

# ОТДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научная программа ОРРИ определяется темой первой категории Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного научно-технического сотрудничества ОИЯИ, в рамках которой существуют два основных направления: радиационное и биофизическое. Радиационное на-

правление традиционно связано с физикой защиты, спектрометрией и радиационным мониторингом в полях ионизирующих излучений. Научная программа по биофизике объединяет радиобиологию и радиационную генетику, биофизику фотобиологических процессов и молекулярную динамику.

## РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продолжались работы по проектированию циклотронного комплекса на базе циклотрона DC-72 в Братиславе, Словакия, в части радиационной безопасности. Значительные токи протонных пучков ускорителя и плотное расписание его работы делают наведенную активность оборудования одной из важнейших проблем конструирования ускорителя и организации работ на нем. Были рассчитаны уровни мощности дозы от наведенной активности конструктивных деталей камеры и тракта в зале ускорителя для различных режимов его работы и оценены индивидуальные дозы оперативного персонала при эксплуатации комплекса.

В течение года был выполнен большой объем работ, связанных с прогнозированием радиационной обстановки на проектируемой подкритической сборке, управляемой пучком протонов фазотрона ЛЯП (проект SAD). Для получения исходных данных проведены детальные измерения пространственных распределений мощности доз нейтронов в районе расположения установки и наведенной активности грунта обваловки. Совместно с проектной организацией выполнены расчеты защиты активной зоны

и помещения магнитов, определены зоны радиационного воздействия, сделаны оценки наведенной активности оборудования, воздуха и грунта.

В 2004 г. на нуклотроне ЛВЭ были выполнены два радиобиологических эксперимента на пучках ядер углерода с энергией 500 МэВ/нуклон, в ходе которых облучались лимфоциты человеческой крови и белки глаза.

С целью совершенствования методов спектрометрии нейтронов широкого диапазона энергий были выполнены расчеты функций чувствительности многогосферного спектрометра нейтронов расширенной конфигурации в различных условиях облучения.

Продолжались работы в рамках участия в программе исследования поверхности планет совместно со специалистами из Института космических исследований и ЛНФ [1]. Выполнены детальные расчеты эффективности регистрации нейтронов стильбеновым спектрометром в составе российского прибора HEND, а также проведены необходимые измерения и предварительные расчеты для новых приборов, предназначенных для марсохода и лунного аппарата.

Радиационная генетика и радиобиология

Продолжались радиационно-генетические исследования на пучках тяжелых ядер. Одной специфической особенностью генетических эффектов под действием тяжелых заряженных частиц является образование кластерных повреждений ДНК. Эти повреждения обусловлены большими энерговыделениями частиц в генетических структурах. При этом репарация одно- и двунитовых разрывов цепи ДНК (ДНР) существенно подавлена. Следствием этого являются различные радиационно-индуцированные генетические эффекты. Установлено, что повреждения ДНК за счет физических факторов или химических агентов приводят к двум видам клеточного отклика. Первый вид — репарация повреждений ДНК, второй — апоптотическая инактивация клетки. Особенность повреждений ДНК при облучении тяжелыми заряженными частицами может быть вызвана нарушением кинетики репарации и влиянием на частоту апоптотических инактиваций клеток.

Для изучения закономерностей репарации ДНК в клетках человека был разработан метод комет-анализа. Эта простая, быстрая и чувствительная методика позволяет определять уровень повреждений ДНК в отдельных клетках. При комет-анализе клетки внедряются в тонкий слой агарозного геля на пластинке микроскопа. Клетки растворяются до удаления всех клеточных протеинов, и цепь ДНК в нейтрально-щелочной среде начинает последовательно раскручиваться. Процесс раскручивания ДНК является электрофорезным, и ДНК начинает флуоресцировать. Во время электрофореза разорванные фрагменты ДНК или ослабленный хроматин выводятся из ядер. Такой метод регистрации специфических повреждений открывает новые возможности в исследованиях клеточной репарации ДНК.

