

В.И.Высоцкий, А.А.Корнилова
V.I.Vysotskii, A.A.Kornilova

ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ
И ТРАНСМУТАЦИЯ ИЗОТОПОВ
В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
NUCLEAR FUSION
AND TRANSMUTATION OF ISOTOPES
IN BIOLOGICAL SYSTEMS

Издательство "МИР"

Содержание

Глава 1. Введение	9
Глава 2. Химические элементы в биологических системах. История эффекта трансмутации	14
Глава 3. Изотопный состав биосистем и его влияние	22
Глава 4. Экспериментальное исследование трансмутации изотопов и химических элементов в микробиологических системах	28
4.1. Выбор методики экспериментов и используемых биологических объектов	28
4.2. Комбинированное исследование управляемой трансмутации изотопов в растущих биологических культурах методами мессбауэровской спектроскопии и масс-спектропии	31
4.2.1. <i>Исследование трансмутации изотопов в микробиологических культурах методом мессбауэровской спектроскопии</i>	32
4.2.2. <i>Изучение управляемой трансмутации легких и промежуточных по массе изотопов в растущей микробиологической культуре с помощью лазерного время-пролетного масс-спектрометра</i>	41
4.3. Наблюдение и масс-спектроскопическое исследование управляемой трансмутации средних по атомному номеру изотопов в растущей культуре	45
4.3.1. <i>Методика работы и методы исследования</i>	45
4.3.2. <i>Результаты и обсуждение</i>	48
4.4. Наблюдение трансмутации тяжелых изотопов и исследование методов управления процессами трансмутации в растущих микробиологических культурах	51
4.4.1. <i>Каталитическое влияние цезия на эффективности ядерного превращения промежуточных и тяжелых изотопов в растущей биологической культуре</i>	51
4.4.2. <i>Обнаружение трансмутации тяжелых изотопов в растущей биологической культуре</i>	57
4.4.3. <i>Изучение комбинированного воздействия Sr, Cl и S на эффективность процесса трансмутации в биологических культурах</i>	59

Глава 5. Физические аспекты процесса низкотемпературной трансмутации изотопов в биологических системах	64
5.1. Проблема беспороговых ядерных реакций синтеза при низкой энергии с участием заряженных частиц	64
5.2. Феномен «холодного ядерного синтеза»	67
5.2.1. Ускорительные модели	70
5.2.2. Уменьшение кулоновского барьера вследствие электронного экранирования	71
5.2.3. Когерентные и интерференционные эффекты с участием кристаллической решетки	71
5.2.4. Ферми и Бозе-конденсация ядер	71
5.2.5. Реакции, стимулированные фононами кристаллической решетки	71
5.2.6. Экзотическая химия	71
5.2.7. Катализ тяжелыми (трансмюонными) частицами	72
5.2.8. Реакции под действием нейтронов	72
5.2.9. Специфические ядерные эффекты	72
5.3. Особенности реализации феномена «холодного ядерного синтеза» в биологических системах	72
5.3.1. Существует ли специфический механизм осуществления низкотемпературного ядерного синтеза в биологических системах?	72
5.3.2. Возможный механизм безбарьерного ядерного синтеза в оптимальных квантующих потенциальных ямах в нестационарном режиме	75
5.3.3. Возможный сценарий протекания безбарьерного ядерного синтеза в растущих биологических системах	87
Глава 6. Химико-биологические предпосылки процесса трансмутации изотопов в биологических системах	90
6.1. Элементный состав биологических объектов и проблема управляемого синтеза в растущей культуре	91
6.2. Особенности взаимодействия микроорганизмов с металлами	95
6.3. Биологическое значение взаимодействия микроорганизмов с металлами	100
6.4. Биохимические аналоги жизненно необходимых микроэлементов. Метаболизм микроорганизмов и проблема управляемой трансмутации	103
6.5. Репарация ДНК и проблема трансмутации изотопов	114
6.6. Адаптация биообъектов, аналогия микроэлементов и синтез изотопов — закономерности биологической эволюции	117

Глава 7. Перспективы и возможные методы использования явления трансмутации изотопов в биологических системах	119
7.1. Использование явления трансмутации изотопов для целей профилактики и лечения заболеваний, этиологически обусловленных дефицитом микроэлементов	119
7.2. Получение редких легких и тяжелых стабильных изотопов методами биотехнологии, основанными на явлении трансмутации изотопов	123
7.3. О возможности утилизации радиоактивных отходов с использованием явления трансмутации изотопов в биологических системах	127
7.3.1. Реакции утилизации долгоживущего изотопа Sr^{90}	137
7.3.2. Реакция утилизации радиоизотопа Zr^{95}	138
7.3.3. Реакция утилизации Nb^{95}	138
7.3.4. Реакции утилизации высокоактивных изотопов Ru^{103} и Ru^{106}	138
7.3.5. Реакции утилизации высокоактивных ядер Sb^{125}	138
7.3.6. Реакции утилизации высокоактивного изотопа I^{131}	139
7.3.7. Реакции утилизации высокоактивного изотопа Co^{60} , используемого в метрологии и дефектоскопии	140
7.3.8. Утилизация высокоактивного изотопа Kr^{85}	140
7.3.9. Утилизация высокоактивного изотопа Sc^{46}	141
7.3.10. Утилизация высокоактивного изотопа Mn^{54}	141
7.3.11. Утилизация высокоактивного изотопа Ar^{39}	142
7.3.12. Утилизация высокоактивного изотопа S^{35}	142
7.4. Заключение	143
Литература	145

ВВЕДЕНИЕ

Среди «вечных проблем», которые сопровождают человечество в течение всей истории, проблема единства и взаимопревращения материального мира всегда находилась на одном из ведущих мест. Эту проблему решали философы и алхимики, поэты и физики. Поиск «философского камня», способного обеспечить превращение элементов и получить, наконец-то, золото, продолжался даже в самые мрачные периоды истории человеческой цивилизации. Часто бывало так, что мученики науки шли на жертвенный огонь инквизиции, требовавшей «чистоты веры и помыслов», но не отрекались от светлой идеи. Среди разноплеменного сообщества творцов нового были те, кто искренне верил в силу человеческого разума, но, как и во все времена, были также авантюристы и шарлатаны, обещавшие все сразу и действующие по принципу «спрос рождает предложение». А спросом во все времена пользовалось золото.

Это был период «золотого детства» науки, когда вся она была основана на наивной полудетской уверенности, что простой перебор многочисленных вариантов обязательно приведет к успеху. Считалось, что достаточно смешать что-либо с чем-то другим, прибавить кое-что еще и желанная цель не в этот так в другой раз обязательно будет достигнута.

Но научный прогресс неудержимо шагал вперед. Казалось, что XIX и особенно XX век благодаря достижениям науки расставили все на свои места. Мир стал более познаваем. С открытием структуры атомов и ядер проблема преобразования вещества превратилась в совершенно конкретную. Наука стала предельно прагматичной. Одновременно с этим появилась новая каста «научных борцов» (на этот раз «за чистоту науки») и только они обладали монополией на истину.

Вопрос был поставлен предельно четко. Все, что не соответствует «общепризнанным» канонам — это ересь (чем не возврат к временам инквизиции!). Определение «общепризнанности» часто дополняется утверждением о том, что так считает «научная общественность». Например, если большинство специалистов по горячему термоядерному синтезу утверждает, что низкотемпературный синтез невозможен, то это и есть истина. Только самым выдающимся ученым (на уровне Нобелевских лауреатов А. Д. Сахарова или Д. Швингера) можно было

высказывать свое мнение о принципиальной возможности таких процессов и не бояться быть обвиненными в поддержке «лженауки».

Но наши современники не во всем следовали принципам инквизиции. В наше время каноны науки можно открыто обсуждать. И сразу оказалось, что часть из них безусловно справедлива и, по-видимому, не подлежит существенному пересмотру (по крайней мере, на нашем уровне понимания природы). Незыблемыми остаются, например, законы сохранения и принцип причинности (но даже здесь надо соблюдать определенную осторожность, поскольку закон сохранения энергии справедлив с точностью до соотношения неопределенностей, а принцип детерминированной причинности заменяется в ряде случаев принципом вероятностной причинности). Теория, априори отрицающая эти фундаментальные законы, безусловно не может считаться достаточно обоснованной (по крайней мере в отношении тех объектов и явлений, где эти законы достоверно выполняются). Другие научные каноны оказались мифологизированными и соответствовали определенному уровню знания и научных открытий, хотя есть попытки превратить их в универсальные законы и применить ко всем известным физическим явлениям.

Такое понимание науки и легло в основу ее деления на «правильную» и «неправильную». К числу «неуниверсальных» канонов относились, например, «достоверно доказанные» утверждения о том, что сверхпроводимость при температуре более 30 К принципиально невозможна (с открытием высокотемпературной сверхпроводимости это утверждение благополучно было забыто) и что существование стабильных ядер за пределом «острова ядерной стабильности» с $Z=114-118$ невозможно (от последнего утверждения в самое ближайшее время также придется отказаться).

Еще один акт научных мифологизаций связан с априорным утверждением о том, что при больших энергиях характер ядерных взаимодействий не зависит от влияния окружающих объектов. Но всем макро- и микрообъектам присущи волновые свойства (обеспечивающие глобальный, а не локальный характер взаимодействий), поэтому вышеупомянутая концепция отнюдь не бесспорна. Об этом свидетельствует, в частности, эффект Мессбауэра, который продемонстрировал однозначную зависимость процессов взаимодействия γ -излучения с ядрами от макроскопических свойств матрицы. Более того, при взаимодействии релятивистских электронов с упорядоченной решеткой в условиях каналирования волновые свойства частиц проявляются тем сильнее, чем больше их энергия! Подобных экспериментальных «фокусов» есть множество и встречаются они в науке повсеместно.

Фактически наука оказалась «разобранной» между научными кланами, которые хотели обладать монополией на локальную истину в области своих профессиональных интересов. Приход «чужаков» с радикальными и отличными от «общепризнанных» взглядами строго карался научной общественностью.

А жизнь в науке между тем шла своим чередом. Множилось число экспериментов, не укладывающихся в прокрустово ложе, определенное иерархами от науки. До какой-то поры эти эксперименты можно было игнорировать или объяснять неконтролируемыми начальными условиями или инструментальными ошибками (это в лучшем случае), а то и называть откровенной фальсификацией. Справедливости ради следует отметить, что преднамеренные фальсификации тоже были. Увы, человек слаб и несовершенен. Но фальсифицированные результаты не попадали в «золотой фонд» науки. А когда количество фактов, выпадающих из разрешенных концепций, превысило некую критическую массу, нужно было осознать эти факты и дать им обоснованное объяснение.

А необычных фактов очень много. Часто они находятся прямо на поверхности, иногда спрятаны глубоко. Особо много аномальных наблюдений получено в пограничных областях науки, где тесно и неординарно переплетаются разные ее направления (например, биология, физика, химия). По большому счету, сама жизнь, понимаемая как форма существования белковых объектов, — большая загадка. Жизнь — антиэнтропийный процесс, создающий порядок в мире хаоса. Рассмотрение этого процесса как большой флуктуации ничего по сути не объясняет.

Не менее загадочно все, что касается процесса жизнедеятельности. Обратите внимание на стабильность ДНК: для этих молекул вероятность мутации не превышает 10^{-7} вне зависимости от локальных условий и состава питательной среды. Невозможно объяснить эту фантастическую надежность воспроизводства жизни в пределах всего спектра внешних условий одной только деятельностью контролирующей этот процесс ДНК-полимеразы. В питательной среде могут отсутствовать необходимые химические элементы, могут изменяться внешние условия, а процесс неискажаемого и безмутантного воспроизводства неизменно идет с той же большой эффективностью! Даже сверхсильные радиационные поля не могут его нарушить. Бактериальная культура *Deinococcus Radiodurans* комфортно себя чувствует, размножается и не мутирует в радиационных полях, обеспечивающих дозу, превышающую 10 Мрад. Такую дозовую нагрузку не

выдерживают многие конструкционные материалы (не говоря уже о таком материале, как кристаллический кремний, который является основой микроэлектронной информатики и который при такой нагрузке полностью деградирует, теряет свои уникальные полезные свойства), а сложнейшая биологическая субстанция, основанная на генной информатике, живет и развивается! Складывается впечатление, что биообъекты имеют внутренний контроль своей высокой стабильности — некий надежный саморегулятор, отсутствующий у объектов неживой природы. Как это происходит? Где этот внутренний «механизм»? Каковы пределы саморегуляции? Можно ли этими процессами управлять?

Мы сделали попытку обсудить некоторые из поставленных здесь вопросов и дать ответы на них. При этом рассмотрены механизмы, способные обеспечить процессы ядерной трансмутации элементов в растущих биологических системах. Фактически сделана попытка представить живой объект в качестве естественного ядерного микрореактора, способного с высокой эффективностью осуществлять процесс превращения ядер в явно «нереакторных» условиях (комнатная температура, нормальное, т. е. атмосферное, давление, отсутствие нейтронов и заряженных частиц высокой энергии).

Почему живая система, кажущаяся хрупкой и критичной к внешним условиям, способна осуществлять тот процесс, который явно нереализуем (по крайней мере с сопоставимой эффективностью) в объектах неживой природы? Как она это делает? Зачем она это делает?

