Louis, MO 63119 USA

*e-mail: oksengendlerbl@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

После доработки 14.07.2022 г.

Принята к публикации 14.07.2022 г.

Радиационная физика XXI в., комбинирующая особые физические свойства материалов и объектов (нанообъектов, фракталов и других) с сильной неравновесностью, демонстрирует множество необычных нелинейных эффектов и их трактовку. Это особенно проявляется в случае высокоинтенсивного облучения различной природы и широкого энергетического спектра. Учет пяти различных каналов передачи энергии от радиации к веществу (упругое рассеяние, ионизация, тепловыделение, упругие и ударные волны) делает труднообозримым число новых необычных комбинаций радиационного отклика, изучение которого на современном этапе, по-видимому, оказывается возможным с помощью концепции “сложность”. Среди различных характеристик облучаемых объектов особую роль играет иерархичность их структуры, которая принципиально важна для объектов как неживой, так и живой природы. Особенность включения в анализ радиационных эффектов объектов иерархической структуры приводит к новой ситуации – вовлечению идей кибернетики в радиационную физику. Здесь возникают вопросы нового типа, касающиеся взаимосвязи радиации и информации, в частности, влияния всего многообразия параметров радиации (энергии, интенсивности, дозы) на передачу информации с нижней платформы иерархических структур на более высокие и сжатие ее при этом. Решение этих проблем требует использования как новых теоретических подходов, так и модификации традиционных схем по отношению к элементарным актам атомных перестроек, типа кинетики и подходов к выявлению механизмов радиационных эффектов. Этот спектр вопросов сформулирован, и получено определенное решение применительно к объектам неживой и живой природы.

Ключевые слова: “сложность”, радиационные эффекты, иерархические структуры, нанообъекты, фракталы, трофические цепи дефектов, мутации, радиационная тряска.

DOI: 10.31857/S1028096023010193, **EDN:** BLWCHR

ВВЕДЕНИЕ

С начала XXI века, наследуя общие тенденции развития естественных наук, радиационная физика твердого тела превратилась в радиационную физику конденсированного состояния [1–3]. Это превращение, проявившееся по-разному в различных областях радиационной физики, тем не менее имело общие свойства. Объектами исследования становились все более сложные системы и материалы, для которых свойства структуры

оказались более важными, нежели их физико-химия. Наиболее часто такие прорывные результаты, как “вторжение” в новые области, были связаны с появлением облучающих установок нового типа. Решающими оказались необычные эффекты, которые проявлялись в ситуациях сильного отклонения от равновесия и радиации повышенной интенсивности. На этой основе сначала сложилась идеология радиационной синергетики, которая впоследствии расширилась за счет смыка-



Рис. 1. Схема концепции “Сложность”.

ния с идеями “сложности” [4–7] из других областей естественных и математических наук.

Следующий важный шаг был сделан П. Бакком [8], который, анализируя явления из самых разных областей, высказал гипотезу, что абсолютно все “сложные” результаты могут быть систематизированы по трем парадигмам: самоорганизация, динамический хаос, самоорганизованная критичность. Суммируя результаты этого типа, но применительно к радиации [9–21], по-видимому, можно предложить обобщающую схему для “радиационной сложности” (рис. 1).

Как известно, главный метод радиационной физики конденсированного состояния – “заброс” вещества в термически недостижимые состояния, гарантирующие новые свойства материалов. Как показывает анализ на основе “сложности” [7–9], особенно много новых ситуаций проявляется в следующих условиях: при большой плотности энерговыделения даже в одном элементарном акте атомных перестроек всех типов локально и одновременно реализуется комбинация различных каналов передачи энергии веществу (упругое рассеяние, ионизация, тепло, упругие волны и ударная волна); нелинейность их взаимодействия особенно рельефно достигается в объектах, в которых локально проявляется сразу несколько сложных свойств среды; когда сочетаются и сложность среды, и многофакторность радиационного воздействия.

В этом контексте, обращаясь к левой колонке перечня объектов с особенностями структуры на рис. 1, необходимо сказать, что первые четыре (“нано”, “фракталы”, “комбинированная малая размерность”, “хиральность”) уже были в определенной степени изучены с позиции “радиационной сложности” [10–21]. В гораздо меньшей степени с позиции “радиационной сложности” изучена роль иерархии в материалах и приборах на их основе, что в принципе удивительно, поскольку еще с 20-х годов прошлого века рассматривали радиационные процессы в сложных иерархических структурах, но биологической природы [22, 23].

Однако анализ радиационно-биологических работ столетней давности был чисто феноменологическим и базировался на концепции “попадания и мишени” (Блау, Альтенбургер, Краутер, Ли, Циммер, Тимофеев-Ресовский). Таким образом, микроскопические представления в этой области до сих пор весьма актуальны. Вместе с тем для быстрейшего успеха развития представлений о радиационных эффектах в иерархических структурах необходим оптимальный подбор типов радиации и его характеристик. Качественные соображения наводят на мысль, что здесь опять должны быть синергетические условия (сильная нелинейность + неравновесность), реализуемые при таком облучении, когда множественность платформ иерархических систем (их индивидуальность) проявится особенно рельефно. Полагаем, что подобная радиация уже есть, и она характеризуется высокой интенсивностью и широким энергетическим спектром.

В этой связи целью настоящей работы был анализ базовых механизмов воздействия радиации различных типов на объекты с иерархическим строением, модификация общепринятых в радиационной физике твердого тела подходов к анализу, а также демонстрация действия предлагаемой теоретической схемы на ряде процессов радиационной физики, имеющих значение как в фундаментальной, так и в прикладной областях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Обращаясь к рис. 1, опишем кратко свойства объектов с характеристиками, перечисленными выше (“нано”, “фрактальность”, “малая размерность”, “хиральность” и “иерархичность”), уделив внимание основным особенностям их реакции на актуальные радиационные воздействия.

Нано. Базовым свойством наночастиц является сравнимое число состояний на их поверхности и в объеме. Для наночастиц с фрактальной поверхностью критический размер частицы, с которого начинается “нано”, возрастает: $R^* = 3\Delta\gamma(D_f)$, где Δ – ширина приповерхностной области (его “кожура”), D_f – фрактальная размерность поверхности. При выраженной фрактальности $\gamma(D_f) \gg 1$, тогда как для обычной гладкой поверхности $\gamma(D_f) \rightarrow 1$ [15].

Второе свойство, характерное для наночастиц, – это койнфайнмент их элементарных возбуждений. В случае фрактальности оно приводит к особой важности граничных условий, а также к модификации плотности числа состояний как на поверхности, так и в объеме [15].

Фрактальность. Это понятие представляет собой свойства скрытого порядка в кажущемся полном беспорядке объекта. Это свойство проявляют

Таблица 1. Доминирующие каналы передачи энергии излучения материалам

Факторы воздействия	Радиация						
	свет	рентген	γ -излучение	пучок электронов	энергичные ионы	осколки деления	нейтрон
Упругое смещение			x	x	x		x
Ионизация	x	x	x	x	x	x	
Высвобождение тепла	x			x	x	x	x
Упругие волны			x		x	x	x
Ударные волны					x	x	x

слоистые материалы, материалы с порами, вплоть до лавинных процессов особых типов, природа которых связана с самоорганизованной критичностью [8]. Кроме того, фрактальность является главной причиной возникновения новых свойств на границах раздела, в частности, кривизна границ приводит к смещению локальных электронных состояний. Особую роль фрактальность играет в объектах живой природы, эволюция которых насчитывает миллионы лет, и имеется ряд удачных попыток использования этих аналогий в современных технологиях [15].