Цель исследований состояла в изучении образования ДНР в лимфоцитах человеческой крови в результате облучения  $\gamma$ -квантами или тяжелыми ядрами с различной линейной передачей энергии (ЛПЭ) и кинетики репарации ДНР после облучения. В экспериментах образцы облучались ядрами бора, лития и углерода. Энергии (и ЛПЭ) ядер были соответственно 32 МэВ/нуклон (ЛПЭ 55 кэВ/мкм), 33 МэВ/нуклон (ЛПЭ 20 кэВ/мкм) и 480 МэВ/нуклон (ЛПЭ 10,6 кэВ/мкм). Было установлено, что количество двунитовых разрывов ДНК является линейной функцией поглощенной дозы для всех видов облучений (рис. 1).

Эффективность образования ДНР ядрами углерода с энергией 480 МэВ/нуклон выше, чем для  $\gamma$ -квантов. Инкубация лимфоцитов после облучения обнаруживает снижение количества ДНР после об-

лучений (рис. 2). Однако спустя 6 ч инкубации клеток после облучения ядрами углерода относительное количество ДНР вновь возрастает. Это явление может быть связано с ростом числа клеток, инактивированных повреждениями вследствие апоптоза живых клеток. Планируются дальнейшие эксперименты с использованием комет-анализа и других тяжелых заряженных частиц на нуклотроне и МЦ-400М.

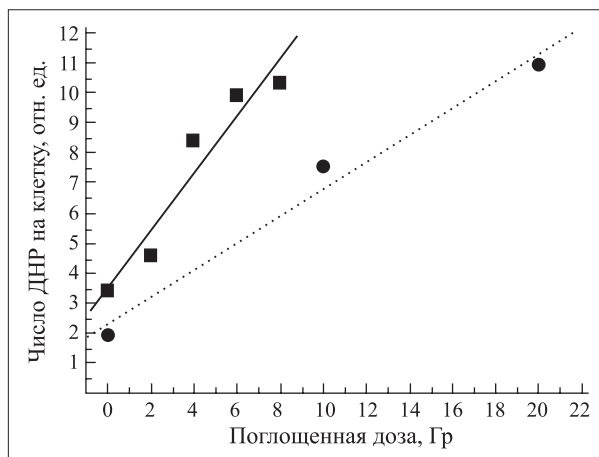


Рис. 1. Индукция ДНР в лимфоцитах человеческой крови после облучения  $\gamma$ -квантами и ядрами углерода с энергией 480 МэВ/нуклон. ■ — ядра  $^{12}\text{C}$  ( $Y = 3,49 + 0,96 \cdot X$ ,  $R = 0,96$ ); ● —  $\gamma$ -кванты ( $Y = 2,28 + 0,45 \cdot X$ ,  $R = 0,99$ )

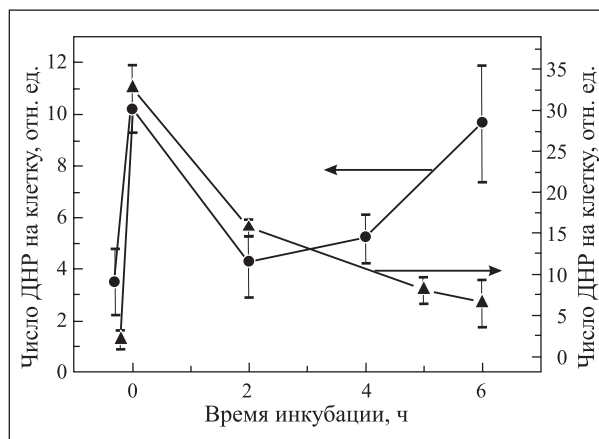


Рис. 2. Зависимость относительного количества ДНР в лимфоцитах человеческой крови и их репарация после облучения ядрами углерода с энергией 480 МэВ/нуклон и  $\gamma$ -квантами. ● — ядра  $^{12}\text{C}$  (6 Гр); ▲ —  $\gamma$ -кванты (80 Гр)