При ответе на эти вопросы мы исходили только из надежно установленных фактов и опирались на методы современной науки. Мы не сочиняли новых мифов, а исходили из основополагающего принципа «не творить сущности сверх необходимых» и старались объяснить все факты на основе уже апробированных методов, а не вводить (как часто делается) новую радикальную теорию для каждого нового факта. В этом мы были безусловными консерваторами. По этой причине мы не считаем, что совокупность обсуждаемых здесь явлений может быть названа «биологической трансмутацией». Такое название имеет (передает, транслирует) полумистический оттенок природы этого явления, что ни в коей мере не отражает сути. На самом деле трансмутация ядер (изотопов) в биологических системах идет по строгим законам физики, но при этом стимулируется некоторыми динамическими особенностями метаболизма и структуры биологических объектов, выполняющих роль своеобразных квантовомеханических катализаторов ядерных превращений.

В нашей работе процессы трансмутации изотопов в растущих биологических системах рассмотрены в трех своеобразных разрезах:

- 1) как совокупность экспериментальных фактов низкотемпературной трансмутации изотопов;
- 2) как процесс, базирующийся и анализируемый на конкретной ядерно-физической основе;
- 3) как биохимический процесс в живых системах.

Мы старались в меру нашего понимания показать, что природа едина, а потому бессмысленно отделять процессы в живой динамичной материи от эффектов в статичном окружении и противопоставлять их. В то же время, следуя своей главной идеи, мы хотели показать, что именно динамичный и самоорганизуемый живой мир только и может дать ответ на многие вопросы эволюции вещества.

В заключение мы хотим выразить искреннюю признательность и благодарность нашим друзьям и коллегам, которые принимали участие в этих исследованиях. Активное сотрудничество с И. И. Самойленко, С. И. Рейманом, Г. А. Зыковым, А. Б. Таширевым, Р. Н. Кузьминым, Е. С. Василенко, А. В. Сыроешкиным, А. М. Покидышевым способствовало появлению этой книги. Мы также признательны участникам Всероссийского семинара «Проблемы низкотемпературного ядерного синтеза» и его руководителям Ю. Н. Бажутову и Н. В. Самсоненко за многолетние «стимулирующие» дискуссии по проблеме трансмутации изотопов.

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. ИСТОРИЯ ЭФФЕКТА ТРАНСМУТАЦИИ

Проблема трансмутации и синтеза химических элементов в «до-ядерный» научный период имеет свою историю и мифологию, своих сторонников и противников. В значительной степени сама проблема обязана своим появлением алхимическому периоду, его критическому анализу. В алхимии оказались причудливо смешаны рациональное эмпирическое знание о химических процессах и традиционная для средних веков мистика. Знание в конечном итоге оказалось превалирующим и вошло как составная часть в современную химию. Постепенно были сформулированы фундаментальные законы химии, при соблюдении которых сама постановка вопроса о возможности трансмутации элементов была противозаконна. Эти законы, по большому счету, связаны с сохранением некоторых величин (среди которых главное место занимает энергия). Такое обстоятельство резко сузило область проявления трансмутации, но не запретило этот процесс. Необходимо отметить, что проблема трансмутации химических элементов в биологических объектах лежала, как правило, вне пределов интересов как средневековой науки, так и в последующем науки «доядерной». Это было в значительной степени связано с теологическими представлениями того времени, противопоставляющими живые объекты их неживому окружению.

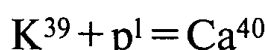
Ситуация сохранялась неизменной вплоть до 30-х годов XX столетия. По мере познания структуры ядра и природы внутриядерного взаимодействия стало все более очевидным, что хотя химические свойства элементов вызваны почти исключительно поведением валентных электронов, сама природа этих элементов (а в конечной степени и характеристики валентных и других электронов внешних оболочек) связаны с ядерными характеристиками изотопов.

Особое место в хронологии экспериментов по трансмутации химических элементов (изотопов) в биологических объектах занимает цикл

работ Луи Керврана (Kervran, 1963, 1966, 1968, 1998), который первым провел систематические исследования в этом направлении.

Кервран приводит очень много примеров аномального изменения химического состава разных биологических объектов в процессе их роста, объясняя это поведение на основе представлений о трансмутации химических элементов.

Например, в качестве одной из важнейших была рассмотрена реакция трансмутации калия в кальций в биологической системе в присутствии водорода (с участием протона):



Приведенные экспериментальные зависимости убедительно иллюстрируют этот процесс (рис.2.1). Показано, что содержание калия и кальция в процессе проращивания семян изменяется (проанализировано 840 семян, из которых выросло 403 ростка). Видно, что потеря массы калия ($\Delta M_{\text{K}} = -0,033 \text{ г}$) и прирост массы кальция ($\Delta M_{\text{Ca}} = 0,032 \text{ г}$) примерно равны по величине. В то же время масса магния (Mg) остается практически неизменной.

Кервран рассматривал также много других реакций трансмутации изотопов, среди которых можно отметить несколько наиболее важных

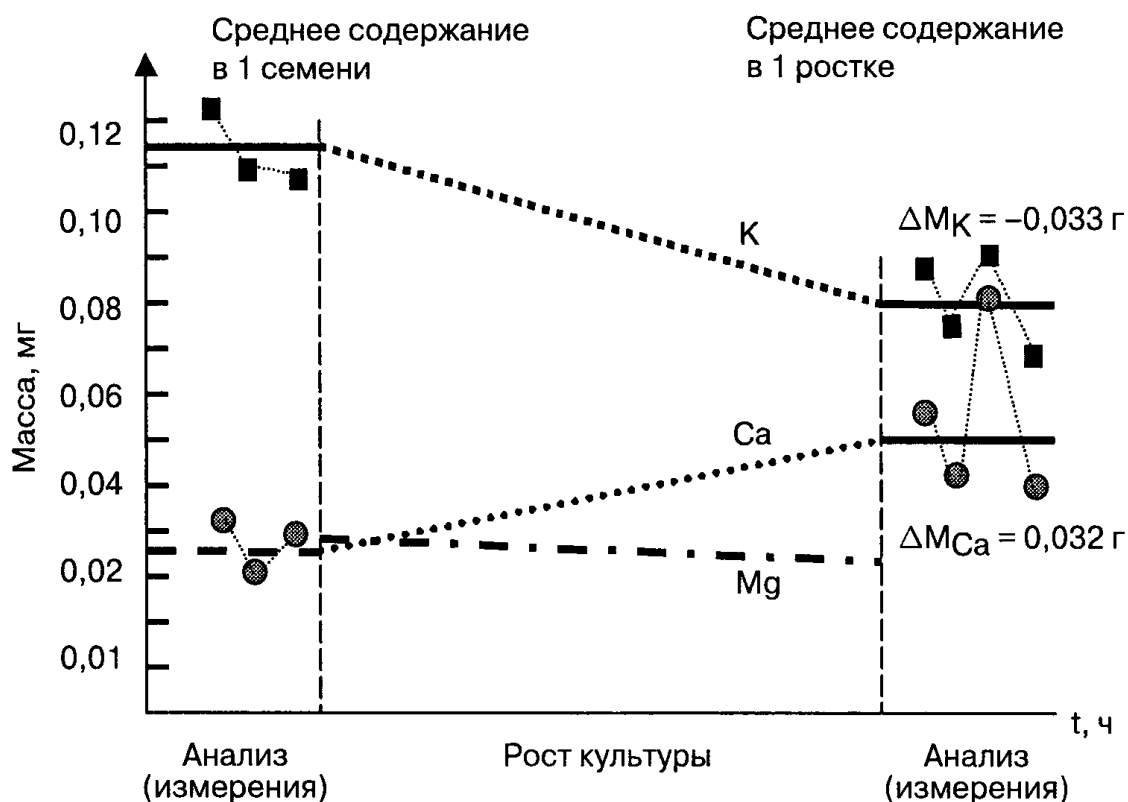
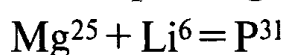
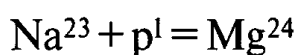
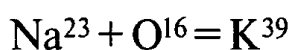
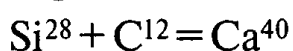
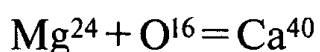
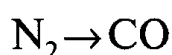


Рис. 2.1. Изменение содержания К, Са и Mg при проращении семян (в центре). Слева и справа — результаты измерений по трем сериям и средние результаты

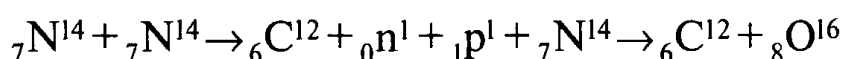
для процесса жизнедеятельности с образованием жизненно необходимых элементов Ca, K, Mg, P:



а также реакцию трансмутации в пределах одной молекулы:



что соответствует следующему двухстадийному преобразованию изотопов:



Последнюю реакцию он рассматривал как процесс перехода протона и нейтрона в молекуле N_2 от одного ядра азота к другому (с преобразованием одного ядра азота в углерод, а другого — в кислород); при этом было высказано предположение, что этот процесс может иметь место в условиях дефицита углерода в биологической системе.

Чтобы подтвердить протекание реакции синтеза $\text{Na}^{23} + \text{O}^{16} = \text{K}^{39}$ Кервран рассмотрел опубликованные экспериментальные данные (Julien, 1959). Согласно этим данным, при помещении рыбы (линя) в воду, содержащую 1,4% поваренной соли NaCl , в течение 4 ч происходило увеличение общей концентрации KCl на 36% от начального значения 3,95 г/л до 5,40 г/л. Изменение содержания NaCl и KCl в крови линя за это же время представлено на рис. 2.2.

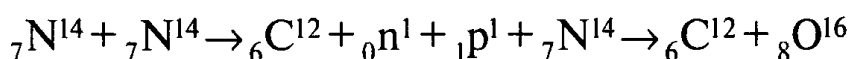
Кервран приводит много подобных примеров (в том числе из области ботаники, прикладного сельского хозяйства, птицеводства и др.). При этом он также обращает особое внимание на возможность использования биологических систем благодаря трансмутации нестабильных элементов в стабильные для утилизации радиоактивных отходов. В качестве возможного примера Кервран обсуждает процесс культурального роста *Klebsiella aerogenes* в среде, содержащей радиоактивный изотоп Hg^{203} с периодом полураспада 46,6 дней в форме химического соединения HgCl_2 . Результаты этих экспериментов (Magos, 1964) показали, что спад радиоактивности в системе с растущей культурой в течение 16 ч протекал быстрее, чем следовало бы ожидать при естественном спонтанном распаде. Для измерения радиоактивности был использован обычный счетчик Гейгера. Авторы этой работы объясняли отклонение от зако-

на радиоактивного распада с физическим процессом — выделением из системы, т. е. улетучиванием, соединения, содержащего активную ртуть. Кервран высказал предположение, что в этом случае наблюдался эффект трансмутации радиоактивного изотопа Hg^{203} в нерадиоактивные ядра.

Подводя итоги, можно отметить, что Кервран анализировал возможные схемы преобразования элементов и изотопов, применяя очевидные алгебраические правила к реакции с нуклонами: баланс числа протонов. Такой подход (если опустить возможное сопутствующее взаимопревращение нуклонов с учетом слабых взаимодействий) не может вызывать особых возражений.

Вместе с этим, модельные представления Керврана о структуре ядер и возможных путях их преобразований были очень далеки от общепринятых и современных представлений ядерной физики.

В частности, при рассмотрении анализируемой выше реакции



он рассматривал, что переход протона и нейтрона в молекуле N_2 от одного ядра азота к другому происходит на поверхности клетки или в объеме мембраны при стимулирующем силовом воздействии неизвестного фермента. Это типичный биохимический прием — любой новый и ранее неизвестный эффект приписывать новому неизвестному ферменту. Такой способ (постулирование нового фермента) фактически ничего не решает и не дает никакого ответа, но зато придает некоторую видимость научного подхода.

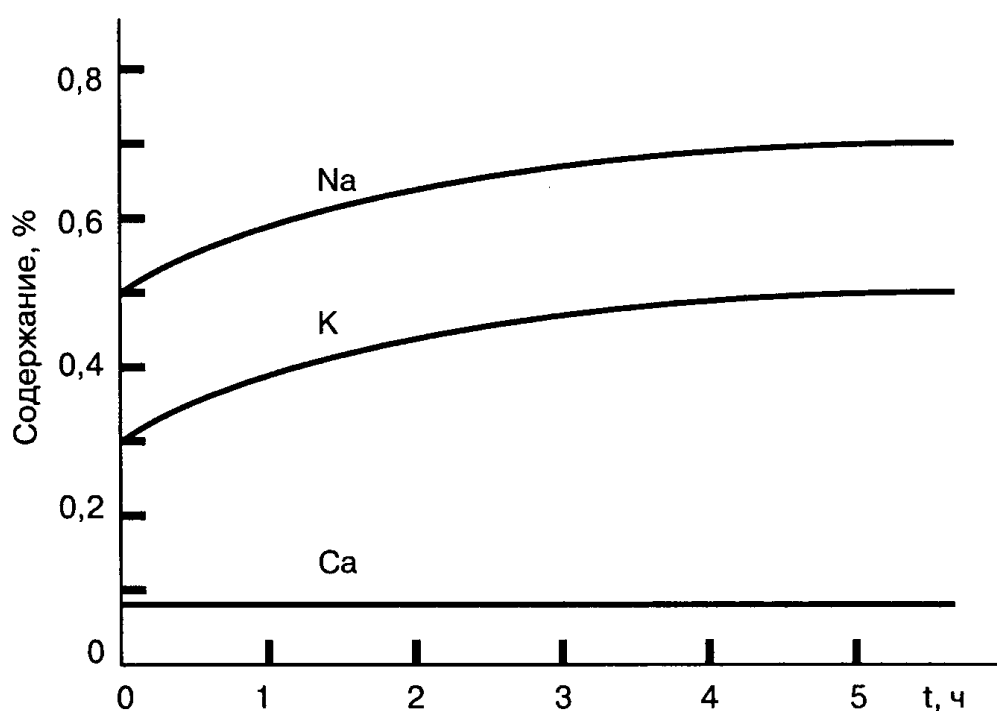


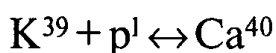
Рис. 2.2. Изменение содержания Na, K и Ca в крови рыбы линь, если ее поместить в 1,4%-ный водный раствор NaCl

Однако в данном случае такой способ явно неприемлем, поскольку действие любого фермента обусловлено его влиянием на внешние электроны и соответствует масштабу энергетического воздействия на уровне 0,1–0,5 эВ. В случае ядерных превращений необходимы воздействия выше 100 кэВ!