Объекты малой размерности. Особую значимость в современном материаловедении имеют квазиодномерные цепи и волокна, а также совершенно новые объекты, составленные из частей с различной топологической размерностью [8, 16]. Их удивительные свойства проявляются при близких соотношениях чисел состояний в различных частях этого комбинированного объекта, в котором сочетаются целостность с локальными флуктуациями [8, 9].

Хиральность. Это особый тип зеркальной симметрии, характерный для объектов неживой природы, но с отдельными элементами живой природы, в частности, на границах доменов [24–27].

Иерархичность. Это особый тип некристаллических систем, у которых проявляется каскад масштабирования элементов. Особо следует отметить уже реализуемые в настоящее время случаи, когда перечисленные выше пять структурных характеристик комбинируются, открывая такие новые свойства, как нанофракталы, нанохиральность, иерархические структуры с фрактальными платформами и другие [26].

В случае же протекания в этих объектах сильно неравновесных процессов проявляется ряд совершенно особых состояний, объединенных понятием “синергетика”, и для таких объектов свойства их структуры означают больше, чем их физико-химия [19–21, 25–27].

Общая методология радиационной физики

Хорошо развитая к настоящему времени теоретическая часть изучения радиационных эффектов состоит из следующих разделов [1–3]: кроссвордная сеть – виды радиации/канал передачи энергии; базовые элементарные процессы атомных перестроек в конденсированных средах при радиационном воздействии; кинетический анализ трехстадийного радиационного отклика вещества; выявление механизма радиационного эффекта и корректности теории (схема дуги Эйнштейна–Соловина). Все эти четыре позиции в изучаемой проблематике должны претерпеть определенные изменения для ее адекватного анализа.

Кроссвордная сеть: виды радиации/каналы передачи энергии. Из табл. 1 видно, что многие типы радиации способны передавать среде энергию несколькими путями (с соответствующими парциальными вероятностями). Это относится как к электромагнитному облучению (свет), так и электронному.

Базовые элементарные процессы атомных перестроек в конденсированных средах при радиационном воздействии. Если говорить об основном предмете нашего интереса – воздействии концентрированного излучения широкого спектра, необходимо выделить ионизацию и высвобождение тепла как основных каналов передачи энергии (табл. 2). Другое важное заключение: и ионизация, и тепловыделение при облучении концентрированным светом и интенсивной электронным потоком могут оказаться эффективными для фактически всех типов атомных перестроек, что расширяет диапазон возможных радиационных эффектов.

Кинетический анализ трехстадийного радиационного отклика среды. Обычная методология радиационной физики конденсированного состояния следующая.

Схема Стародубцева–Платцмана [28]: физическая стадия – генерация и релаксация первичных возбуждений; химическая стадия – диффузия первичных возбуждений с последующими

Таблица 2. Основные элементарные процессы атомных реконструкций в конденсированных средах

Базовые атомные процессы	Каналы передачи энергии				
	упругие смещения	ионизация	тепловыделение	упругие волны	ударные волны
ОРД	х	х	х	х	х
РСД	х	х	х	х	х
КХРСИ		х	х	х	х
ДГРСИ		х	х		х
РСР	х		х		х

ОРД – образование радиационных дефектов; РСД – радиационно-симулированная диффузия; КХРСИ – квазихимические реакции, стимулированные излучением; ДГРСИ – движение границ раздела, стимулированное излучением; РСР – радиационно-стимулированное разупорядочение.

квазихимическими реакциями; стоки → макро-эффекты.

Кинетический анализ (типа Динса–Дамаска) [29]:

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_i + K_{ij}N_iN_j - 4\pi R_i D_i N_s. \quad (1)$$

В этом выражении N_i – концентрация дефектов i -го типа, N_j – концентрация дефектов j -го типа, λ_i – скорость генерации радиацией дефектов i -го типа, K_{ij} – константа квазихимической реакции между дефектами i -го и j -го типов, N_s – концентрация стоков, R_i – радиус захвата стоком i -го дефекта, D_i – коэффициент диффузии i -го компонента, движущегося к стоку [3].

Этот вид кинетического уравнения фактически максимально прост, но тем не менее чрезвычайно полезен. Если же есть необходимость учесть флуктуации концентрации дефектов, то такой выход из “приближения в среднем” возможен с помощью мастер-уравнения [4], причем здесь особую роль могут играть межплатформенные взаимодействия (путем диффузии упругих и ударных волн).

Выявление механизма радиационного эффекта

Выявление механизма радиационного эффекта – это важнейший аспект всего анализа. В задачах радиационной физики конденсированного состояния решение этой проблемы оказывается многовариантным, и зачастую экспериментаторы этим пренебрегают, совершая неоправданный “логический прыжок” от эксперимента к механизму, минуя построение модели. Между тем крупнейшие мировые авторитеты требуют целостного подхода. В частности, наиболее оправдавшим себя подходом является так называемая “дуга Эйнштейна–Соловина” [30], согласно которому механизм явления может быть лишь продуктом теории, удовлетворяющей принципам “внутреннего совершенства” и “внешнего оправдания”. Вся эта схема оказалась чрезвычайно по-

лезной именно в современной радиационной физике, богатой выбором гипотетических механизмов, и этот вывод усиливается в изучаемых усложненных ситуациях [30].

Особые усложнения для применения методологической схемы радиационной физики конденсированного состояния к новым типам объектов

В сжатой форме в настоящий момент времени можно обозначить выход методологии “сложности” за привычные, стандартные границы: наносистемы – комбинаторная кинетика (учитывает химические флуктуации); синергетика – “автокатализатор”, “нелинейная реакция + диффузия”, открытые “проточные” системы; иерархические структуры; фрактальность – все параметры λ , K_{ij} , R_i , D_i – “хаотический” набор, содержащий определенный порядок; хиральные системы – из состава K_{ij} есть зануляющиеся величины; иерархичность системы – усложнение традиционной кинетики, стохастические дифференциальные уравнения. Отметим, что иерархичность системы пока наименее исследована.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОЙ РАДИАЦИИ ШИРОКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

В этом разделе будут рассмотрены некоторые особенности радиационного воздействия, характерные для интенсивной радиации широкого энергетического спектра, генерируемой такими аппаратами, как синхротрон, большая солнечная печь и высокопоточный электронный импульсный ускоритель.