Продолжены исследования эффектов малых доз излучения с различными физическими характеристиками на лимфоцитах периферической крови человека и клетках китайского хомячка. Клетки облучали в дозах 0,01–1 Гр рентгеновскими и  $\gamma$ -лучами

$^{60}\text{Co}$ , ионами углерода (ЛПЭ 10,6 кэВ/мкм) и ионами магния (ЛПЭ 43 кэВ/мкм) На четырех образцах крови и культуре клеток китайского хомячка при использовании различных методов цитогенетического анализа для всех использованных типов излучения показан сложный нелинейный характер зависимости эффекта от дозы в диапазоне от 0,01 до 0,5–0,7 Гр. При дозах 0,01–0,05 Гр клетки проявляют максимальную радиочувствительность, обусловленную индукцией хроматидных повреждений. С ростом дозы наблюдается увеличение радиорезистентности, что проявляется в снижении процента aberrантных клеток и частоты aberrаций практически до контрольного уровня. При дозах свыше 0,5–0,7 Гр зависимость доза–эффект приобретает линейный характер, при этом клетки проявляют повышенную радиорезистентность — наклон кривой уменьшается в 5–10 раз по сравнению с первоначальным (в зависимости от используемого цитогенетического критерия).

Полученные данные свидетельствуют о проявлении феномена ГЧ/ИР при действии излучений в широком диапазоне ЛПЭ, а также о неправомерности оценки риска малых доз облучения путем линейной экстраполяции эффектов высоких доз, так как при этом имеет место недооценка эффективности малых доз [2]. Делается вывод о невозможности биодозиметрии при дозах ниже 0,5 Гр.

На лимфоцитах крови человека проведена оценка индивидуальной радиочувствительности генома человека при действии излучений разного качества. Исследованы образцы крови нескольких здоровых доноров в возрасте 20–55 лет, мужчин и женщин.

Проанализированы нестабильные хромосомные aberrации в лимфоцитах индуцированных редко- и плотноионизирующими излучениями —  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , протонами с энергией 170 МэВ и ионами углерода с энергией 500 МэВ/нуклон. При воздействии всеми исследованными видами излучений наблюдается различие радиочувствительности отдельных доноров по индукции хромосомных aberrаций, которое воспроизводится в диапазоне доз от 1 до 3 Гр при действии излучений с высокой и низкой ЛПЭ. Результаты свидетельствуют о том, что тяжелые ионы по сравнению с протонами и  $\gamma$ -квантами характеризуются более высокой биологической эффективностью.

Проведены исследования хромосомных повреждений в клетках (на модели лимфоцитов крови человека) при облучении на входе в объект исходного пучка протонов с энергией 170 МэВ и в области пика Брэгга, что соответствует облучению окружающих тканей на пути пучка и непосредственно тканей опухоли. Показана высокая биологическая эффективность протонов в пике Брэгга. Значение ОБЭ составило  $\sim 1,25$  в диапазоне доз 1–4 Гр, в то время как протоны исходного пучка по эффективности не отличались от стандартного  $\gamma$ -излучения [3]. По-

скольку формирование терапевтической дозы протонов на опухоль осуществляется облучением пациентов с нескольких направлений (до семи), уровень цитогенетических повреждений клеток окружающих тканей на пути исходного пучка оказывается сниженным примерно на порядок. Так, при дозе 3 Гр в опухоли получают повреждения до 80 % ее клеток, а в окружающих тканях их уровень не превысит 10 %. Результаты исследования подтверждают высокую эффективность протонных пучков при лучевой терапии.

На дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* продолжают исследования закономерностей индукции мутаций различной природы под действием ионизирующей радиации. Для этого используются четыре генетические системы, позволяющие тестировать определенные типы повреждений. Прямые мутации, т. е. любые повреждения, нарушающие ген аргинин пермиазы CAN1, детектируются по возникновению мутаций канаванин-резистентности Can<sup>r</sup>. Обратные мутации к Lys<sup>+</sup> и Hom<sup>+</sup> в гене LYS2, имеющем вставку из четырех нуклеотидов, и гене HOM3, имеющем вставку из одного нуклеотида, используются для тестирования мутаций сдвига рамки считывания в результате выпадения одного нуклеотида. Ранее были изучены закономерности индукции этих мутаций  $\gamma$ -квантами. В настоящее время эти системы используются для изучения закономерностей индукции мутаций тяжелыми ионами. Облучение ионами Li с ЛПЭ 17 кэВ/мкм показало, что эффективность индукции мутаций Can<sup>r</sup>, Lys<sup>+</sup>, Hom<sup>+</sup> невысока. Кривая доза–эффект имеет нелинейный характер, наблюдается максимум в области дозы 25 Гр. В настоящее время разрабатывается плазмидная система для тестирования небольших делеций размером в несколько тысяч нуклеотидных пар. В результате таких делеций выпадает несколько генов. Эта система отработывалась с использованием в качестве индуктора УФ-лучей. В настоящее время проведено изучение закономерностей индукции делеций при облучении ионами Li с ЛПЭ 17 кэВ/мкм. Так же как и в предыдущем случае, эффективность невелика, наблюдается кривая с максимумом в области дозы 75 Гр.

Совместно с Институтом молекулярной генетики РАН, Москва, продолжают исследования генетического контроля останки клеточного цикла при получении повреждений ДНК, так называемого checkpoint-контроля. Анализ взаимодействия известных checkpoint-генов с генами SRM показал, что гены RAD53 и SRM5/CDC28 относятся к различным эпистатическим группам в отношении радиочувствительности. По-видимому, эти гены контролируют два пути, в свою очередь контролируемых чувствительностью к  $\gamma$ -излучению. Ранее было показано, что гены CDC28 и RAD52 также относятся к различным эпистатическим группам генов. Анализ тройных мутантов RAD52, RAD53, CDC28 по-

казал, что радиочувствительность тройного мутанта не превышает радиочувствительности двойных мутантов. Таким образом, показано существование двух путей контроля радиочувствительности — CDC28-зависимый и RAD52-, RAD53-зависимый.

Совместно с Университетом г. Перуджа, Италия, началось изучение закономерностей мутагенеза, старения и апоптоза с использованием в качестве модельной системы дрожжей *S. cerevisiae*. В частности, изучается влияние такого стресса, как голодание. Возникновение мутаций в условиях отсутствия роста мало изучено, хотя в природе это наиболее часто встречающаяся ситуация; например, большая часть клеток многоклеточного организма не делится. Механизмы возникновения мутаций отличаются от механизма возникновения делящихся клеток. Мало известно о генетическом контроле этого феномена. Предполагается исследовать влияние checkpoint-генов и генов, кодирующих ДНК полимеразы, на мутагенез и жизнеспособность клеток в условиях ограниченного роста. Анализ показал, что основные репликативные ДНК полимеразы  $\delta$  и  $\varepsilon$  влияют на мутагенез и жизнеспособность клеток в условиях голодания или отсутствия роста.

### Биофизика фотобиологических процессов

*Изучение методом ультрафиолетового тестирования повреждающего действия тяжелых заряженных частиц на белки хрусталика глаза — кристаллины.* Принято считать, что основной причиной заболевания катарактой (помутнение хрусталика) космонавтов является облучение высокоэнергетическими тяжелыми частицами. Одной из причин развития катаракты может быть радиационное повреждение растворимых белков — кристаллинов цитоплазмы волоконных клеток хрусталика [4]. Такое повреждение может вызывать скрытые повреждения белковых молекул, которые в дальнейшем проявляются в необратимой агрегации кристаллинов. Фактором, усиливающим агрегацию, может служить УФ-свет. В нашей работе УФ-облучение использовалось для выявления скрытых радиационных повреждений кристаллинов. Целью исследований было: изучить изменения кристаллинов хрусталика быка, возникающие при бомбардировке раствора белка тяжелыми ядрами; определить границы доз, вызывающих изменения стабильности кристаллинов.