Необходимо также отметить, что хотя Кервран и понимал значение и специфику рассмотрения трансмутации именно определенного изотопа (а не просто химического элемента), но в опубликованных им работах эта специфика часто носила чисто формальный характер и это была скорее дань необходимой полноты формальной записи, а не отражение самой сути процесса ядерных преобразований.

Этот факт формализованного отношения к специфике изотопного состава сразу становится очевидным, если привести часто используемое им понятие обратимости процесса трансмутации, что позволяло ему без особых обоснований постулировать неприемлемую в ядерной физике обратимость пороговых ядерных реакций, где нарушается закон сохранения энергии.

Например, он постулировал возможность протекания обратной реакции трансмутации кальция в калий при изменении внешних условий (например, при инверсии содержания калия и кальция в окружающей среде):

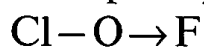


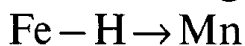
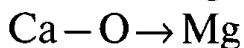
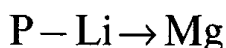
Однако обратимость этого и подобных процессов несовместима с законом сохранения энергии. Если в случае прямой реакции синтеза Ca^{40} происходит выделение энергии $\Delta E = 8,326 \text{ МэВ}$ на каждый акт трансмутации (она является беспороговой и энергетически выгодной) и ее протекание не запрещено законом сохранения энергии, то обратная реакция является пороговой и может протекать только в том случае, когда исходное ядро Ca^{40} получит энергию, не меньшую тех же 8,326 МэВ. Вероятность того, что живая культура, существующая и развивающаяся при температуре $T \approx 300\text{--}340 \text{ К}$, получит флуктуационным путем такую дополнительную энергию, равна невообразимо малому числу:

$$W \approx \exp(-\Delta E/KT) \approx 10^{-1000000000}$$

т. е. во Вселенной за все время ее существования не найдется ни единого случая такого возбуждения! Очевидно, что такая обратная реакция фактически является абсолютно невозможной (особенно для случая одновременного протекания ее в большом количестве ядер).

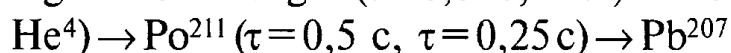
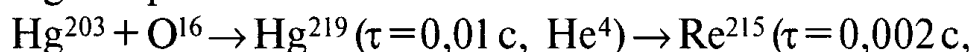
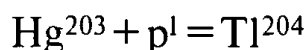
Таких некорректных примеров в работах Керврана можно найти немало. Например, анализируемые им реакции прямого деления изотопов





которые, по его мнению, могут протекать в живых системах, являются эндотермическими и пороговыми и могут идти в указанном направлении с уменьшением атомного номера только с поглощением очень большой дополнительной энергии 5–20 МэВ на каждое единичное преобразование. Свести такой процесс к воздействию неизвестного фермента невозможно. Источник такой свободной энергии в живых системах отсутствует!

Аналогичные аргументы можно высказать и в отношении предлагаемой Кервраном трактовки процесса уменьшения радиоактивности среды, содержащей радиоактивный изотоп Hg^{203} . При этом выводы основывались на регистрируемом отклонении от закона радиоактивного распада, наблюдаемом в течение 16 ч в эксперименте (Magos, 1964). Спектр спонтанного распада этого ядра соответствовал испусканию быстрых электронов с энергией 214 кэВ и γ -квантов с энергией 279 кэВ. Если принять трактовку Керврана о быстрой трансмутации Hg^{203} в нерадиоактивный изотоп, то наиболее естественным является предположение о том, что в процессе такой трансмутации также должны участвовать прежде всего те изотопы, концентрация которых в среде максимальная, т. е. ядра водорода p^1 и кислорода O^{16} :



В результате образуется нестабильный долгоживущий изотоп Tl^{204} ($\tau = 3,78$ года) и происходит цепочка ядерных превращений, сопровождаемых испусканием α -частиц. Конечным итогом является образование одного из стабильных изотопов свинца.

Эти реакции действительно могли бы привести к уменьшению радиоактивности, но их осуществление в условиях данного эксперимента невозможно. Все эти реакции являются пороговыми и требуют большой дополнительной энергии (8,2 МэВ в случае реакции с участием протонов и 39,4 МэВ в случае реакции с участием кислорода). Этой дополнительной энергии в системе нет и, следовательно, такие реакции принципиально неосуществимы.

По-видимому, более реально предположение о том, что уменьшение скорости счета в некоторые моменты культурального роста связано с возможным пространственным перераспределением растущей культуры с появлением нестационарных негомогенностей (неоднородностей)

и другими пространственно-временными эффектами. Например, при увеличении массы культуры в результате роста в приповерхностном слое (кюветы) происходит естественное уменьшение концентрации соли HgCl_2 в этой же области (соль окажется вытесненной в другие области) и длина пути, который должны проходить быстрые электроны продуктов распада Hg^{203} до поверхности и далее до счетчика Гейгера, возрастает. В результате происходит торможение в объеме среды быстрых электронов, испускаемых изотопом Hg^{203} и, в итоге, поток этих электронов за пределами среды уменьшается. Сильное торможение электронов в воде приводит к тому, что фактически регистрируются только те электроны, которые испускаются источниками, находящимися в приповерхностном слое. С учетом того, что регистрация с помощью счетчика Гейгера не позволяет разделить кванты и быстрые электроны в этих условиях фиксируется уменьшение активности среды. После завершения роста культуры (например, из-за отравления питательной среды продуктами метаболизма) может происходить естественное оседание или гомогенизация выросшей культуры по всему объему среды, что сразу должно приводить к перераспределению соли HgCl_2 по объему и естественному возрастанию ее концентрации в приповерхностном слое, т. е. регистрируется возрастание числа быстрых электронов и закон спонтанного распада уже не нарушается. Разумеется, это только один из возможных сценариев объяснения отклонения спонтанного распада от неэкспоненциальной зависимости и подтверждения существования эффекта утилизации биологической системой радиоактивных изотопов с преобразованием их в нерадиоактивные необходимы уточняющие эксперименты и рассмотрение альтернативных механизмов. Для однозначных выводов об эффекте утилизации необходимо определить изотопный состав культуры или питательной среды после завершения культурального роста. Однако все без исключения экспериментальные данные, приводимые в работах Керврана, были получены только химическим (элементным) анализом. Ни в одном из многочисленных экспериментов по трансмутации стабильных или радиоактивных изотопов, анализируемых или проведенных Кервраном, не был сделан изотопный анализ продуктов реакций трансмутации, хотя никаких реакций трансмутации ядер, кроме тех, которые связаны с преобразованием изотопов быть не может!

Фактически само понятие химического элемента — просто удобная форма логического обобщения совокупности разных изотопов. И если при обсуждении одних взаимодействий такое обобщение может быть сделано, то в других случаях это принципиально неприменимо! Особо это относится к ядерно-физическим процессам, когда свойства разных изотопов одного и того же химического элемента ничуть не ближе, чем

свойства изотопов разных элементов! Однако ни в одном из анализируемых Кервраном экспериментов и примеров не был определен исходный (до начала реакции) и конечный (после ее завершения) относительный изотопный состав, хотя без проведения такого анализа бессмысленно говорить об реакции трансмутации. С помощью химических методов анализа получают данные только об элементном составе, но в процессе трансмутации всегда изменяется именно изотопный состав!

Прямым продолжением экспериментов Керврана были работы его ученика Комаки (Komaki, 1965, 1967, 1992), посвященные исследованию процессов трансмутации химических элементов в растущих микробиологических культурах. К этим работам полностью применимы те же замечания, которые относятся к исследованиям Керврана. Комаки также изучал именно трансмутацию изотопов, но ни в одном из экспериментов не был определен исходный (до начала реакции) и конечный (после ее завершения) относительный изотопный состав, а исследования ограничились только определением изменения соотношения химических элементов.

Необходимо сделать еще одно замечание, относящееся к собственно названию эффекта трансмутации, которое дает ему Кервран. Во всех своих работах он называет процесс преобразования элементов явлением биологической трансмутации. Именно так он понимал суть процессов трансмутации. Он, в частности, утверждал, что специфические биологические законы не могут быть напрямую сведены к физическим, поскольку все законы физики были выведены из экспериментов, сделанных на неживой природе.

По нашему мнению, нет никаких оснований считать процесс преобразования изотопов и элементов биологической трансмутацией и отделять его от физического понятия трансмутации как процесса преобразования изотопов, основанного на законах физики. Мы считаем, что все наблюдаемые изотопные эффекты (в том случае, когда они действительно имеют место и подтверждены адекватными и достоверными измерениями) можно охарактеризовать как «обычный» процесс трансмутации изотопов и элементов, который протекает в биологических системах и эффективность которого определяется именно спецификой таких систем. Более детально вопрос о том, существует ли некая специфика биологических объектов, позволяющая стимулировать протекание ядерных процессов, будет детально рассмотрен ниже в главе, посвященной теоретическим аспектами процесса трансмутации. Там же будет рассмотрен вопрос о том, какой механизм может обеспечить протекание реакций синтеза при трансмутации в растущих микробиологических культурах.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ БИОСИСТЕМ И ЕГО ВЛИЯНИЕ

Как видно из предыдущего рассмотрения, процесс трансмутации химических элементов в биологических системах представляет собой, в первую очередь, процесс ядерного преобразования изотопов. Возникает ряд закономерных вопросов. Представляют ли изотопы специфический интерес для жизненного цикла биосистем? Может ли иметь биосистема изотопное соотношение, отличное от соотношения в других природных объектах?

При ответе на поставленные вопросы необходимо рассмотреть не только общие сведения о метаболизме, но и привлечь данные об изменении изотопного состава при трансмутации изотопов. Очевидно, что о достоверных данных при исследовании трансмутации можно говорить только тогда, когда наблюдаемые изменения в системе существенно превосходят любые отклонения, которые следуют из естественных изотопных вариаций, обусловленных различием физико-химических свойств изотопов.

На первый взгляд, кажется, что поскольку процесс жизнедеятельности — это в основном совокупность биохимических процессов с участием валентных электронов, на которые изотопный состав ядра не оказывает существенного влияния, то изотопный состав конкретного химического элемента не должен оказывать существенного влияния на жизнедеятельность организмов и все изотопы одного и того же химического элемента должны проявлять себя в биосистеме примерно одинаково. Этот простой подход лежит в основе метода изотопных индикаторов, частным случаем которого является метод «меченых атомов», имеющий важное значение; в качестве «меток» используются радиоактивные изотопы — химические аналоги стабильных изотопов того же химического элемента.

Следует ожидать, что соотношение изотопов в живых объектах должно соответствовать аналогичному соотношению в химических элементах небиогенного происхождения. Однако прямые эксперименты обнаруживают существенные отклонения изотопного состава в различных живых организмах, причем изотопный состав оказывает существенное влияние на ряд жизненных процессов.

Можно выделить несколько основных механизмов, приводящих к изотопным аномалиям. Частично эти механизмы были подробно обсуждены в работе (Галимов, 1981).

1. Кинетический изотопный эффект обусловлен различием скоростей атомов (молекул) разных изотопов при одной и той же тепловой энергии. К этому механизму также относятся эффекты, связанные с тем, что химические связи, образуемые при участии более тяжелого изотопа, прочнее, чем связи, включающие присутствие более легкого изотопа. Различие в прочностях этих связей имеет простое квантовомеханическое обоснование и обусловлено тем, что уровни энергии любой более тяжелой частицы в потенциальной яме, характеризующей взаимодействие этой частицы с соседями, расположены ниже, чем уровни, определяющие состояние более легкой частицы. Фактически это обусловлено постоянством минимальной порции (кванта) фазового объема

$$\Delta\Gamma = \int d^3p \int d^3x = (2\pi\hbar)^3,$$

где $p = mV$ — импульс частицы. Видно, что при увеличении массы частицы (при прочих неизменных условиях) область ее локализации закономерно уменьшается и $\int d^3x \sim 1/m$, что позволяет частице находиться ближе к дну потенциальной ямы. Это обстоятельство приводит к увеличению энергии активации более тяжелых частиц E^* и уменьшает скорость термостимулированных реакций:

$$v/v^* = \sqrt{(m^*/m) \exp[-(E - E^*)/kT]}$$

В силу этого продукты реакции обогащаются легкими изотопами, а остаток, не принявший участия в реакции, — тяжелыми.