Синхротрон

Синхротронное излучение (СИ) представляет собой тормозное электромагнитное излучение, генерируемое релятивистскими электронами, ко-

гда постоянное магнитное поле заставляет их двигаться по кругу. Оно характеризуется рядом важнейших показателей [31]. СИ ультрарелятивистских электронов сосредоточено в плоскости своей орбиты вращения и характеризуется “планкоподобным” энергетическим спектром излучаемых фотонов в широком диапазоне – от ИК до жесткого рентгена. Фактически все характеристики СИ зависят от фактора Лоренца ($\gamma = E/m_0c^2$), и максимальная частота электромагнитного спектра выражается через радиус вращения электрона в магнитном поле $\omega_c = (C/2\pi R)\gamma^3$, что соответствует критической длине волны излучения $\lambda_c = 0.4\pi R/3\gamma^3$. Другие характерные величины: освещенность – поток излучения, приходящийся на единицу площади; мощность пучка (интеграл по всему спектру и вертикальному углу), излучаемая в горизонтальный угол ($W = 14E^4i/R$, где E – энергия излучающего электрона, i – электронный ток); полный поток фотонов всего диапазона энергии, излучаемый в горизонтальный угол ($N = 1.3 \times 10^{17} Ei$ [фотон/с · мрад]); угловая расходимость (для критической волны) $\Psi(\lambda_c) = 0.82/E$; поляризационные характеристики СИ, выражающиеся через вертикальные и горизонтальные интенсивности ($R_{\text{лин}}$); временные показатели СИ, обусловленные типом устройства (обычно 50 Гц); ондуляторное излучение, повышающее все энергетические показатели на несколько порядков. Все характеристики СИ чрезвычайно удобны для спектральных исследований конденсированных сред любой природы. При изучении радиационных эффектов СИ отводится совершенно особая роль. Во-первых, генерация электронных возбуждений определенного типа, энергия которых, “впрыскиваясь” в атомную подсистему, реализует различные типы атомных перестроек. Обычно для этой цели специально отфильтровывают моноэнергетический пучок, что позволяет с большой точностью анализировать фактически все стадии радиационного процесса. Естественно, что для достижения этой цели нет специальной необходимости в очень высокой интенсивности радиации, поскольку здесь более важным является длительность импульса СИ. Наличие же волн широкого спектра открывает совершенно новые возможности. Действительно, в условиях интенсивного СИ можно поставить задачу о реализации такой флуктуации концентрации фотонов, когда два из них поглощаются в очень малой локальной области. При этом можно изучить двухчастичные процессы ионизации – как одинаковых фотонов (из одной и той же области спектра), так и из различных областей спектра. Последнее состояние крайне интересно и систематически не обсуждалось (имен-

но оно чрезвычайно важно для иерархических структур).

Большая солнечная печь

Большая солнечная печь генерирует солнечную радиацию, которая представляет собой электромагнитное излучение в широкой области длин волн – от инфракрасного диапазона до далекого ультрафиолета (солнечный спектр). Совершенно особую роль играют большая интенсивность этой радиации и ее некогерентность. Общая тепловая мощность солнечной печи в фокальном пятне достигает до 1000 кВт при потоке солнечной радиации 950 Вт/см², отражение зеркал большой солнечной печи должно быть не менее 70%. При этих условиях предельная плотность потока солнечного излучения в центре фокального пятна будет порядка 1000 Вт/см², а рабочая плотность энергии составляет от 300 до 700 Вт/см² в зависимости от метеоданных и состояния зеркал. Все эти обстоятельства дают возможность ввести большую плотность энергии в объекты облучения, что реализуется в итоге в ионизации химических связей (видимый свет и УФ), возбуждении колебательных мод ИК-диапазона в решетке, и что по прошествии характерного времени перераспределения фотонов превращается в тепло. Избыточный поток тепла может и не быть однородным, а создавать градиент температуры [32]. В этом случае очень интересен вопрос о перекрестных и одно-временных воздействиях в локальной области – фотонов из разных диапазонов энергии. Для оценки этой возможности, а точнее ее вероятности, можно использовать вполне регулярный аппарат теоретической физики – метод корреляторов [33], но можно поступить проще и использовать представление о вероятности ближайшего соседа, модифицируя ее должным образом. Рассчитаем это для двух факторов электромагнитного воздействия – из ИК-диапазона (возбуждение колебаний атомов) и видимого диапазона (возбуждение электронной подсистемы – ионизация). Обозначим стационарную концентрацию первых и вторых через M_1 и M_2 . Пусть $M_1 \gg M_2$, что обусловлено различием в вероятностях их генерации. Пусть в начале координат генерируется возбуждение типа M_2 (т.е. здесь поглощается фотон большой энергии). Вероятность того, что на расстоянии a обязательно будет генерироваться возбуждение типа M_1 , оценивается как:

$$\theta \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{3}\right)a^3 M_1\right]. \quad (2)$$

Эта ситуация аналогична тому, что происходит в большой солнечной печи.

Предположим, что находящееся в начале координат возбуждение живет дольше, чем возбужде-

ние другого типа. Запишем это как $M_1 = M_1^0 \sigma_1 I_1 \tau_1$, где σ_1 – сечение образования возбуждений типа M_1 , τ_1 – время жизни возбуждения, M_1^0 – концентрация всех исходных элементов типа M_1 , I_1 – доля интенсивности падающей радиации, которая рождает возбуждения типа M_1 . Из формулы (2) видно, что с увеличением произведения $a^3 I_1$ вероятность θ перекрестного возбуждения быстро приближается к единице.

Другим важным обстоятельством является коаксиальная симметрия потока тепла относительно центра его выделения. Это приводит к круговым поясам, где кристаллизация, а также все термические, химические процессы реализуются кругами и по-разному, что является проявлением самоорганизации. Имеются вполне конкретные эксперименты, которые демонстрируют оба рассмотренных выше эффекта [32, 34]. Некоторые аналогии в отношении этих эффектов наблюдаются и при обычном интенсивном лазерном воздействии [35].

Сильноточные электронные импульсные ускорители

Аппараты типа сильноточного электронного импульсного ускорителя [9], работающие на основе эффектов взрывной эмиссии электронов в диоде, позволяют получать потоки электронов с мощностью до 10^{13} Вт, и у этого способа создания корпускулярной радиации имеется ряд особенностей, интересных для радиационной физики. Энергия электронов в пучке может быть отнесена к области подпороговой радиации (300–500 кэВ). Длительность импульса при взрывной эмиссии 10^{-7} с, что достаточно для переброса энергии возбужденной электронно-дырочной плазмы в атомную подсистему. Высокие мощности в пучке приводят к атомным макроэффектам, вплоть до хрупкого разрушения. Более того, комплекс свойств, вызывающих необычные радиационные эффекты, был детально исследован учеными из Томска [9]. В частности, можно выделить такие явления, как фундаментальная плазменная люминесценция, высокоэнергетическая проводимость облученного кристалла, хрупкое разрушение ионных кристаллов. Следует отметить попытки интерпретировать обнаруженные эффекты на основе унифицированного подхода к возбужденной электронно-дырочной плазме различной плотности, включая ряд идей о диссипативных структурах [9], для облучателей типа сильноточного электронного импульсного ускорителя и всех базовых факторов воздействия.

Из всех базовых факторов воздействия наиболее общим является ионизация (или, как говорят, генерация экситонов). Анализ типов радиацион-

ного воздействия в этих случаях удобно вести как в контексте феноменологии, так и в контексте микроскопии. Феноменология дает возможность общего прогноза “судьбы” материала при рождении в нем электронно-дырочной плазмы некоторой плотности – в зависимости от концентрации экситонов. Можно получить универсальную шкалу плотности возбуждения для данного материала, если концентрацию экситонов измерять в единицах куба его обратного радиуса [9]. Тогда в диапазоне от 10^{-6} до величин больше единицы плазма изменяется от идеальной до сильно сжатой, так что для разных участков шкалы следует ожидать совершенно различных эффектов переброса энергии электронно-дырочной плазмы в решетку.