Растворы  $\alpha$ - и  $\beta_L$ -кристаллинов хрусталика, полученные с помощью гель-фильтрации, подвергали бомбардировке ядрами В, С и Li, после чего изучали структурно-функциональные изменения белков. Была исследована стабильность  $\beta_L$ -кристаллина по отношению к тепловой и фотоиндуцированной денатурации, а также шаперонная активность  $\alpha$ -кристаллина по отношению к тепловой и фотоиндуцированной денатурации  $\beta_L$ -кристаллина. Структурные

изменения в белках были охарактеризованы с помощью исследования триптофановой и нетриптофановой флуоресценции, методами гель-фильтрации и электрофореза в ПААГ в денатурирующих и восстанавливающих условиях.

Облучение ядрами В (32 МэВ/нуклон) не вызвало явных изменений в устойчивости  $\beta_L$ -кристаллина к тепловой денатурации, тогда как доза 8 Гр привела к 30 %-му сокращению лаг-периода процесса фотоагрегации под действием УФ-света. При этом данные электрофореза не показали изменений в полипептидном составе образцов при действии облучения. Исследование спектров флуоресценции свидетельствует о некоторых конформационных перестройках в молекуле  $\beta_L$ -кристаллина, возникающих уже при облучении в дозе 4 Гр. Исследование  $\alpha$ -кристаллина показало, что облучение ядрами В не вызывает значимых изменений ни размера, ни формы молекулы (гель-фильтрация, рентгеновское малоугловое рассеяние), также не обнаружено и образования сшивок между субъединицами белка (электрофорез в ПААГ). Изменений шаперонной активности по отношению к тепловой денатурации  $\beta_L$ -кристаллина также не обнаружено, однако по отношению к фотоагрегации замечено некоторое снижение шаперонной активности белка.

Облучение ядрами С (480 МэВ/нуклон)  $\alpha$ - и  $\beta_L$ -кристаллина проводилось дважды, однако значимых изменений обнаружено не было.

Облучение ядрами Li (33 МэВ/нуклон) не повлияло на устойчивость  $\beta_L$ -кристаллина к тепловой денатурации. Исследование устойчивости белка к фотоагрегации под действием УФ-света показало, что облучение сокращает лаг-фазу и увеличивает скорость агрегации. Однако дозовая зависимость оказалась существенно нелинейна — максимальный эффект ускорения фотоагрегации показала доза 4 Гр, тогда как доза 16 Гр не отличалась от контроля. Данные электрофореза также не показали изменений в полипептидном составе образцов при действии облучения. Исследование спектров флуоресценции позволило установить, что явных изменений в спектре молекул нет. Исследование  $\alpha$ -кристаллина показало, что облучение не вызывает значимых изменений размера молекулы (гель-фильтрация), также не обнаружено и образования сшивок между субъединицами белка (электрофореза в ПААГ). Изменений шаперонной активности по отношению к тепловой денатурации  $\beta_L$ -кристаллина не обнаружено. Однако по отношению к фотоагрегации, как и в случае облучения ядрами В, замечено некоторое снижение шаперонной активности белка.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что высокоэнергетические ядра (480 МэВ/нуклон) при мощности дозы 4 Гр/ч не оказывают воздействия на кристаллины, тогда как ядра с энергией около 30 МэВ/нуклон при мощности дозы 4 Гр/мин способны повреждать как

молекулы  $\beta_L$ -, так и  $\alpha$ -кристаллина. Однако полученные результаты достаточно разноречивы и требуют дальнейших исследований.