2. Термодинамический изотопный эффект связан с тем, что наличие более тяжелых изотопов приводит к меньшему запасу свободной энергии системы, чем в случае более легких изотопов. В значительной степени этот эффект, как и предыдущий, связан с более низким положением уровней энергии более тяжелых изотопов в общем силовом поле системы.

3. Ядерно-спиновый изотопный эффект связан с особенностями протекания спин-зависимых процессов, т. е. в конечном итоге определяется принципом Паули. Основная особенность этого механизма состоит в том, атомы и молекулы взаимодействуют через внешние (и, как правило, валентные) электроны, но при квантово-статистическом подходе к комбинированным системам (например, ядро плюс электроны) определяющим моментом является суммарный спин всех электронов и ядра. Таким образом, изменение спина ядра (что имеет

место у разных изотопов) непосредственно влияет (причем очень значительным образом) на статистическое распределение и взаимодействие атомов и молекул.

4. Пространственно-конформационные эффекты обусловлены тем, что небольшие изменения пространственной структуры атомов и молекул при изотопическом изменении массы ядра в случае периодически упорядоченных систем таких атомов и молекул могут приводить к большим накопительным эффектам. Такие эффекты имеют место, например, в случае взаимодействия пространственно-упорядоченных биомолекул большого размера с тяжелой или легкой водой и будут более детально рассмотрены ниже.

В биологии подробно рассмотрены вариации изотопного соотношения для некоторых наиболее важных элементов — углерода, кислорода, водорода, азота, серы (например, (Галимов, 1981)).

Например, природные вариации по углероду изотопного соотношения C^{12}/C^{13}

$$\delta_C = \{(C^{12}/C^{13}) - (C^{12}/C^{13})_{\text{стандарт}}\} / (C^{12}/C^{13})_{\text{стандарт}}$$

достигают 12%; вариации этих же величин в живых организмах ниже на $-1,5$ – $3,5\%$. В качестве стандартного эталона изотопного отношения $(C^{12}/C^{13})_{\text{стандарт}}$ были выбраны окаменелые останки архикультуры мелового периода *Belemnitella americana*. Для сравнения можно указать, что изотопный состав атмосферной углекислоты соответствует величине $\delta_C = -0,7\%$, а осадочные карбонаты характеризуются природными вариациями от $\delta_C = -0,5\%$ до $\delta = 0,5\%$. Для живых организмов интервал δ разный для разных биохимических компонентов. Например, липиды обогащены легкими изотопами (для них δ_C лежит в интервале от $\delta_C = -0,8\%$ до $\delta_C = -3\%$), а для белков и углеводов δ_C равна (в среднем) значению δ_C для всей биомассы.

Стандартом для изотопного отношения водорода и кислорода принят средний изотопный состав мирового океана (SMOW), для изотопов азота — азот воздуха, а для серы — троилитная сера метеорита Каньон Дьявола (MCD).

Изотопное отношение по кислороду (для двух основных изотопов) $\delta_O = \{(O^{16}/O^{18}) - (O^{16}/O^{18})_{\text{стандарт}}\} / (O^{16}/O^{18})_{\text{стандарт}}$ в атмосферной углекислоте равно $\delta_O = 4,1\%$. Кислород атмосферы обогащен тяжелым изотопом O^{18} и $\delta_O = 2,4\%$, что превышает отношение для морской воды, для которой в среднем $\delta_O = 0$. В водной среде кислород углекислоты находится в изотопном термодинамическом равновесии с кислородом воды. Изотопный состав водных растений соответствует δ_O в интерва-

ле 1,4–2,8%. Изотопный состав растений суши существенно зависит от температуры среды обитания. При высокой внешней температуре происходит связанное с испарением воды обогащение живых организмов тяжелыми изотопами. В целом наземные растения характеризуются $\delta_o = 1,5–3,5\%$.

В случае изотопов водорода изотопный эффект имеет особое значение. Как известно, уникальность стабильных изотопов водорода (H и D) состоит в том, что их массы различаются в два раза. Для сравнения укажем, что все остальные, существенные для биологии элементы имеют стабильные изотопы, отличающиеся по массе не более, чем на 1–7%. Вследствие такого различия по массе изотопов водорода степень разделения этих изотопов, благодаря естественному фракционированию может быть очень большой. Более того, эти изотопы ведут себя по-разному в биохимических реакциях. Особо четко это различие проявляется при анализе действия на биомолекулы легкой и тяжелой воды.

В настоящее время считается надежно установленным, что структура воды соответствует трехмерной тетраэдрической системе водородных связей и идентична структуре льда.

Основное отличие структуры жидкой воды от льда заключается в разрыве части этих связей под действием тепловых колебаний решетки. Если во льду на 1 моль молекул воды приходится 2 моль водородных связей, то, по данным инфракрасной спектроскопии (Buijs, 1963), при плавлении льда разрывается 46% этих связей. Причем молекулы с двумя связями составляют всего лишь 33% всех молекул, молекулы с одной связью — 41%, молекулы, не образующие водородных связей, — 27% (приняты во внимание лишь связи протонов одной молекулы с соседними молекулами). Разрыв водородных связей приводит к заполнению пустот трехмерной структуры льда молекулами воды. Упаковка молекул делается более плотной, что ведет к увеличению координационного числа. Кооперативный механизм образования водородных связей между молекулами воды определяет исключительно важное свойство воды, отличающее ее от остальных жидкостей, — ассоциативный характер ее структуры.

Таким образом, при комнатной температуре в воде более половины возможных водородных связей разорвано. Однако равномерное распределение разорванных связей по молекулам не является выгодным из-за кооперативного характера их образования. Минимуму энергии соответствует процесс замыкания связей, что приводит к образованию в микрообластях ассоциатов с максимальным числом водородных свя-

зей на молекулу, а следовательно, со структурой, близкой к структуре льда, обеспечивающей такое максимальное количество связей. Такие ассоциации оказываются неустойчивыми. Локальные флуктуации энергии приводят к их распаду и флуктуационному возникновению новых упорядоченных ассоциатов — кластеров. Время жизни кластера — порядка 10^{-10} с, что соответствует около 10^3 молекулярных колебаний.

Модель таких «мерцающих кластеров», рассмотренная впервые Франком и Вэном (Frank, 1957, 1958), в дальнейшем развита Немети и Шерага (Nemethy, 1962) и в настоящее время является, по-видимому, наиболее разработанной структурной моделью воды.

Очевидно, что параметры трехмерной тетраэдрической системы водородных связей (как и параметры «мерцающих кластеров») существенно зависят от массы и размеров молекул воды, которые различаются в случае «легкой» (H_2O) и «тяжелой» воды D_2O .

В системе, учитывающей взаимодействие ДНК с такой псевдокристаллической водой, структура обычной (легкой) воды идеально согласована со структурой ДНК. Это явилось следствием процесса эволюции.

Удаление воды приводит к разрушению даже такой прочной структуры, как двойная спираль ДНК. По-видимому, этот вопрос был впервые детально изучен в работе (Sutherland, 1957). Структура обезвоженной молекулы ДНК очень похожа на структуру денатурированной, но полностью восстанавливается при 75%-ной относительной влажности, когда содержание сорбированной воды составляет 50% от сухого веса, т. е. на нуклеотид приходится 10 молекул воды.

Замена обычной (легкой) воды на тяжелую приводит к рассогласованию пространственных периодов псевдокристаллической структуры воды и структуры поверхности ДНК, что сразу приводит к появлению больших продольных (вдоль оси ДНК) деформационных напряжений и изменению продольного периода ДНК.

Особо важное значение имеют такие деформации при синтезе ДНК, поскольку возникающие при этом искаженные комплиментарные пары нуклеотидов воспринимаются ДНК-полимеразой, контролирующей процесс синтеза ДНК, как дефектные (мутантные), что ведет к их уничтожению. Следствием таких действий будет замедление процесса репликации и возникновение мутантных пар нуклеотидов.

По-видимому, именно такой механизм пространственного рассогласования периодической структуры ДНК и периодической структуры тяжелой воды является одним из основных факторов проявления изотопного эффекта при замене водорода на дейтерий в составе воды.

С увеличением атомного номера и заряда химического элемента относительная разница в проявлении влияния изотопного состава на биохимические процессы становится все менее существенной, что автоматически приводит к тому, что для средних и тяжелых элементов изотопное отношение в неживом окружении и в объектах живой природы становится практически идентичным.

Таким образом, можно считать, что отклонение изотопного отношения для легких элементов в пределах

$$\delta_x = \{(X^{A+\Delta A}/X^A) - (X^{A+\Delta A}/X^A)_{\text{стандарт}}\} / (X^{A+\Delta A}/X^A)_{\text{стандарт}} \approx \pm 3-5\%$$

от «стандартного» значения (для которого $\delta_x = 0$) является вполне допустимым; изотопный эффект может быть связан с процессами естественного обогащения или обеднения конкретного химического элемента собственными изотопами и не свидетельствует о протекании в системе ядерных превращений. Очевидно, что вопрос об чисто ядерной природе изменения изотопного отношения (о ядерной трансмутации) может возникнуть только тогда, когда отклонение изотопного отношения химического элемента составляет величину, превышающую 10–20%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ И ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

4.1. ВЫБОР МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Гипотеза о возможности ядерной трансмутации химических элементов (изотопов) в физических, биологических и геологических системах при низкой энергии относительного движения взаимодействующих ядер неоднократно обсуждалась на протяжении последних десятилетий. Интерес к этой теме возрос после начала систематического изучения феномена холодного ядерного синтеза (ХЯС) на базе dd-реакций в твердых телах, хотя ни один из проведенных ранее экспериментов не дал полностью достоверных повторяемых результатов, подтверждающих существование ХЯС.

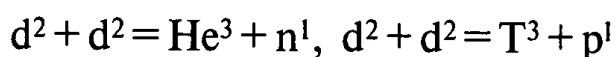
По нашему мнению это связано с неудачным выбором методики и объекта исследований.

Мы считаем оптимальной такую методику, при которой выполняется максимальное число условий стимуляции и обнаружения процесса трансмутации:

- 1) изотоп, получаемый в процессе трансмутации, в начальный момент (до проведения экспериментов) не должен содержаться в среде, где происходит ядерное превращение типа ХЯС (или его начальное содержание в качестве примеси контролируется с высокой точностью в начальных компонентах и конечных продуктах);
- 2) синтезируемый изотоп должен накапливаться в среде (для этого необходимо, чтобы он не соответствовал летучему химическому элементу);

- 3) ядра синтезируемого изотопа должны обладать такими характеристиками (спин, внутриядерные резонансные переходы, магнитный момент), которые существенно отличают (по массовому числу) их от соседних примесных изотопов того же или соседнего ядер.
- 4) метод регистраций должен характеризоваться, с одной стороны, максимальной чувствительностью, а с другой — обеспечивать уверенное выделение образуемые в результате ожидаемой ядерной реакции изотопов на фоне близких по химическим характеристикам примесных элементов и изотопов, т. е. обладать четко выраженными резонансными свойствами.

Этим требованиям не соответствует большинство проводимых ранее экспериментов по обнаружению феномена dd-ХЯС на основе регистрации нейтронов, трития или теплового эффекта в ядерных реакция синтеза с участием самых легких изотопов



В этих реакция интенсивность регистрируемого нейтронного излучения не превышала фонового значения, вызванного космическим облучением. Соответственно, ожидаемое накопление трития не превышало его начального примесного содержания в тяжелой воде D_2O , а тепловые эффекты в большинстве случаев объяснялись обычными электрохимическими процессами.

Этим же требованиям не удовлетворяют эксперименты Комаки по трансмутации легких химических элементов в биологических культурах (в них не контролировался начальный и конечный химический и изотопный состав и содержание примесей).

Очевидно также, что каждый отдельный метод регистрации не может обеспечить абсолютной достоверности процесса измерения. Например, метод масс-спектропии изотопов обладает высокой чувствительностью, но в ряде случаев может приводить к неоднозначности интерпретации результатов экспериментов, например, масс-спектр иона тяжелого изотопа мало отличается от масс-спектра иона многоатомной молекулы с тем же массовым числом. Альтернативный метод Мессбауэровской резонансной гамма-спектропии всегда однозначно идентифицирует изотоп, но сам эффект Мессбауэра применим только для весьма ограниченного числа изотопов.

Повышение надежности и достоверности измерений может быть достигнуто только благодаря использованию подходящего спектроскопического метода (в частности, лазерного масс-спектрометра, где в условиях высокотемпературной плазмы молекулы диссоциируют

до состояния отдельных атомных ионов), причем измерения следует проводить на нескольких спектрометрах разного типа.

Выбор объекта исследований также связан с условиями оптимизации процесса низкотемпературной трансмутации. Очевидно, что исследуемый биологический объект должен характеризоваться большой скоростью роста (быстрым набором массы), допускать возможность проведения большого числа независимых контрольных исследований и быть не очень критичным к температуре и химическому составу среды обитания. Кроме того, имея в виду последующую оптимизацию, желательно, чтобы он имел низкую чувствительность к радиационному воздействию, т. е. внешнему и внутреннему облучению ионизирующими полями разной природы (γ -излучение, быстрые электроны, нейтроны и др.).