Рассматривая с единой точки зрения радиационные эффекты, создаваемые СИ, большой солнечной печью и сильноточным электронным импульсным ускорителем, можно прийти к выводу, что при воздействии такой радиации на различные твердые тела проявляются эффекты, которые можно было бы отнести к явлениям релаксации электронных возбуждений, приводящих к макроскопическим атомным перестройкам, т.е. явлениям, которые интересно было бы обсуждать с позиции иерархических структур.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Переходя к основной теме, особенно интересно обсудить радиационные эффекты в средах, получивших название “иерархических”. И, как будет показано, именно радиация, создаваемая СИ, большой солнечной печью и сильноточным электронным импульсным ускорителем, должна проявлять отличительные свойства в подобных иерархических объектах. Структура иерархических объектов (платформ) представлена на рис. 2.

В отношении каждой иерархической структуры составляют алгоритм, основные принципы которого следующие [5]: схема моделирует систему как целое; каждый иерархический уровень характеризуется структурой и сложностью, под которой понимается степень кооперативности функциональных элементов; каждый иерархический уровень взаимодействует с соседними уровнями (верхним и нижним), а также с окружающей средой. На каждом уровне имеет место динамическое и стохастическое взаимодействие; основной принцип – последовательная передача информации снизу-вверх, сопровождающаяся ее уплотнением. Последнее осуществляется образованием нового элемента на верхнем уровне путем передачи с нижнего после достижения там кооперативного свойства; эволюция всей иерархической системы определяется характером накопления

информации на зиккурате, моделирующем структуру.

Таким образом, иерархические системы, построенные по законам синергетики и кибернетики, моделируют широкий класс реальных ситуаций как в живой, так и неживой природе. А как же рождается и эволюционирует (подавляется или усиливается) поток уплотняющейся информации (при движении снизу вверх) при воздействии радиации?

Рождение нового уровня в иерархической структуре при воздействии радиации

На этот вопрос (наиболее важный для иерархических структур) можно получить ответ несколькими путями – подходом Ито–Стратановича [36] или более простым методом Николиса [5]. Общее выражение для динамики каждой переменной нижнего уровня запишется в виде:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_j, t) + \omega_i(t) + \sum_{j=1}^K \int_0^t x_j(t') \omega_{ij}(t'+t) dt'. \quad (3)$$

Здесь $\omega_i(t)$ – флуктуации, индуцированные окружающей средой, а третий член в правой части описывает влияние оператора кросс-корреляции стохастического взаимодействия всех элементов между собой на иерархическом уровне X , K – число элементов на рассматриваемом иерархическом уровне. Первый член в правой части формулы (3) описывает обычную динамику между всеми K -компонентами рассматриваемого иерархического уровня.

Применительно к рождению нового уровня с более кратким обозначением на нем сжатой информации проводится комбинирование K штук элементов до тех пор, пока их фазы не сложатся когерентно, что и будет означать рождение нового состояния на более высоком уровне. Радиационная же физика здесь выступает как чрезвычайно действенный фактор (через флуктуации среды и изменения в кросс-корреляции и числа K , что означает либо генерацию, либо отжиг элементов X). По-видимому, именно так это реализуется на синхротроне, в большой солнечной печи и сильноточном электронном импульсном ускорителе, выдающих квазинезависимые факторы воздействия (табл. 1, 2), когда каждая часть электромагнитного и электронного спектра предназначена для выполнения своей задачи на определенном иерархическом уровне. Суммированные радиационные отклики на каждом иерархическом уровне (платформе) формируют общий радиационный эффект для всего объекта.

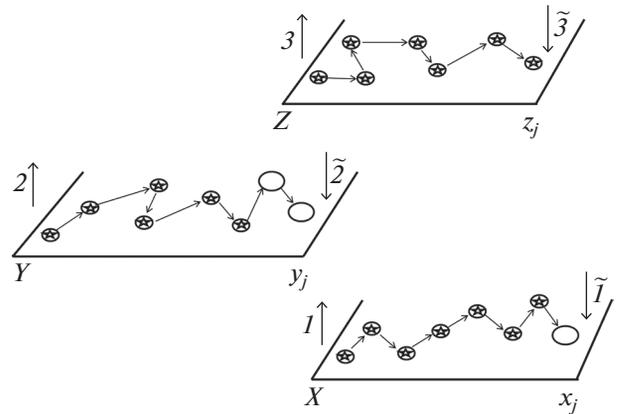


Рис. 2. Последовательные уровни X, Y, Z самоорганизующейся иерархической системы со степенями свободы $\{x_j\}, \{y_j\}, \{z_j\}$ соответственно; 1, 2, 3 – передача информации; $\tilde{1}, \tilde{2}, \tilde{3}$ – обратная связь (управление) [5].

ПРИМЕРЫ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ НЕЖИВОЙ И ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

Проблема рождения радиацией из хаоса новых когерентных состояний (т.е. иерархического уровня), конечно, не проста и требует разработки специального метода анализа. Однако существует немало других, менее фундаментальных проблем, которые важны для анализа конкретных эффектов. Возникает вопрос: можно ли модифицировать устоявшиеся апробированные методы, достаточные для адекватного использования в соответствующих разделах радиационной физики иерархических структур? Такой возможный подход изложен ниже на примерах проявления механизма “радиационной тряски”.

Трофические цепи дефектов в условиях радиационной тряски

В различные годы было выполнено несколько экспериментов [37–39], в которых были обнаружены осцилляции различных измеряемых величин – не в пространстве, не во времени, и не в пространстве–времени (стандартные для синергетики [4]), а другого типа – при монотонном изменении некоего параметра, отражающего введение энергии (как радиационным, так и температурным путем [38, 39]). При поиске решения причин этих удивительных осцилляций было обращено внимание на трофические цепи живых организмов, влияние на которые различных концентраций химикатов приводило к осцилляциям урожая (когда химикаты были удобрением). Подобные процессы, характерные для трофических живых цепей, были аналогичны поведению кристаллов с большим количеством дефектов [38] и накоплению числа зародышей адатомов при воз-

действию ионного облучения на некоторые виды щелочно-галлоидных кристаллов [39]. Первая математическая модель, названная “трофической цепью дефектов”, была построена в [38]. Дальнейшее развитие этой идеи перекочевало в радиационную физику поверхности гораздо позднее [40]. В качестве наиболее глубокого экспериментального исследования в этой области следует назвать [39], где были обнаружены осцилляции числа островков, образуемых атомами золота на поверхности кристалла NaCl при увеличении плотности потока ионов Ag^+ с энергией 500–1750 эВ, облучающих поверхность твердого тела. Предполагали, что при воздействии радиации рождаются (по “упругому” и электронному механизмам) F -центры и реализуется стряхивающее действие, оказываемое на атомы упругой волной, которая генерируется вдоль поверхности твердого тела при вхождении туда иона Ag^+ . Суть эффектов состоит именно в появлении не одного, а нескольких отчетливых пиков. Поэтому идея трофической цепи дефектов оказалась естественной базой для теоретического анализа этого эффекта. Будем исходить из следующей картины. Пусть энергичные ионы, влетая в твердое тело, генерируют в его объеме электроны и дырки. Дырки при автолокализации образуют F -центры. В свою очередь, F -центры, захватывая дырки, образуют M -центры. Они, также захватывая дырки, создают R -центры. Каждый из дефектов этих типов (F -, M -, R -центры) может захватывать атомы, начиная тем самым процесс зародышеобразования островков золота. Однако в самый начальный момент атомы, локализованные на F -, M -, R -центрах, могут быть сброшены радиационной тряской с поверхности упругой волны [40–42], генерированной теми же “горячими” ионами [37, 41].