**Исследование структуры кристаллинов методом малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния.** Методом рентгеновского малоуглового рассеяния было исследовано влияние облучения ядрами бора с ЛПЭ 50 кэВ/мкм на структуру  $\alpha$ -кристаллина. В экспериментах использовали растворы  $\alpha$ -кристаллина, полученного нами из глаза быка. Концентрация  $\alpha$ -кристаллина в растворах, определенная методом микробиуретта, составляла при облучении и при измерениях рентгеновского малоуглового рассеяния 11 мг/мл. Рентгеновское малоугловое рассеяние измеряли на дифрактометре с линейным координатным детектором в ИБХВ РАН, Москва. Кривые рентгеновского малоуглового рассеяния анализировали при помощи программы «Гном», использующей метод косвенного преобразования Фурье. Проведено измерение рентгеновского малоуглового рассеяния для растворов  $\alpha$ -кристаллина, облученных ядрами бора с дозой 4 и 16 Гр, а также для двух контрольных (необлученных) растворов  $\alpha$ -кристаллина.

Кривые рентгеновского малоуглового рассеяния растворами  $\alpha$ -кристаллина, облученными ядрами бора с дозами 4 и 16 Гр, и контрольными растворами  $\alpha$ -кристаллина в пределах точности эксперимента были идентичны. Радиус инерции и максимальный размер  $\alpha$ -кристаллина в облученных и контрольных растворах составлял  $(6,2 \pm 0,2)$  и  $(18 \pm 1)$  нм соответственно. Уменьшения интенсивности малоуглового рассеяния, которое можно было бы ожидать при частичном выпадении белка в осадок, не наблюдалось.

Таким образом, после облучения ядрами бора с дозой вплоть до 16 Гр существенных структурных изменений  $\alpha$ -кристаллина не происходит (нет изменений размера, молекулярной массы и формы макромолекул  $\alpha$ -кристаллина).

Полученные результаты показывают высокую радиационную стойкость  $\alpha$ -кристаллина, что, по видимому, является важным условием функционирования этого белка в хрусталике в течение длительного времени на протяжении жизни.

Выполнена подготовительная работа для исследования структуры кристаллинов методом малоуглового нейтронного рассеяния, включающая поиск и анализ литературных данных, обсуждение и планирование эксперимента. С целью подготовки к экспериментам по нейтронному рассеянию с использованием метода вариации контраста начато исследование влияния тяжелой воды на структуру  $\alpha$ - и  $\beta_L$ -кристаллинов (сравнительный анализ методом рентгеновского малоуглового рассеяния структуры  $\alpha$ - и  $\beta_L$ -кристаллинов в буфере, содержащем обычную и тяжелую воду).

**Исследование влияния тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) с высокой плотностью ионизации**

**на молекулу зрительного пигмента родопсина (*in vitro*).** В 2004 г. были проведены два сеанса облучения дигитонинового экстракта родопсина на установке МЦ-400М ядрами бора (ЛПЭ = 50 кэВ/мкм) и лития (ЛПЭ = 20 кэВ/мкм), а также два сеанса облучения на нуклотроне ядрами углерода с энергией 480 МэВ/нуклон. Для оценки повреждающего действия ТЗЧ были проведены следующие тесты на нативность молекулы родопсина:

- Исследование спектральных свойств зрительного пигмента родопсина. Показано, что независимо от дозы радиации (4, 8, 16 Гр) и природы ТЗЧ спектральные свойства родопсина после его облучения практически не менялись.

- Определение степени нативности белковой части молекулы родопсина — опсина. Показано, что способность к регенерации опсина, полученного из облученного родопсина, при добавлении к нему 11-цис-ретинала заметно не менялась и была сопоставима с контрольными необлученными образцами независимо от дозы радиации и вида ТЗЧ.

- Определение реакционной способности белковых SH-групп методом Элмана. Для образцов, облученных на нуклотроне ядрами углерода, тест на доступные титрованию с помощью ДТНБ SH-группы не показал изменения активности сульфгидрильных групп для облученных образцов различными дозами (4 и 16 Гр) по сравнению с контролем. В случае же облучения родопсина ядрами бора и лития на установке МЦ-400М была обнаружена дозовая зависимость реакционной способности SH-групп в белковой части молекулы. Показано, что при облучении ТЗЧ родопсина происходит увеличение количества доступных титрованию SH-групп по сравнению с контролем, при этом количество их увеличивается с увеличением дозы радиации (4, 8 и 16 Гр). Как известно, после воздействия на родопсин света в видимой области происходит увеличение доступных титрованию SH-групп в результате конформационных перестроек белковой части молекулы и разрыхления ее третичной структуры. Можно предположить, что и в случае облучения ТЗЧ происходят нарушения в третичной (возможно, и во вторичной и первичной) структуре молекулы. Молекулярный механизм увеличения доступности SH-групп родопсина после его облучения ТЗЧ находится в стадии исследования.