Очевидно, что такой совокупности требований могут отвечать только микробиологические объекты, которые являются безусловными рекордсменами в живом мире по возможности приспособления к внешним условиям. Например, такая уникальная культура, как *Deinococcus radiodurans* выдерживает дозовую нагрузку в 10^6 — 10^7 рад, что не имеет аналога среди других живых объектов и позволяет рассматривать ее в качестве основного кандидата для трансмутации радиоактивных изотопов.

Выбор типа ожидаемой реакции и итогового изотопа также является предметом оптимизации. Существует множество привлекательных реакций синтеза, которые не ограничены энергетическими порогами, могут протекать при низкой энергии и хорошо согласуются с ограничениями, накладываемыми спецификой конкретного биологического объекта. В значительной степени их выбор связан с интуицией исследователя и его пониманием проблемы. Нужно также исходить из ограниченности ресурсов и времени. Итак, мы пришли к выводу, что целесообразным, с точки зрения максимальной достоверности и возможности последующей оптимизации, является всестороннее изучение на первом этапе такой совокупности реакций, которые разными путями приводят к изотопам железа. Такая задача решается в настоящей работе. Не в последнюю очередь это связано с тем, что авторы хорошо знакомы с эффектом Мессбауэра и техникой мессбауэровской спектроскопии, которая базируется (на 60—80%) именно на одном из изотопов железа. В то же время в работе рассматриваются и другие реакции, которые протекают попутно и независимо от синтеза железа в тех же культурах.

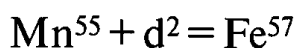
4.2. КОМБИНИРОВАННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ В РАСТУЩИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ МЕТОДАМИ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И МАСС-СПЕКТРОСКОПИИ

Целью проведенных экспериментов было обнаружение и исследование возможности протекания низкотемпературной трансмутации изотопов в растущих микробиологических культурах (Vysotskii, 1996).

Положив за основу требований необходимость однозначной регистрации, мы пришли к выводу о целесообразности использования в наших первых экспериментах эффекта Мессбауэра на базе изотопа Fe^{57} . Железо входит в состав большинства живых организмов. Важным является то обстоятельство, что для биологических объектов «обычный» изотоп Fe^{56} и редкий мессбауэровский изотоп Fe^{57} идентичны и неразличимы. При ядерно-физическом рассмотрении это совершенно разные ядра.

Первая серия экспериментов по биологической трансмутации изотопов была реализована нами с учетом возможности исследования результатов трансмутации несколькими независимыми методами.

Эти эксперименты основывались на ожидаемой реакции синтеза мессбауэровского изотопа Fe^{57}



в микробиологической культуре, растущей в дефицитной по железу водно-солевой питательной среде на основе тяжелой воды D_2O , куда дополнительно вводилась соль марганца. Несомненным преимуществом марганца является то, что он имеет единственный стабильный изотоп Mn^{55} . Это обстоятельство делает однозначной интерпретацию результатов эксперимента.

В результате ожидаемой ядерной реакции синтеза предполагалось образование редкого стабильного изотопа Fe^{57} , содержание которого в природе очень мало и составляет 2,2%.

Очевидное достоинство этой реакции состоит в том, что поскольку Fe^{57} является наиболее хорошо изученным мессбауэровским изотопом, то он может быть очень легко идентифицирован с помощью эффекта Мессбауэра. Накопление этого изотопа при увеличении эффективности и длительности реакции синтеза позволяет (по крайней мере в перспективе) изучать временные закономерности процесса трансмутации. Кроме того, поскольку природное содержание изотопа Fe^{57} мало, то его синтез легко фиксируется методами традиционной масс-спектропии на основе анализа изменения относительного распределения изотопов железа.

4.2.1. Исследование трансмутации изотопов в микробиологических культурах методом мессбауэровской спектроскопии

Эксперименты проводились на основе нескольких бактериальных культур (*Bacillus subtilis* GSY 228, *Escherichia coli* K-1, *Deinococcus radiodurans* M-1), а также дрожжевой культуры *Saccharomyces cerevisiae* T-8. Выбор этих культур был связан либо с экспериментально проверенной возможностью их роста в среде на основе тяжелой воды, либо с отмеченной выше перспективой использования радиационно-устойчивой культуры *Deinococcus radiodurans* M-1 в процессах трансмутации при наличии сильных радиационных полей.

Типичная серия экспериментов включала несколько последовательных операций.

Предварительно полученная культура после центрифугирования, тщательного промывания в дистиллированной легкой воде (H_2O) и предварительного стимулирующего подращивания помещалась в кювету с заданной сахарно-солевой питательной средой, содержащей базовые (присутствующие как в контрольных экспериментах, так и в экспериментах по трансмутации) соли Mg, Ca, K, тартрат аммония, сахарозу и 10 мл чистой воды (тяжелой воды D_2O в экспериментах по трансмутации, легкой воды H_2O в контрольных экспериментах). Состав питательной среды представлен в табл. 4.1.

Для исключения (ослабления) влияния примесей, содержание которых не контролировалось, для приготовления питательной среды использовались реактивы марки «х. ч.» (химически чистые). Т. е. содержание Fe во всем объеме питательной среды при единичном эксперименте не могло быть выше, чем $\Delta m_{Fe} \approx 1,1 \cdot 10^{-6}$ г. С учетом распространенности изотопа Fe^{57} в природе (2,2% общего количества железа) его возможное содержание в качестве примеси не могло быть выше, чем $\delta m_{Fe-57} \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ г (табл. 4.1).

В экспериментах по трансмутации к питательной среде на основе тяжелой воды добавлялись соль $MnSO_4$ в количестве, соответствующем $\Delta m_0 \approx 2 \cdot 10^{-4}$ г стабильного изотопа Mn^{55} , т. е. $N_0 = 1,8 \cdot 10^{18}$ атомов Mn^{55} . Общее количество примесного железа (как химического элемента) не превышало $\Delta m_1 \approx 10^{-8}$ г.

Перед приготовлением питательной водно-солевой среды все сухие компоненты (реактивы) исследовались на мессбауэровском гамма-спектрометре с целью контроля примесного содержания изотопа Fe^{57} .

Такие же предварительные исследования на мессбауэровском гамма-спектрометре были проведены с частью высушенной микробио-

Таблица 4.1. Состав питательной среды

Компоненты	Концентрация, %	Содержание Fe, %	Содержание Fe, г
Сахароза	3	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-7}$
$(\text{NH}_4)_2$ -тартрат	1	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,25	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-8}$
$\text{CaHPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,008	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
K_3PO_4	0,5	$5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (в экспериментах по трансмутации)	0,01	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Чистая вода (D_2O в экспериментах по трансмутации или H_2O в контрольных экспериментах)	100 (10 мл)	10^{-7}	10^{-8}

логической культуры перед ее использованием в экспериментах по трансмутации.

Во всех случаях содержание примесного изотопа Fe^{57} было ниже уровня регистрации (уровня чувствительности) мессбауэровского гамма-спектрометра, что соответствовало паспортным данным для используемых реактивов.

Типичная серия экспериментов по ядерной трансмутации изотопов в растущих микробиологических культурах состояла в одновременном выращивании одной и той же культуры в нескольких (как правило — четырех) кюветах (рис. 4.1)

Первая и вторая кюветы содержали базовые (неизменные) компоненты: сахарно-солевую питательную среду на основе легкой воды (H_2O) как без добавления соли MnSO_4 , так и в присутствии этой соли. Состав питательной среды в третьей кювете был приготовлен из тех же базовых компонентов питательной среды на основе тяжелой воды (D_2O), но без соли MnSO_4 . Соответственно, последняя четвертая кювета содержала как все необходимые для роста культуры базовые компоненты питательной среды, так и необходимую для трансмутации соль MnSO_4 и была приготовлена на основе тяжелой воды (D_2O).

Из приведенного состава необходимых для роста культуры питательных сред видно, что необходимая для трансмутации изотопная композиция содержалась только в одной (оптимизированной по изотопному и элементному составу) четвертой кювете.

Такая методика приготовления компонентов питательной среды, содержащей разные комбинации, позволила исключить возможное влияние примеси изотопа Fe^{57} на результат экспериментов.

В частности, если бы изотоп железа Fe^{57} присутствовал в качестве примеси в легкой или тяжелой воде, в составе базовых солей, а также входил в состав стекла кюветы или находился в воздухе, то этот изотоп извлекался бы в процессе роста культуры и фиксировался после выращивания культуры во всех кюветах (в том числе и в экспериментах в кюветах 1–3). Если бы изотоп Fe^{57} присутствовал только в тяжелой воде, то он фиксировался бы в культурах, выросших в кюветах 3 и 4. Если бы он присутствовал в составе соли MnSO_4 , то он был бы обнаружен в культурах, выросших в кюветах 2 и 4.

Мессбауэровские исследования показали, что изотоп Fe^{57} присутствует в регистрируемых количествах только в культурах, выращенных в кювете 4, т. е. при наличии всех необходимых для низкоэнергетического синтеза условий.

Такие серии экспериментов проводились для различных культур, разного времени выращивания (24, 48 и 72 ч) и различных режимов роста. Было обнаружено, что культуральный рост в среде на основе тяжелой воды требует обязательного применения непрерывного пере-

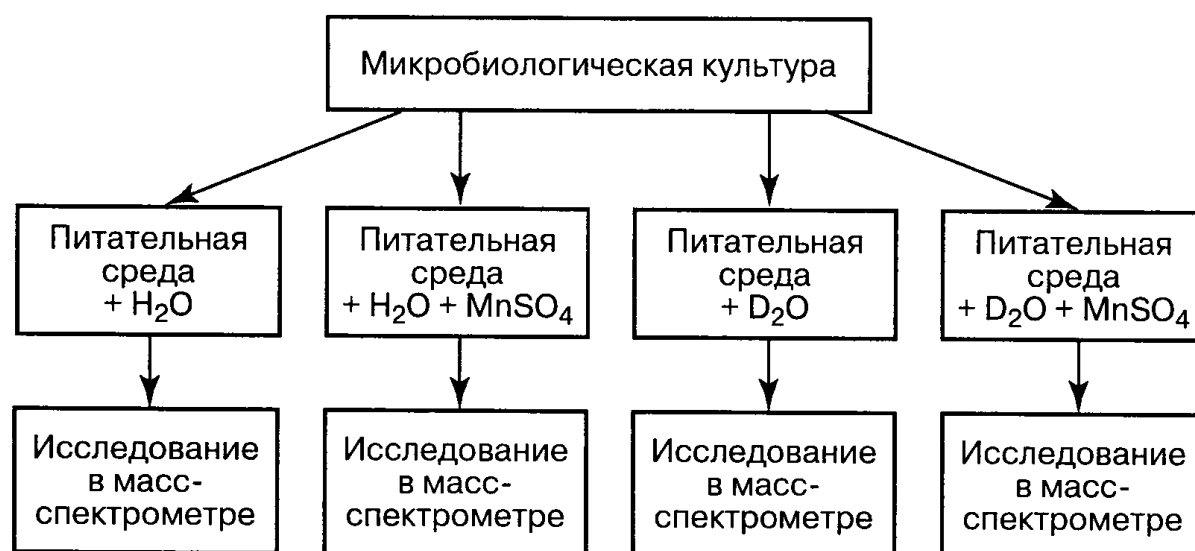


Рис. 4.1. Схема «перекрестных» экспериментов по исследованию явления ядерной трансмутации изотопов в растущих микробиологических культурах

мешивания среды в течение всего времени роста. Все культуры выращивались в термостате при оптимальной температуре 32° С.

После завершения каждой из серий полученная биологическая субстанция отделялась от питательной среды с помощью центрифуги, тщательно промывалась легкой дистиллированной водой (H₂O) и высушивалась. Сухая субстанция в виде тонкой пленки отделялась не содержащим железа стеклянным инструментом, перемалывалась в порошок и ее часть помещалась в мессбауэровский спектрометр (другая часть высушенной культуры использовалась для проведения независимого исследования на лазерном пролетном масс-спектрометре).

Для увеличения вероятности резонансного поглощения в мессбауэровском гамма-спектрометре в некоторых из экспериментов проводилось охлаждение части высушенной культуры до температуры жидкого азота (T = 78 К).

В качестве источника мессбауэровского излучения в гамма-спектрометре использовался изотоп Co⁵⁷ с активностью 30–40 мКи в матрице из хрома. Этот источник давал спектр гамма-излучения в виде единичной (нерасщепленной) гамма-линии естественной ширины с энергией 14,4 КэВ.

Для повышения чувствительности гамма-спектрометра использовался конверсионный детектор мессбауэровского резонансного гамма-излучения, что позволило увеличить чувствительность регистрации синтезируемого изотопа Fe⁵⁷ в $\alpha \approx 9$ раз по сравнению с традиционными (неконверсионными) гамма-детекторами (α — коэффициент внутренней электронной конверсии для мессбауэровского гамма-перехода в ядре Fe⁵⁷).

Процесс измерений в каждом из 256 каналов гамма-спектрометра проводился до получения $N_{\infty} = 3,5 \cdot 10^6$ отсчетов в каналах спектрометра, удаленных от гамма-резонансной линии. Такая статистика обеспечивала необходимую относительную точность измерений $\langle \Delta N \rangle / \langle N \rangle \approx 5 \cdot 10^{-4} = 0,05\%$.