Поскольку степень связанности первичных атомов с F -, M - и R -центрами различна, наряду с временной иерархией образования этих центров (сначала образуются F -центры, из них M -центры, а из них уже R -центры) имеется и иерархия порогов стряхивания атомов с этих центров (легче всего атомы стряхиваются с F -центров, большим энергетическим порогом стряхивания обладают атомы на M -центрах, еще большим энергетическим порогом стряхивания атомов характеризуются R -центры). Эта двойная иерархия процессов рождения и гибели центров и является основой трофической цепи дефектов, что отражено в кинетических уравнениях, описывающих изложенную последовательность процессов:

$$\frac{dN_1}{dt} = (K_{01}h + \lambda) N_0 - K_{12}hN_1 - K_1N_1, \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = K_{12}hN_1 - K_{23}hN_2 - K_2N_2, \quad (5)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = K_{23}hN_2 - K_{34}hN_3 - K_3N_3. \quad (6)$$

Здесь λ – эффективность введения F -центров за счет упругих смещений при рассеянии ионов; N_1 , N_2 , N_3 – концентрации F -, M - и R -центров соответственно; K_1 , K_2 , K_3 – константы реакции, согласно которым F -, M - и R -центры “уходят из игры” за счет создания на них зародышей золота, h – концентрация дырок, N_0 – концентрация атомов галоида на поверхности, K_{ij} – константы трофических реакций взаимодействия дырок с дефектами.

Обращает на себя внимание структура этих уравнений, где в правой части фигурируют изменяющиеся концентрации лишь соседних компонентов в обсуждаемой цепи дефектов (F -, M - и R -центров). Вместе с тем интересен и пример взаимодействия F - и R -центров, минуя M -центры. Такой случай отразился бы добавлением в первое и третье уравнение членов типа $K_{13}N_1N_3$. Это более сложная трофическая цепь дефектов, и ее легко можно было бы проанализировать, если поначалу считать взаимодействие N_1 и N_3 пренебрежимо малым. Однако, как выяснится ниже, появление искомым осцилляций зародышей золота можно получить и в более простой модели, пренебрегая в уравнениях (4) и (6) членами $K_{13}N_1N_3$. Итак, в стационарных условиях ($\dot{N}_1 = \dot{N}_2 = \dot{N}_3 = 0$) и при существенной неравновесности для концентрации зародышей получим:

$$N_{\text{зар}} = \sum_{i=1}^3 K_i W_i N_i. \quad (7)$$

Здесь W_i – вероятность того, что, несмотря на существование радиационной тряски, первичные адатомы не будут сброшены с i -го центра.

Процесс радиационной тряски можно исследовать двояко – на основе представлений, что облучение возбуждает целое поле фононов (причем для каждого золотого зародыша имеется свой порог возбуждения, с которого начинается стряхивание), и микроскопически – путем модельных представлений о стряхивании атома золота с центра при использовании представления о прохождении ударной (упругой) волны через вещество.

В первом варианте считаем процесс попадания ионов в площадку σ пуассоновским и получим:

$$W_i = 1 - \sum_{j=a_i}^{\infty} \exp(-\gamma) \gamma^j / a_j! \quad (8)$$

Проанализируем теперь полученную зависимость

$$N_{\text{зар}}(I) = \sum_{i=1}^3 K_i W_i(I) N_i(I), \quad (9)$$

имея в виду, что $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$ (иерархия порогов). Ограничиваясь в сумме по j при вычислении W лишь первым членом (что возможно, так как $\gamma < 1$), получим:

$$W_i = 1 - \exp(-\sigma\tau I)(\sigma\tau I)^{\alpha_j}/a_j! \quad (10)$$

Учтем, что концентрация генерируемых радиацией дырок пропорциональна интенсивности облучения: $h = \beta I$ (β симбатно энергии ионов, например, при $\beta \sim \sqrt{E}$ [6]). Теперь легко увидеть, какова структура зависимостей $N_i(I)$, $W_i(I)$ ($i = 1, 2, 3$) и $\sum_{i=1}^3 W_i(I) N_i(I)$ (рис. 3).

Как видно из рис. 3в, г, полученные осцилляции величин $N_{\text{зар}}(I)$ неплохо согласуются с экспериментом. Важно отметить, что в условиях превалирования подпороговой генерации F -центров ($K_{01}h > \lambda$) и эффективно протекающих реакций “трофической связи” ($K_{ij}h > K_i$) значения максимумов в функции $N_{\text{зар}}(I)$ слабо зависят от энергии облучающих ионов (формулы (2), (4), (3)), что также согласуется с экспериментом [39]. В исследованиях [38] была осуществлена попытка на основе модельных представлений понять “микроскопику” срыва адатома при радиационной тряске. Не останавливаясь на деталях [41–43], делаем вывод, что таким образом удастся даже получить соотношение между максимумом и минимумом кривой интенсивности в нужном порядке, соответствующем эксперименту (рис. 3г) [39].

Радиационная тряска как возможный механизм подавления предмутации

Среди различных современных нанотехнологий совершенно особая роль отводится подходам радиационной физики. Это обусловлено нетривиальными обстоятельствами: именно с помощью свойств радиации возможен селективный выбор локального воздействия на изучаемый объект, причем только радиация позволяет дозированно выделять энергию на различных уровнях иерархической системы. В полной мере это относится к нанобиомедицине, в том числе и к очень широкому перечню задач, связанных с мутациями [44–46].

Одним из таких важных вопросов является проблема радиационно-индуцированных мутаций [46]. Основываясь на достижениях молекулярной биологии, обычно за исходные позиции берут механизмы Левдина или Крика–Уотсона [23], причем в обоих случаях первичной стадией мутационных перестроек является создание так называемых предмутационных таутомерных форм, что в конечном итоге сводится к переброске атомов водорода из регулярных позиций между нуклеотидными основаниями в другие позиции, которые по энергии выше, чем исходные (регуляр-