- Анализ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии состояния хромофорной группы родопсина — ретинала. Проведен анализ конформационного состояния ретинала в облученном родопсине ядрами бора на установке МЦ-400М. Показано, что по сравнению с контрольным образцом на хроматограмме появляются дополнительные три пика, относящиеся не к каким-либо изомерам ретинала, а к более полярным соединениям. Можно предполагать, что это либо фрагменты полиеновой цепи ретинала, либо его окисленные формы (эпоксиды). Следует отметить, что полностью процентное

содержание транс-ретинала в облученном образце не меняется. Другими словами, при воздействии ТЗЧ на молекулу родопсина изомеризации хромофора не происходит, как это имеет место при поглощении зрительным пигментом кванта света.

### Молекулярная динамика

Сектор компьютерного молекулярного моделирования (КММ) был создан в ОРПИ в начале 2004 г. После достаточно продолжительного периода, требовавшегося на настройку оборудования и компьютерной сети, сектор КММ начал работу по моделированию биомолекулярных структур (ДНК, РНК, белков), важных для целей клеточной и радиационной биологии. Было проведено молекулярно-динамическое моделирование конформаций родопсина и прионных белков. Выполнено молекулярное моделирование прионных белков с целью исследования влияния точечных мутаций (замен аминокислот), связанных с врожденным заболеванием Креффельда–Якоба (CDJ) — коровьего бешенства. Проведено также сравнение структурных изменений PrP-белка человека, полученных путем анализа данных ЯМР-спектроскопии (прион дикого типа и две мутантные структуры с заменой Glu200Asp и Glu200Lys).

## РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Контроль радиационной обстановки на радиационно-опасных объектах ОИЯИ осуществлялся с помощью автоматизированных систем радиационного контроля и переносными радиометрическими и дозиметрическими приборами.

В 2004 г. на индивидуальном дозиметрическом контроле в ОИЯИ состояло 1633 человека, включая 59 прикомандированных специалистов. Средняя годовая доза облучения персонала в целом по ОИЯИ составила 1,3 мЗв. Наибольшее значение индивидуальной годовой дозы персонала наблюдается в ЛЯП и равно 14,4 мЗв.

Регулярный мониторинг окружающей среды по образцам почвы, растений, воды из водоемов в окрестностях Дубны, водопроводной воды и воды на сбросе очистных сооружений подтвердил факт, что

## КОНФЕРЕНЦИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

С 30 мая по 3 июня в Ереване проходили III Сисаяновские чтения, организованные ОИЯИ, Научным советом РАН по радиобиологии, Институтом биохимии имени А. Н. Баха, ГНЦ РФ «Институт

С использованием специализированного процессора MDGRAPE-2, предоставленного лабораторией CAL RIKEN (Япония), проводилось молекулярное моделирование взаимодействия полиэтилена с водой, что важно для разработки различных диагностических инструментов *in vivo* и *in vitro* [5].

Проводились исследования собственных частот нуклеотидных дублетов методами *ab initio* с использованием пакета Gaussian98 [6].

Несмотря на возрастающую мощность современных суперкомпьютеров, основной причиной, по которой пока невозможно прямое моделирование биологически важных структур, состоящих из нескольких сотен нуклеотидов, являются квадратично растущие затраты времени на расчет электростатических взаимодействий. Для эффективного расчета электростатики в секторе КММ создан C++-объектный код расчета электростатики быстрым мультипольным методом (алгоритм Грингарда–Рохлина), который является единственным в России и позволяет рассчитывать электростатическое взаимодействие в системах до миллиона частиц на обычном компьютере Pentium IV без применения специализированных процессоров.