На рис. 4.2,а представлен мессбауэровский спектр культуры *Saccharomyces cerevisiae* T-8, выращенной в течение $\Delta t = 72$ ч в оптимальной питательной среде, соответствующей кювете 4, т. е. содержащей необходимые для процесса трансмутации компоненты (D₂O и MnSO₄). Видно, что в спектре четко фиксируется наличие мессбауэровского изотопа Fe⁵⁷. Общая масса выращенной культуры в каждом эксперименте, составляла 0,3–0,5 г.

Спектр на рис. 4.2,б соответствовал той же культуре *Saccharomyces cerevisiae* T-8, но выращенной в кювете 2, содержащей среду на основе

легкой воды и при наличии соли MnSO_4 , а спектр на рис. 4.2,в — той же культуре, выращенной в кювете 3 (среда на основе тяжелой воды D_2O , но без добавления соли MnSO_4).

Из этих спектров следует, что количество изотопа Fe^{57} в культурах, выращенных в неоптимальных средах, соответствует фоновому значению и лежит ниже уровня регистрации.

Естественная ширина мессбауэровского резонанса в изотопе Fe^{57} (в единицах скорости) равна $\Gamma = 0,19$ мм/с.

В спектре на рис. 4.2,а для культуры, выращенной в оптимальных условиях, регистрируемая гамма-линия была уширена в $p_a = \Delta\omega_a/\Gamma \approx 10$ раз по отношению к естественной ширине Γ . Природа такого уширения была связана с наличием взаимодействия квадрупольных моментов ядер исследуемого изотопа Fe^{57} с градиентом электростатического поля высушенной и размолотой до состояния порошка культуры.

Общее число атомов железа, содержащих мессбауэровский резонансный изотоп Fe^{57} при лоренцовом типе уширения, рассчитывалось по формуле, полученной для тонкого мессбауэровского поглотителя:

$$N_a = \eta_a S(1 + p)/\sigma_0 f$$

где $\eta_a = (N_\infty - N_0)/N_0$ — относительная глубина резонанса поглощения; N_∞ и N_0 — число отсчетов в далеком от резонанса и резонансном каналах гамма-спектрометра, $S \approx 0,63$ см² — площадь окна гамма-спектрометра, заполненного высушенной исследуемой культурой; $f \approx 0,6$ — вероятность эффекта Мессбауэра в поглотителе из исследуемой культуры; σ_0 — сечение резонансного поглощения в изотопе Fe^{57} .

Итоговые значения для относительной глубины резонанса поглощения, полного числа атомов синтезируемого изотопа Fe^{57} и массы этих атомов соответственно равны

$$\eta_a = (1,9 \pm 0,53) \cdot 10^{-3},$$

$$N_a = (0,87 \pm 0,24) \cdot 10^{16},$$

$$m_a = (1 \pm 0,28) \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

Коэффициент трансмутации, соответствующий регистрируемой реакции низкотемпературного синтеза, равен

$$\lambda_a = N_a/N_0 \Delta t = (1,9 \pm 0,52) \cdot 10^{-8}$$

Размерность: ядра синтезируемого изотопа Fe^{57} на 1 с и одно ядро изотопа Mn^{55} .

Аналогичные результаты были получены в процессе роста других культур в оптимальных условиях.

В некоторых случаях (например, для культуры *Deinococcus radiodurans* M-1) структура спектра мессбауэровского поглощения для синтезированного изотопа Fe^{57} в выращенной культуре имела форму дублета, которая соответствовала видоизмененной пространственной структуре высушенной биологической субстанции.

На рис. 4.3,а и 4.3,б представлены экспериментальные спектры, полученные на мессбауэровском гамма-спектрометре, культуры *Deinococcus radiodurans* M-1, выросшей в разных сериях экспериментов в оптимальной среде на основе тяжелой воды D_2O и в присутствии соли MnSO_4 .

Общее количество синтезированных атомов изотопа Fe^{57} в этом случае определялось по формуле

$$N_a = 2\eta_a S(1+p_a)/\sigma_0 f$$

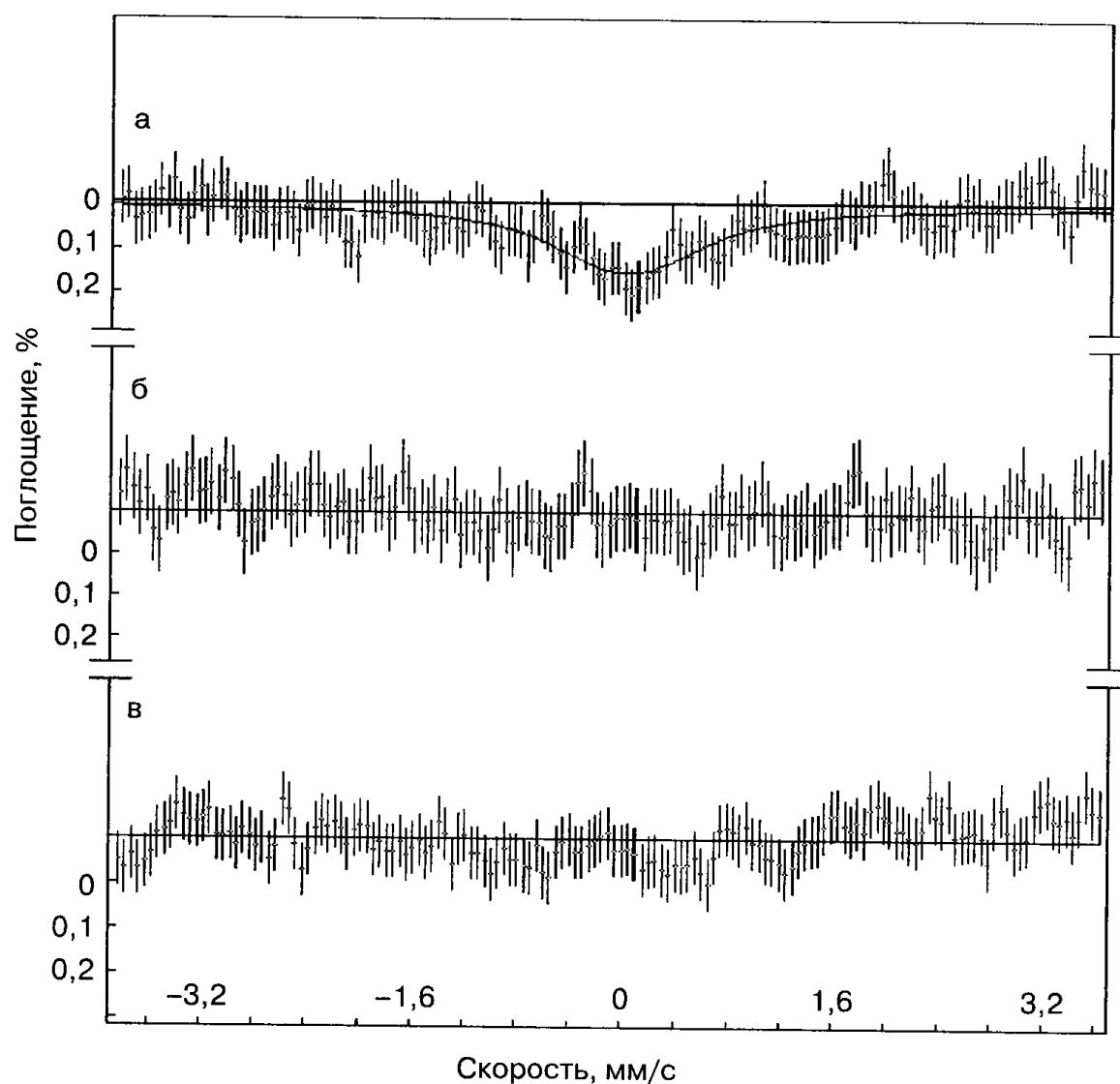


Рис. 4.2. Мессбауэровский спектр выращенной культуры *Saccharomyces cerevisiae* T-8: а — в D_2O при наличии Mn^{55} ; б — в H_2O при наличии Mn^{55} ; в — в D_2O в отсутствии Mn^{55}

Для этой микробиологической культуры итоговые значения для относительной глубины резонанса поглощения, полного числа атомов синтезируемого изотопа Fe^{57} и их массы равны

$$p_a \approx 3,4;$$

$$\eta_a = (1,53 \pm 0,57) \cdot 10^{-3};$$

$$N_a = (0,59 \pm 0,21) \cdot 10^{16};$$

$$m_a = (0,67 \pm 0,24) \cdot 10^{-6} \text{ г.}$$

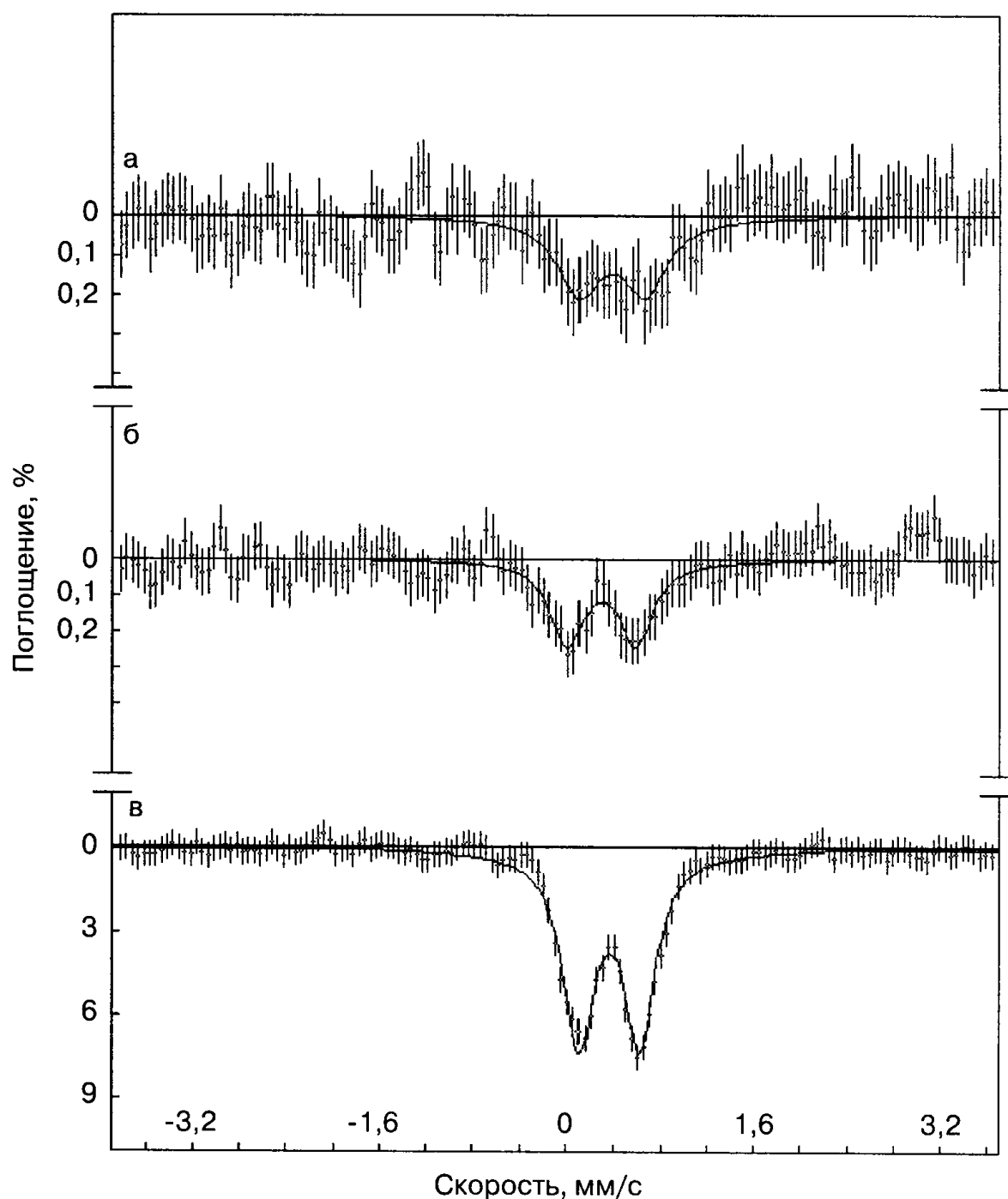


Рис. 4.3. Мессбауэровский спектр выращенной культуры *Deinococcus radiodurans*: а и б — в D_2O при наличии Mn^{55} ; в — в H_2O при наличии Mn^{55} и небольшого количества изотопа Fe^{57}

Соответствующее значение коэффициента трансмутации в растущей культуре *Deinococcus radiodurans* равно

$$\lambda_a = (1,3 \pm 0,46) \cdot 10^{-8}$$

(ядер синтезируемого изотопа Fe^{57} на 1 с и одно ядро изотопа Mn^{55}).

В процессе выполнения экспериментов была проведена тщательная проверка возможных артефактов.