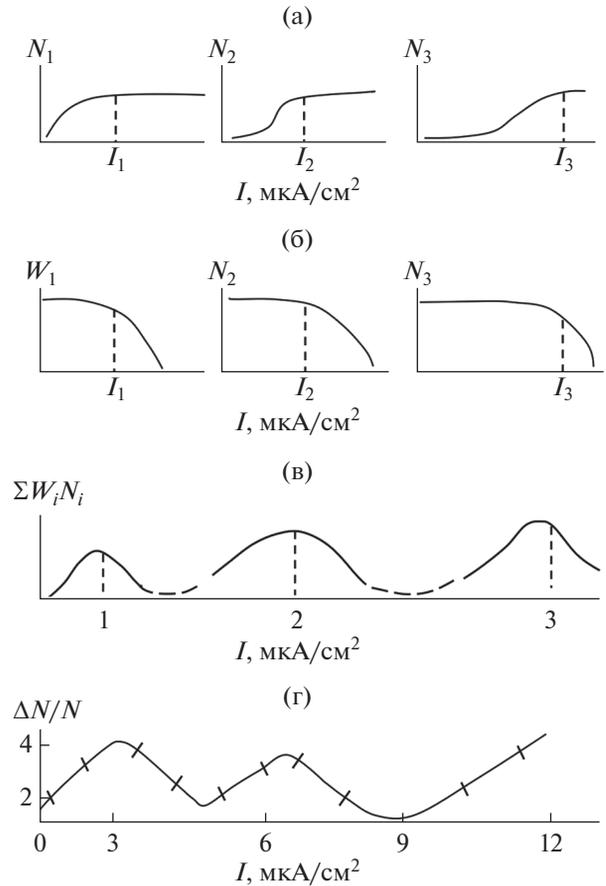


Рис. 3. Зависимость от интенсивности ионного облучения I : концентрации различных дефектов N_i ($i = 1, 2, 3$) (а); вероятностей W_i адатома остаться на дефектах i -го типа ($i = 1, 2, 3$) в условиях радиационной тряски (б) и полной концентрации островков-зародышей $\sum W_i N_i$ (в) [41]; избыточной концентрации островков зародышей атомов золота на поверхности кристалла NaCl в эксперименте [39] (г).

ные). Суммируя, можно сказать, что нормальные формы соответствуют стабильным состояниям, а таутомерные – метастабильным. Таким образом, генерирование мутаций радиационным воздействием на первой исходной стадии означает перевод (возбуждение) атома водорода из стабильных состояний в метастабильные [23]. На этом фоне чуть ли не ересью звучит вопрос: может ли радиация не возбуждать, а подавлять мутации? Опишем такую возможность.

Стабильные и метастабильные состояния в биологических макромолекулах. Поставленную в задаче будем решать на основе механизма оже-деструкции молекул наследственности (ДНК и РНК), используя уже развитые представления о кулоновском взрыве молекулярной структуры ДНК (РНК) [10]. Такой кулоновский взрыв может быть весьма удачно осуществлен путем именно оже-каскада при облучении рентгеновскими

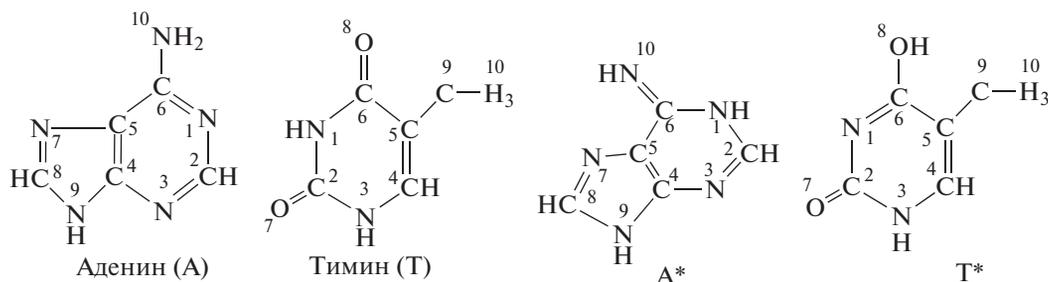


Рис. 4. Структурные формулы некоторых нуклеотидных оснований в нормальных (А,Т) и таутомерных (А*,Т*) формах [23].

лучами. Образовавшаяся структура с K -дыркой (в K -оболочке иона фосфора) неустойчива, и путем одношаговых эффектов Оже достигает валентной оболочки, где и образуется многократный положительный локальный заряд Z . Кулоновское расталкивание “взрывает” локальную область, и совершается деструкция в области молекулы наследственности. Вероятность этого процесса определяется выражением [10]:

$$\sigma_d = \int_Z \left\{ \sum_i \sigma_i \tilde{\alpha}_i(Z) \exp(-\tau_+/\tau_e(Z)) \right\} dZ \approx \sigma_k \alpha_A \exp(-\tau_+/\tau_e). \quad (11)$$

В этом выражении σ_k – сечение K -ионизации, α_A – вероятность образования многократного оже-заряда, $\gamma = \exp(-\tau_+/\tau_e)$ – вероятность распада (разлета) положительных ионов в конкуренции с электронной нейтрализацией, τ_+ – минимальное время разлета положительных ионов, τ_e – время электронного заливания.

При трансформации последовательных оже-переходов в оже-каскад в результате каждого элементарного шага вылетает свой оже-электрон, энергия которого может быть определена как [46, 47]

$$E_A = E_{j+1} - E_j, \quad (12)$$

где E_{j+1} и E_j – энергия уровней $j+1$ и j соответственно. Если оценивать кинетическую энергию этих оже-электронов, то получим величины, имеющие довольно большой разброс [47], например, для атома фосфора экспериментально получены следующие значения энергии связи:

$$K(1s) = 2145.9 \text{ эВ}, \quad L(2s) = 189.0 \text{ эВ}, \\ L_1(2p_{1/2}) = 136.0 \text{ эВ}, \quad L_{II}(2p_{3/2}) = 1350 \text{ эВ}.$$

Электроны с такой энергией, во-первых, тормозятся в небольшой сферической области вокруг “каскадирующего” атома с характерным диаметром

$$R_d \approx E_A / [dE_A/dR], \quad (13)$$

и, во-вторых, в этой области оже-электроны эффективно возбуждают электронные переходы в отдельных химических связях ДНК (РНК), что способствует образованию таутомерных форм атомов водорода (рис. 4) [23].

Все эти таутомерные формы и являются предтечей будущих мутаций [23]. Таким образом, наряду с деструкцией кулоновским взрывом локальных областей ДНК (РНК) с ненулевой вероятностью могут генерироваться предшественники новых мутаций. Важно, что энергия связи атома водорода в этих новых таутомерных формах существенно меньше энергии связи атомов водорода в нормальном состоянии: $E_\tau \ll E_n$ [23]. Последнее обстоятельство позволяет использовать радиационный отжиг путем так называемой “радиационной тряски” [3, 41, 42], которая впервые много лет назад была введена для трактовки обнаруженных эффектов улучшения свойств облучаемых неупорядоченных материалов при малых дозах радиации [3].

Микромеханизм ликвидации предмутации ударной волной. Рассмотрим реализацию процесса радиационной тряски для рассматриваемых систем детальнее. На рис. 5а изображены две позиции атома водорода – нижняя стабильная и верхняя метастабильная. Представим теперь, что на некотором расстоянии от метастабильного состояния происходит быстрое энерговыделение, причем локальное расширение вещества (кулоновский взрыв) происходит со скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе, – это и есть причина генерации ударных волн. Поэтому фронт ударной волны всюду надвигается быстрее, чем смещаются находящиеся перед ним атомы. Таким образом, добегая до связи атомов водорода в таутомерной форме, этот фронт чрезвычайно быстро сжимает связь с атомом водорода, который не успевает релаксировать и оказывается на энергетическом терме сильного отталкивания. В результате атом водорода отталкивается – разрушается метастабильное состояние, и после релаксации избыточной энергии он связывается уже в нижнем стабильном состоянии (рис. 5).