радиоактивность окружающей ОИЯИ среды остается постоянной в течение длительного времени и обусловлена лишь естественной радиоактивностью и продуктами глобальных выпадений. Какой-либо вклад в радиоактивность окружающей среды от ядерно-физических установок ОИЯИ не обнаружен.

Принятые организационно-технические меры по обеспечению радиационной безопасности и специальный дозиметрический контроль позволили не превысить планируемые дозы облучения персонала. В целом обеспечение радиационной безопасности в ОИЯИ соответствует требованиям законов, норм и правил в области использования атомной энергии, что подтвердили регулярно инспектирующие Институт органы государственного надзора за радиационной безопасностью.

медико-биологических проблем», Ереванским госуниверситетом и Институтом биохимии Армении. Чтения проводились при поддержке венецианского отделения ЮНЕСКО. В работе чтений приняло уча-

стие более 40 специалистов из России, Армении и ОИЯИ. Научная программа чтений включала в себя 20 пленарных докладов по различным направлениям, связанным с научным наследием академика Н. М. Сисакяна: биохимия, радиобиология и фотобиология, космическая биология и медицина. Российскую делегацию возглавляли академик-секретарь РАН директор ИМБП А. И. Григорьев и директор ИБХ профессор В. О. Попов. ОИЯИ был представлен вице-директором А. Н. Сисакяном, академиком РАН М. А. Островским и профессором Е. А. Красавиным. Руководители делегации были приняты спикером парламента Армении А. Багдасаряном.

С 8 по 11 сентября 2004 г. в Доме международных совещаний ОИЯИ прошло 1-е Международное совещание «Молекулярное моделирование в науках о веществе и биологии». Это одно из первых узконаправленных совещаний в России, посвященное компьютерному молекулярно-динамическому моделированию в физико-химических и биофизических задачах. В совещании приняли участие специалисты различных областей знаний — компьютерного моделирования, биофизики и физической химии, физики наноструктур и т. п. — из ведущих научных центров Японии, США, Европы, российских академических институтов и университетов, ОИЯИ. Доклады, представленные на совещании, охватывали широкую тематику: моделирование ДНК и белков, нанокластеры, мембраны, квантовая биофизика, молекулярное моделирование физических и химических систем, параллельные вычисления в биомолекулярном моделировании.

Развивается учебный процесс на кафедре «Биофизика» Международного университета «Дубна». В

настоящее время по специальности «Радиационная безопасность человека и окружающей среды» обучается 56 студентов и в 2005 г. состоится первый выпуск. В 2004 г. на кафедру было принято 20 новых студентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krylov A. R. et al.* Measurement of the Energy Dependence of the Neutron Counter Sensitivity at Neutron Beams of the Electrostatic Generator. JINR Preprint E13-2004-20. Dubna, 2004.
2. *Красавин Е. А. и др.* Генетическое действие излучений с разными физическими характеристиками на клетки млекопитающих // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 6. С. 1483–1511.
3. *Говорун Р. Д. и др.* Исследование хромосомных нарушений в клетках человека после облучения терапевтическим пучком протонов фазотрона ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ (в печати).
4. *Кривандин А. В., Муранов К. О., Островский М. А.* Исследование комплексообразования в растворах  $\alpha$ - и  $\beta$ -L-кристаллинов при 60 °С // Молекулярная биология (в печати).
5. *Kretov D. A., Kholmurodov Kh. T.* Molecular Dynamics Simulations of the Density-Temperature Behavior of a Chain Polyethylene. JINR Preprint E19-2004-112. Dubna, 2004.
6. *Кретов Д. А., Холмуродов Х. Т.* МД-расчет энергии основного состояния и частот собственных колебаний и оптимизация геометрии нуклеотидных дуплетов. Препринт ОИЯИ P19-2004-133. Дубна, 2004.