Один из гипотетических источников артефактов был связан с возможным влиянием состава питательной среды на биологическую усвояемость примесного Fe^{57} . В связи с отсутствием предварительных исследований, связанных с особенностями вовлечения разных изотопов железа в процесс культурального роста, этот вопрос нуждался в более тщательной проверке. Например, законной является гипотеза, согласно которой изотоп Fe^{57} усваивается растущей культурой в присутствии D_2O и не усваивается в среде на основе H_2O . Другое предположение может быть связано с гипотезой о разной структуре спектра гамма-поглощения Fe^{57} в культурах, выращенных на основе D_2O и H_2O (например, культуре, содержащей H_2O и MnSO_4 , соответствует многокомпонентная сверхтонкая структура с соответствующим понижением амплитуды каждой из компонент спектра до уровня, не регистрируемого в эксперименте, а в культуре, содержащей D_2O , такое расщепление отсутствует).

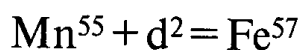
Для проверки возможности и обоснованности таких эффектов нами было проведено исследование гамма-спектра выращенных культур в том случае, когда в процессе роста в состав неоптимальной питательной среды (содержащей H_2O и MnSO_4) добавлялось малое контролируемое количество изотопа Fe^{57} . Вид гамма-спектра (рис.4.3,в) для этого случая стимулированного усвоения ядер Fe^{57} выращенной культурой *Deinococcus radiodurans* M-1 в неоптимальной среде полностью аналогичен спектру гамма-линии в экспериментах по трансмутации (рис. 4.2,а и б) в оптимальной среде (содержащей D_2O и MnSO_4), что доказывает несущественность этого гипотетического источника артефактов.

Следовательно, появление резонанса поглощения, соответствующего изотопу Fe^{57} в эксперименте по трансмутации не связано с преобразованием сверхтонкой структуры и спектральным преобразованием отдельных компонент линии резонансного гамма-поглощения, а является достоверным свидетельством синтеза изотопа Fe^{57} в реакции трансмутации.

Подводя итоги экспериментов, можно сделать ряд выводов.

1. Изотоп Fe^{57} не присутствует в заметных количествах в компонентах питательной среды.
2. Изотоп Fe^{57} не присутствует в тяжелой воде и не извлекается из стекла и воздуха в процессе роста микробиологической культуры.
3. Структура спектра гамма-поглощения изотопа Fe^{57} в культурах, выращенных в средах на основе легкой и тяжелой воды, совпадает.

Таким образом, изотоп Fe^{57} , обнаруживаемый после завершения роста микробиологических культур в оптимальной питательной среде, не связан с артефактами и образуется в процессе роста этих культур в результате реакции низкотемпературной ядерной трансмутации



В завершение рассмотрим термодинамические последствия рассматриваемой реакции.

Поскольку реакция синтеза $\text{Mn}^{55} + d^2 = \text{Fe}^{57}$ является энергетически выгодной и должна идти с выделением энергии, то средняя мощность $\langle P_a \rangle$, которая может выделяться в кювете с питательной средой оптимального состава, может быть вычислена, исходя из баланса дефектов масс участвующих в реакции ядер:

$$\langle P_a \rangle \approx N_a [M(\text{Mn}^{55}) + M(d^2) - M(\text{Fe}^{57})] c^2 / \Delta t$$

где $M(\text{Mn}^{55})$, $M(d^2)$, $M(\text{Fe}^{57})$ — массы изотопов Mn^{55} , d^2 and Fe^{57} .

Разность дефектов масс участвующих в реакции трансмутации изотопов равна

$$\Delta M c^2 = [M(\text{Mn}^{55}) + M(d^2) - M(\text{Fe}^{57})] c^2 = 15,605 \text{ МэВ}$$

Используя вычисленные из экспериментальных данных значения для $N_a \approx (0,9 \div 0,6) \cdot 10^{16}$, $\Delta t \approx 3 \cdot 10^5 \text{ с}$ находим, что средняя мощность, выделяемая в процессе трансмутации в кювете объемом $V = 10 \text{ см}^3$, не превышает величины $\langle P_a \rangle \approx 75 \div 40 \text{ мВт}$.

Оставляя в стороне специальный вопрос о распределении этой энергии среди продуктов реакции, отметим, что эта мощность, даже при условии полного преобразования в теплоту, не могла существенно изменять тепловой режим роста культур (особенно с учетом того, что процесс выращивания производился в термостате с автоматической регулировкой температуры).

4.2.2. Изучение управляемой трансмутации легких и промежуточных по массе изотопов в растущей микробиологической культуре с помощью лазерного время-пролетного масс-спектрометра

Как было отмечено выше, обеспечение максимальной достоверности экспериментальных результатов является одним из важнейших требований к экспериментам по трансмутации изотопов. Эта цель может быть достигнута только при использовании нескольких независимых методов исследования одного и того же объекта.

Мы провели альтернативное исследование масс спектров тех культур, которые были выращены в питательных средах, оптимизированных для реакции трансмутации $Mn^{55} + d^2 = Fe^{57}$, а затем исследованы в мессбауэровском γ -спектрометре.

Исследования проводились на основе лазерного время-пролетного масс-спектрометра, предназначенного для проведения локального микроанализа твердых материалов при однократной лазерной вспышке, сфокусированной на объект исследования. Исходя из тех же требований максимальной достоверности результатов, рассмотрим более детально особенности работы используемого в экспериментах прибора.

Принципиальная схема прибора представлена на рис. 4.4. Для образования низкотемпературной плазмы использовался рубиновый импульсный лазер 1 (длина волны излучения $\lambda = 0,69$ мкм) с энергией импульса $W = 0,2$ Дж и длительностью $\tau = 40$ нс.

Диаметр лазерного фокуса $D = 100$ мкм обеспечивал образование лазерной плазмы с температурой $kT \approx 100$ эВ на поверхности исследуемого образца 2. Эта энергия является оптимальной, исходя из двух взаимно противоречивых требований — повышения температуры для

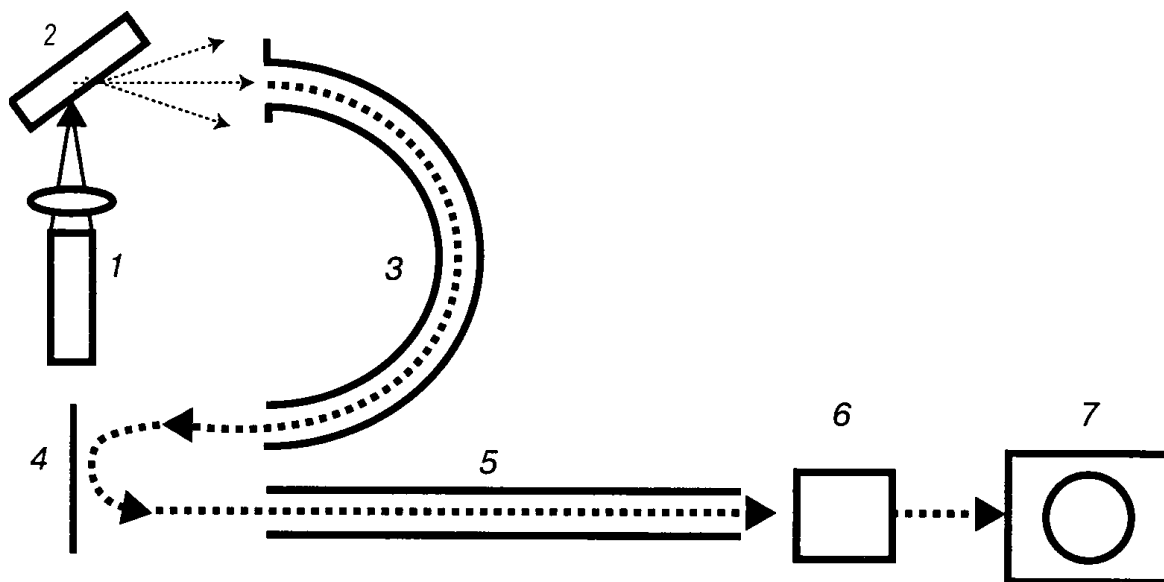


Рис. 4.4. Схема время-пролетного лазерного масс-спектрометра

достоверного получения чисто атомарной (не молекулярной) плазмы и ее понижения для получения гарантированно однократной степени ионизации.

В результате действия каждого лазерного импульса на поверхности исследуемого образца происходил выброс атомов образца из зоны с диаметром 100 мкм и глубиной около 1 мкм. Вследствие достаточно высокой (в масштабе величин, характеризующих молекулярные связи) температуры плазмы происходил полный разрыв всех молекулярных связей в исследуемом веществе и образование однозарядных (около 95%) и двухзарядных (около 4%) ионов. Эти ионы свободно разлетались от лазерного фокуса.

Разделение ионных пакетов разных изотопов происходило после энергетического дискриминатора 3, выделяющего из всего теплового спектра ионов только те, которые имеют энергию вблизи заданной величины $W_0 \approx 100$ эВ. Регистрация ионных пакетов после их пролетной селекции (из-за разности скоростей $v_i = (2W_0/m_i)^{1/2}$ при неизменной энергии W_0 в секции анализатора 5 происходила по разным элементам и изотопам. Лучшие условия наблюдения соответствуют изотопным компонентам с малой концентрацией.

Данная методика время-пролетной масс-спектрометрии позволяет проводить одновременный и взаимно-независимый анализ химического и изотопного состава образцов как по каналу измерения относительной концентрации отдельных компонентов (как в приведенной ниже таблице 4.2), так и по каналу исследования периода пространственно-временной модуляции каждого из ионных сгустков.

Для улучшения аналитических возможностей прибора применялась ионно-оптическая система 4 фазовой фокусировки ионов в плоском отражающем поле. Расположение этой системы относительно выходной щели анализатора, а также выбор угла вылета ионных пакетов из анализатора 5 с размером области дрейфа около 100 см обеспечивали их пространственно-временное фокусирование вблизи входной щели электронного умножителя 6. Применение фокусирующего ионно-оптического устройства повышает разрешающую способность прибора до величины $R = m_1/(m_2 - m_1) = 600$ при прежней относительной чувствительности обнаруженных элементов.

Обработанные электронные сигналы подавались на вход запоминающего двухлучевого осциллографа 7 с последующей фиксацией на фотопленку или в систему обработки и накопления информации на ЭВМ.

На рис. 4.5 представлены результаты измерений масс-спектров в области с массовыми числами от $A=54$ – 57 (т. е. там, где присутствуют изотопы, участвующие в реакции) (Vysotskii, 2000, 2001).

На рис. 4.5, *а* и *б* приведены контрольные спектры природного многоизотопного железа и природного одноизотопного марганца; на рис. 4.5, *в* — масс-спектр образца контрольного эксперимента с

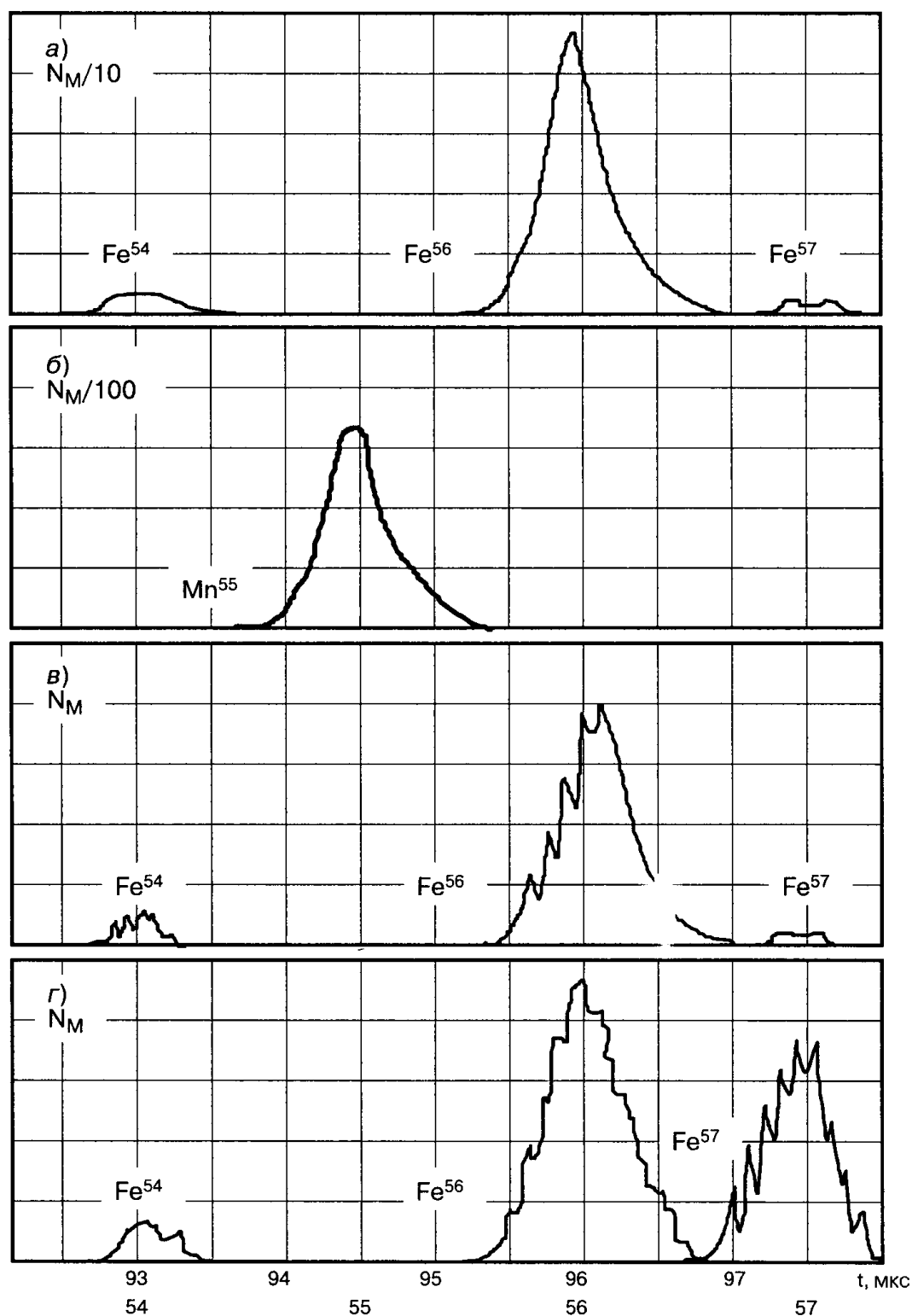


Рис. 4.5. Исследование процесса синтеза мессбауэровского изотопа Fe^{57} время-пролетным лазерным масс-спектрометром

культурой *Saccharomyces cerevisiae*, выращенной в питательной среде на основе тяжелой воды D_2O , но без добавления изотопа Mn^{55} (без добавления соли $MnSO_4$); на рис. 4.5,г — масс-спектр той же культуры, выращенной в питательной среде на основе тяжелой воды D_2O с добавлением изотопа Mn^{55} (соли $MnSO_4$). Этот спектр представляет собой фактически результат сложения спектров синтезированного изотопа Fe^{57} и примесных изотопов естественного железа (Fe^{54} , Fe^{55} и Fe^{57}).