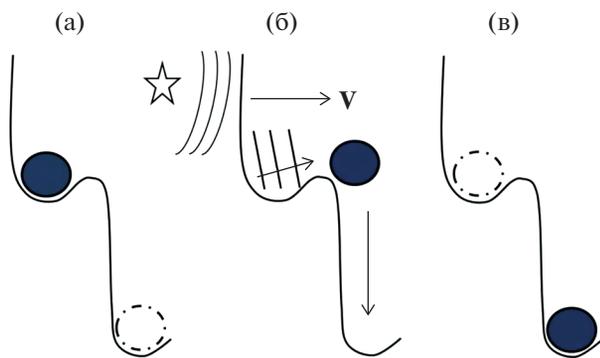


Рис. 5. Конфигурации атома водорода: а – метастабильная (таутомерная форма); б – промежуточная (“выдавливания” атома водорода из метастабильного состояния в стабильное под действием ударной волны, генерированной кулоновским взрывом); в – основное состояние (стабильная конфигурация).

Естественно, это будет происходить только в том объеме шара, где выполняются условия:

$$P_f(R) S_{\text{met}} d_0 \approx E_{\text{met}}. \quad (14)$$

Поскольку давление на фронте сферической ударной волны уменьшается с R по закону $P_f(R) \approx E_{\text{cul}}/R^3$ [43], радиационная встряска ликвидирует метастабильность в области шара размером

$$R \leq R^* \approx [(E_{\text{cul}}/E_{\text{met}}) S_{\text{met}} d_0]^{1/3}, \quad (15)$$

$R^* \approx d_0 [E_{\text{cul}}/E_{\text{met}}]^{1/3}$. Таким образом, каждый кулоновский взрыв вследствие оже-каскада ликвидирует (встряхивает) предмутации в шаре радиусом $R^* \approx 15 \text{ \AA}$, который соизмерим с радиусом создания предмутационных состояний за счет возбуждения оже-электронами на каждом шаге оже-каскада.

В принципе, есть процесс, который может облегчить очистку, если обсуждать рождение оже-каскада вследствие не K -ионизации, а L -ионизации [47]. Однако при этом уменьшается энергия, выделяемая при кулоновском взрыве, так что уменьшается радиус очистки. Вместе с тем полученные выше формулы позволяют обсудить оптимальные режимы, например, с какой ионизации начинать (K или L), чтобы очистка произошла при безопасных дозах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Среди различных задач радиационной физики и радиационного материаловедения в XXI веке появились такие, которые можно отнести к понятию сложных. Этот новый тип задач обусловлен комбинированием нелинейности и сильной неравновесности, которая особенно рельефно про-

является при воздействии интенсивной радиации на объекты, когда свойства структуры (“нано”, “фрактальность”, “малая размерность”, “хиральность” и “иерархичность”) преобладают по важности над привычной физико-химией. К оборудованию, на котором можно получить сильное комбинированное радиационное воздействие, можно отнести сильнооточный электронный импульсный ускоритель, синхротрон и большую солнечную печь. В работе внимание было сфокусировано на иерархическом строении объектов и показано, что для протекания в них радиационных процессов типа “сложности” излучение должно обладать тремя свойствами: тип радиации должен обеспечивать максимальное число каналов передачи энергии веществу (табл. 1, 2); радиация должна быть высокоинтенсивной, что обеспечивает заметную вероятность одновременных локальных флуктуаций – актов взаимодействия радиации с веществом (формула (2)); широкий энергетический спектр радиации может обеспечивать реализацию одновременных флуктуаций рождения возбуждений из различных частей спектра, причем на различных иерархических платформах.

Успешный анализ сложных радиационных эффектов в иерархических структурах может быть проведен методами стохастических дифференциальных уравнений, адекватно описывающих процессы рождения и передачи уплотненной информации при облучении, а также в рамках модифицированного подхода классической радиационной физики, которая в состоянии описать макроэффекты без участия диффузионных стадий.

На основе указанных выше фундаментальных результатов были изучены конкретные радиационные эффекты как в неживых объектах (процесс самоорганизации нового типа при росте зародышей золота на поверхности щелочно-галогенидных кристаллов, облучаемой ионами с энергией порядка кэВ), так и в живых объектах (анализ возможности процесса подавления предмутаций молекул ДНК и РНК ударными волнами, генерированными в результате оже-деструкции биополимеров при рентгеновском облучении).

Можно полагать, что именно радиационные эффекты в иерархических структурах (комбинирующих и другие свойства структуры (рис. 1)) делают весьма интригующим дальнейшее продвижение познания единства живой и неживой природы, и именно на базе радиационного воздействия, “которое было всегда”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук С.Е. Максимова за многолетнее сотрудничество в области радиационной синергетики,

ставшей частью области “Сложность”, а также профессору, доктору технических наук Х.Б. Ашурову и доктору технических наук О. Парпиеву за интерес и поддержку данной тематики.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stoneham A.M., Itoh N. // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 168. № 1–4. P. 186.
2. Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.
3. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н. Радиационная физика конденсированных сред. Концепции. Т. 1. Ташкент: Фан, 2006. 136 с.
4. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. М.: URSS, 2017. 360 с.
5. Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. 488 с.
6. Oksengendler B.L., Turaeva N.N., Ashirmetov A.Kh., Ivanov N.V., Karpova O.V., Maksimov S.E., Pelevovich V.O., Ashurov Kh.B. // Horizons in World Physics. N.Y.: Nova Science Publishers. V. 298. 2019. P. 1.
7. Anderson P.W. // Pros. US Nation. Acad. Sci. 1994. V. 92. P. 6653.
8. Bak P. How Nature Works: The Theory of Self-Organized Criticality. N.Y.: Springer, 2013. 117 p.
9. Вайсбург Д.И., Семин Б.Н., Таванова Э.Г., Матлис С.Б., Бальчев И.Н., Геринг Г.И. Высокоэнергетическая электроника твердого тела. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.
10. Оксенгендлер Б.Л., Зацепин А.Ф., Аширметов А.Х., Тураева Н.Н., Сулейманов С.Х., Никифорова Н.Н., Ашуров Х.Б. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2022. № 6. С. 53. <https://doi.org/10.31857/S1028096022060139>
11. Oksengendler B.L., Maksimov S.E., Turaeva N.N., Djurabekova F.G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 326. P. 45. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.09.040>
12. Maksimov S.E., Oksengendler B.L., Turaev N.Yu. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2013. V. 7. P. 333. <https://doi.org/10.1134/S1027451013020419>
13. Djurabekova F., Ashurov K.B., Maksimov S.E., Oksengendler B.L. // Phys. Stat. Sol. C. 2013. V. 10. № 4. P. 685. <https://doi.org/10.1002/pssc.201200751>
14. Oksengendler B.L., Turaeva N.N., Maksimov S.E. // J. Experim. Theor. Phys. 2010. V. 111. № 3. P. 415. <https://doi.org/10.1134/S1063776110090104>
15. Никифорова Н.Н., Ашуров Х.Б., Ашуров Р.Х., Аскаров Б., Максимов С.Е., Марасулов М.Б., Нургалиев И.Н., Никифоров В.Н. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2018. № 2. С. 63. <https://doi.org/10.1134/S1027451018010305>
16. Kurbanov M.Sh., Oksengendler B.L. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2036. № 1. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2036/1/012018>
17. Oksengendler B.L., Turaeva N.N., Akhmedov M., Karpova O. // Perovskite Solar Cells: Properties, Application and Efficiency. Chapter 2. N.Y.: Nova Science Publishers, 2019. P. 77.
18. Оксенгендлер Б.Л., Тураев Н.Ю., Тураева Н.Н., Сулейманов С.Х. // ДАН АН РУз. 2020. № 3. С. 43.
19. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н., Никифорова Н.Н., Минина М.В., Чечулина М.В., Искандарова Ф. // Russ. J. Biol. Phys. Chem. 2020. V. 5. № 4. P. 51.
20. Оксенгендлер Б.Л., Аширметов А.Х., Тураева Н.Н., Сулейманов С.Х., Зацепин А.Ф. // Тр. XXX Междунар. конфер. “Радиационная физика твердого тела”. Севастополь, 2020. С. 457.
21. Oksengendler B.L., Ashirmetov A. Kh., Turaeva N.N., Nikiforova N.N., Suleymanov S.X. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2022. V. 512. № 4. P. 66. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.12.009>
22. Rodel Fr., Arenas M., Ott O.J., Fournier C., Georgakilas A.G., Tapio S., Trott R., Gaigl U.S. // Strahlentherapie und Onkologie. 2020. V. 196. P. 679. <https://doi.org/10.1007/s00066-020-01635-7>
23. Ладик Я. Квантовая биохимия для химиков и биологов. М.: Мир, 1975. 256 с.
24. Oksengendler B.L., Mukimov K., Letfullin R., Turaeva N., Abdurakhmanov G., Yuldashev Sh. // Bull. National University of Uzbekistan: Mathematics and Natural Sciences. 2019. V. 2. № 2. P. 94.
25. Твердислов В.А., Мальшико Е.В. // УФН. 2019. Т. 189. № 4. С. 375. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.08.038401>
26. Иваницкий Г.П. // УФН. 2010. Т. 180. № 4. С. 337. <https://doi.org/10.3367/UFN.2010.04.0337>
27. Гольданский В.И., Кузьмин В.В. // УФН. 1989. Т. 157. № 1. С. 45. <https://doi.org/10.3367/UFN.1989.01.0003>
28. Эйдус Л.Х. Физико-химические основы радиобиологических процессов и защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1979. 240 с.
29. Дамаск А., Линс Дж. Точечные дефекты в металлах. М.: Мир, 1966. 292 с.
30. Холтон Дж. Тематический анализ науки. М.: Прогресс, 1981. 384 с.
31. Михайлин В.В. Синхротронное излучение в спектроскопии. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. 161 с.
32. Suleymanov S.Kh., Babashov V.G., Oksengendler B.L., Daskovsky M.I., Skripachev S.Yu., Djanklich M.U., Kulagina N.A., Amirov Sh.Ye. // Appl. Sol. En. 2021. V. 57. № 6. P. 486. <https://doi.org/10.3103/S0003701X21060165>
33. Ван Кампен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии. М.: Высшая школа, 1990. 376 с.
34. Payzullakhanov M.S., Payziyev Sh.D., Suleymanov S.Kh. // Appl. Sol. En. 2019. V. 55. № 6. P. 404. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19060082>
35. Кравченко В.А., Орлов А.Н., Петров Ю.Н., Прохоров А.М. // Тр. ИОФАН. Резонансные гетерогенные процессы в лазерном поле. Т. 11. М.: Наука, 1988. С. 4.

36. *Стратонович Р.Л.* Неравновесная нелинейная термодинамика. М.: Наука, 1985. 480 с.
37. *Zatsepin A.F., Kiryakov A.N., Zatsepin D.A., Gavrilov N., Oksengendler B.L.* // *Vacuum*. 2020. V. 175. P. 109243. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109243>
38. *Авилов А.Б., Оксенгендлер Б.Л., Хамраева Р., Юнусов М.С.* // *Узбекский физический журн.* 1992. № 5. С. 47.
39. *Гусева М.Б.* Ионная стимуляция процессов на поверхности твердого тела. Автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1988. 32 с.
40. *Арапов Б., Авиллов А.Б., Оксенгендлер Б.Л.* Радиационное дефектообразование и квазихимические реакции в неметаллических кристаллах. Бишкек: Илим, 2003. 120 с.
41. *Авиллов А.Б., Арапов Б., Оксенгендлер Б.Л., Гусева М.Б.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. иссл.* 2006. № 5. С. 103.
42. *Khabibullaev P.K., Oksengendler B.L., Pakharukov Yu.V.* // *Pizma v JTF*. 1986. V. 22. P. 1321.
43. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Курс теоретической физики. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 734 с.
44. *Волькенштейн М.В.* Биофизика. М.: Наука, 1988. 592 с.
45. *Фогель Ф., Мотульски А.* Генетика человека. Т. 2. М.: Мир, 1990. 384 с.
46. *Кудряшов Ю.Б.* Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). М.: Физматлит, 2004. 448 с.
47. *Parilis E.S., Kishinevsky L.M., Turaev N. Yu., Baklitzky B.E., Umarov F.F., Verleger V.Kh., Nizhnaya S.L., Bitensky I.S.* *Atomic Collisions on Solid Surfaces*. Amsterdam: Elsevier Sci. Pub, 1993. 664 p. <https://www.worldcat.org/title/atomic-collisions-on-solid-surfaces/oclc/25315981>

Interaction of Radiation with Hierarchical Structures

B. L. Oksengendler^{1,2,3,*}, A. Kh. Ashirmetov⁴, F. A. Iskandarova⁴, A. F. Zatsepin³, N. N. Nikiforova¹, S. Kh. Suleimanov², N. N. Turaeva⁵

¹*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies. W.A. Arifova of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 100125 Uzbekistan*

²*Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Scientific and Production Association "Physics-Sun", Tashkent, 100084 Uzbekistan*

³*Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, Yekaterinburg, 620078 Russia*

⁴*Nanotechnology Development Center at NUU named after M. Ulugbek, Tashkent, 100174 Uzbekistan*

⁵*Department of Biological Sciences, Webster University, Saint Louis, MO 63119 USA*

*e-mail: oksengendlerbl@yandex.ru

Radiation physics of the 21st century, which combines the special physical properties of materials and objects (nanoobjects, fractals, and others) with strong non-equilibrium, demonstrates many unusual nonlinear effects and their interpretation. This is especially evident in the case of high-intensity irradiation of various natures with a wide energy spectrum. Taking into account five different channels for the transfer of radiation energy to matter (elastic scattering, ionization, heat release, elastic and shock waves) makes it difficult to see the number of new unusual combinations of the radiation responses, the study of which at the present stage, apparently, is possible using the concept of "complexity". Among the various characteristics of irradiated objects, a special role is played by the hierarchy of their structure, which is fundamentally important for objects of both inanimate and living nature. The peculiarity of including objects of a hierarchical structure in the analysis of radiation effects leads to a new situation — the involvement of the ideas of cybernetics in radiation physics. Questions of a new type arise concerning the relationship between radiation and information, in particular, the influence of the entire variety of radiation parameters (energy, intensity, and dose) on the transfer of information from the lower platform of hierarchical structures to higher ones and its compression at the same time. The solution of these problems requires the use of both new theoretical approaches and the modification of traditional schemes in relation to the elementary acts of atomic rearrangements, such as kinetics and approaches to revealing the mechanisms of radiation effects. This range of questions has been formulated, and a certain solution has been obtained in relation to objects of inanimate and living nature.

Keywords: "complexity", radiation effects, hierarchical structures, nanoobjects, fractals, trophic chains of defects, mutations, radiation shaking.