Из результатов измерений очевидно, что отношение концентраций изотопов Fe^{57} и Fe^{56} как в контрольном эксперименте (рис. 4.4,в), так и в естественном железе (рис. 4.4,а) соответствует своему природному значению:

$$\eta(Fe^{57})/\eta(Fe^{56}) \approx 0,02$$

Напротив, отношение концентрации тех же изотопов в составе культуры, выросшей в среде оптимального состава, превышает природное значение в 35–45 раз:

$$\eta(Fe^{57})/\eta(Fe^{56}) \approx 0,7–0,9$$

т. е. доля синтезируемого изотопа Fe^{57} существенно выше доли примесного изотопа Fe^{56} .

Отсюда суммарная масса синтезированного Fe^{57} и число атомов этого изотопа равны

$$m(Fe^{57}) \approx [\eta(Fe^{57})/\eta(Fe^{56})]m(Fe^{56}) \approx (0,8–1) \cdot 10^{-6} \text{ г}$$

$$N(Fe^{57}) \approx (0,6–0,8) \cdot 10^{16}$$

Соответствующий коэффициент трансмутации (полученный методом время-пролетной масс-спектропии) равен

$$\lambda_{\text{(mass-spectr)}} \approx N(Fe^{57})/N(Mn^{55})\Delta t \approx [\eta(Fe^{57})/\eta(Fe^{56})]N(Fe^{56})/N(Mn^{55})\Delta t \approx (1–1,3) \cdot 10^{-8}$$

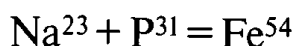
(ядер синтезируемого изотопа Fe^{57} на 1 с и одно ядро изотопа Mn^{55}).

Видно, что значения коэффициента трансмутации, полученные методами мессбауэровской гамма-спектропии и время-пролетной масс-спектропии примерно совпадают.

4.3. НАБЛЮДЕНИЕ И МАСС-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ТРАНСМУТАЦИИ СРЕДНИХ ПО АТОМНОМУ НОМЕРУ ИЗОТОПОВ В РАСТУЩЕЙ КУЛЬТУРЕ

4.3.1. Методика работы и методы исследования

Эксперименты по наблюдению и изучению явления ядерной низкотемпературной трансмутации средних по атомному номеру изотопов основывались на ожидаемой реакции синтеза в растущей микробиологической культуре, находящейся в оптимизированной питательной среде, дефицитной по железу, но дополнительно содержащей контролируемые количества одноизотопных химических элементов Na^{23} и P^{31} :



Эта реакция характеризуется положительным выходом энергии

$$\Delta E = [M(\text{Na}^{23}) + M(\text{P}^{31}) - M(\text{Fe}^{54})]c^2 = 22,4 \text{ МэВ}$$

и, следовательно, может идти при любой энергии взаимодействующих изотопов (в том числе при близкой к нулю энергии относительного движения ядер). Главная проблема при этом, естественно, связана с преодолением кулоновского барьера. Она будет рассмотрена в другой главе.

Исследования проводились на основе бактериальной культуры *Bacillus subtilis* (Vysotskii, 2000, 2001).

Результатом реакции трансмутации является образование редкого изотопа железа Fe^{54} , концентрация которого в природном железе мала: $\eta = 5,8\%$. Несомненным преимуществом этой реакции (как и реакции образования редкого мессбауэровского изотопа Fe^{57}) является то, что ее конечный продукт является стабильным, содержится в природном железе в малой концентрации и может накапливаться в объеме культуры при ее росте. Он может быть легко обнаружен с помощью масс-спектрометрии.

Использовалась следующая методика экспериментов. Предварительно полученная культура после центрифугирования, промывания и подрачивания помещалась в кюветы с сахарно-солевой питательной средой, содержащей соли Mg, Ca, K, Na, сахарозу и 100 мл чистой легкой воды H_2O . Культура выращивалась в термостате при оптимальной для роста температуре 32°C . Состав питательной среды представлен в табл. 4.2.

Основная идея экспериментов состояла в выращивании культур в нескольких альтернативных питательных средах, из которых только одна содержала оба необходимых для реакции синтеза изотопа Na^{23} и P^{31} .

Для этого в эксперименте по трансмутации в питательную среду, содержащую, наряду с прочими, соль NaNO_3 , добавлялась соль K_2HPO_4 .

Суммарная масса и полное число атомов изотопа Na^{23} в соли NaNO_3 составляло:

$$m(\text{Na}^{23}) \approx 0,13 \text{ г}$$

$$N(\text{Na}^{23}) \approx 2,8 \cdot 10^{21}$$

Содержание примесного железа в этой соли не превышало малой величины $\Delta m_{\text{Fe}} \approx 10^{-4}$ г. Масса и число атомов изотопа P^{31} равно

$$m(\text{P}^{31}) \approx 0,1 \text{ г}$$

$$N(\text{P}^{31}) \approx 1,1 \cdot 10^{21} \text{ атомов}$$

Все сухие компоненты питательной среды были предварительно исследованы на масс-спектрометре. Такие же исследования были проведены с частью подлежащей выращиванию культуры. При этом

Таблица 4.2. Состав питательной среды

Компоненты	Концентрация, (%)	Содержание железа (не более), %	Содержание железа (не более), г
Сахароза	2	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
MgSO_4	0,05	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
CaCO_3	0,2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
KCl	0,05	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
NaNO_3	0,5	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
K_2HPO_4 (в эксперименте по трансмутации)	0,2	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Чистая (дистиллированная) вода H_2O	100 (100 мл)	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$

содержание примесного железа было мало и примерно соответствовало паспортному значению.

Типичная серия каждого из экспериментов по ядерной трансмутации состояла в независимом выращивании разделенных частей одной и одной и той же культуры в двух кюветах с различной питательной средой (рис. 4.6).

Первая кювета содержала водно-солевую питательную среду полного состава (включая NaNO_3), но без K_2HPO_4 , вторая — ту же среду полного состава, но с присутствием K_2HPO_4 . Длительность выращивания культуры в разных сериях была равна 24, 48 или 72 ч.

Типичная серия измерений масс-спектров включала исследование масс-спектров, записываемых последовательно:

- а) измерение масс-спектра чистого природного железа (базовое измерение при работе с любым из изотопов природного железа);
- б) исследование масс-спектра контрольной высушенной культуры, которая выросла в среде полного состава (с $^{23}\text{NaNO}_3$), но без изотопа P^{31} (т. е. без K_2HPO_4);
- в) исследование масс-спектра высушенной культуры, которая выросла в среде полного состава при наличии изотопов Na^{23} и P^{31} .

Исследуемые объекты перед процессом измерения и созданием вакуума помещались в одной вакуумной камере лазерного масс-спектрометра. Все исследуемые образцы помещались в открытые разделенные микрополости, сделанные на поверхности пластины из свинца высокой чистоты, открытые со стороны воздействия лазерного

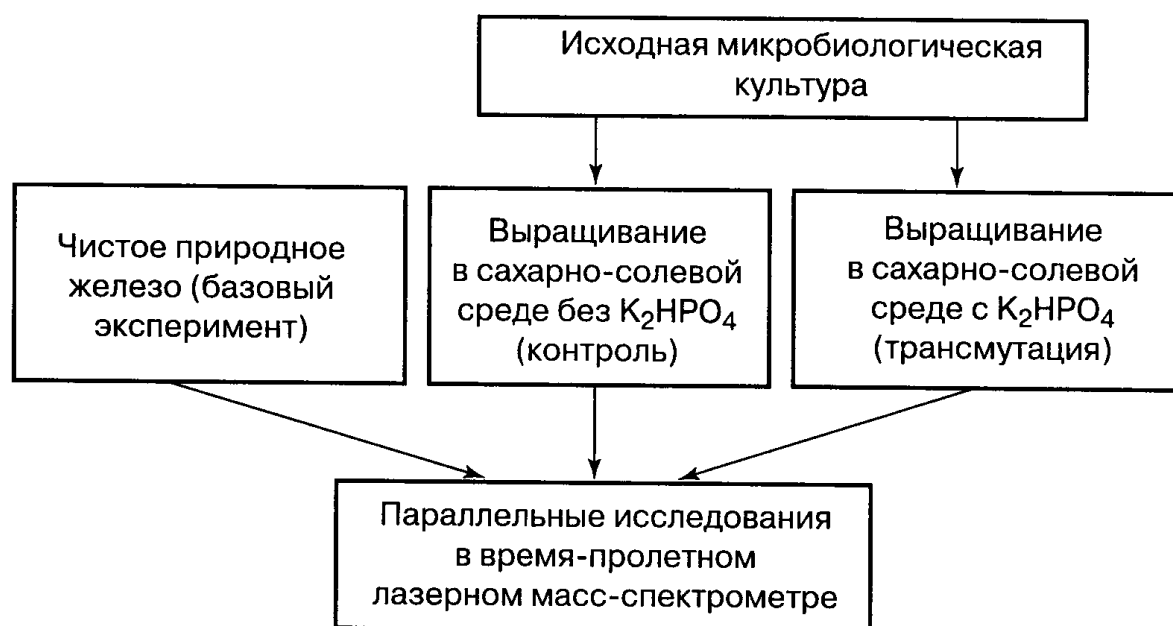


Рис. 4.6. Схема экспериментов по трансмутации и спектроскопии изотопов в микробиологических культурах

импульса и имеющие диаметр, превышающий поперечник лазерного фокуса. Юстировочная система масс-спектрометра могла перемещать эту пластину внутри вакуумированной камеры и устанавливать каждую из микрополостей в точку, соответствующую фокусу лазерного импульса. Лазерный импульс воздействовал на каждую из проб и образовывалось облако разлетающейся лазерной плазмы с температурой около 100 эВ. После выделения из этой плазмы (с помощью энергетического дискриминатора с узким энергетическим окном) моноэнергетических ионов и последующей пролетной селекции происходило разделение ионов плазмы в соответствии с их массами. Обработанные электронные сигналы от детектора подавались на вход запоминающего двухлучевого осциллографа с последующей фиксацией на фотопленку или в систему обработки и накопления информации на ЭВМ.

Вначале производился анализ всего масс-спектра, а затем более детальное исследование областей спектра, отвечающих конкретным изотопам.

Важное значение имела надежность, наглядность и достоверность фиксации результатов измерений. Наиболее наглядные результаты получались при фоторегистрации масс-спектра изотопов на двухлучевом осциллографе, снабженном запоминающим устройством. Регистрация распределения изотопов происходила в последовательно для парных серий измерений.

Каждая из парных серий включала сначала получение базового спектра изотопов природного железа, который получался при воздействии лазерного импульса на микрополость с железом и записывался в виде синхронизированной с лазерным импульсом верхней развертки на экране двухлучевого осциллографа. После этого происходило перемещение микрополости с образцом исследуемой культуры в область лазерного фокуса, а затем получение спектра изотопов этой культуры. Этот спектр записывался на том же экране двухлучевого осциллографа в виде нижней развертки, полностью синхронизированной с верхней разверткой, соответствующей опорному спектру природного железа. Затем производилась фоторегистрация полученных масс-спектров с экрана осциллографа. Независимо производилась регистрация этих же спектров на ЭВМ.

4.3.2. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов представлены на рис. 4.7 (после обработки на ЭВМ) и 4.8. (фотографии с экрана осциллографа).

Фотографии (рис. 4.8) сделаны с экрана многолучевого осциллографа с памятью и изображают масс-спектр базового и контрольного

образцов, а также образца, подвергнувшегося процессу трансмутации. Верхняя развертка на всех фотографиях соответствует спектру природного железа (базовый эксперимент), а нижняя — спектру исследуемой культуры (контроль или трансмутация).

Из фотографий видно, что в спектре всех исследуемых культур присутствует небольшой сдвиг пика ионного тока, соответствующего

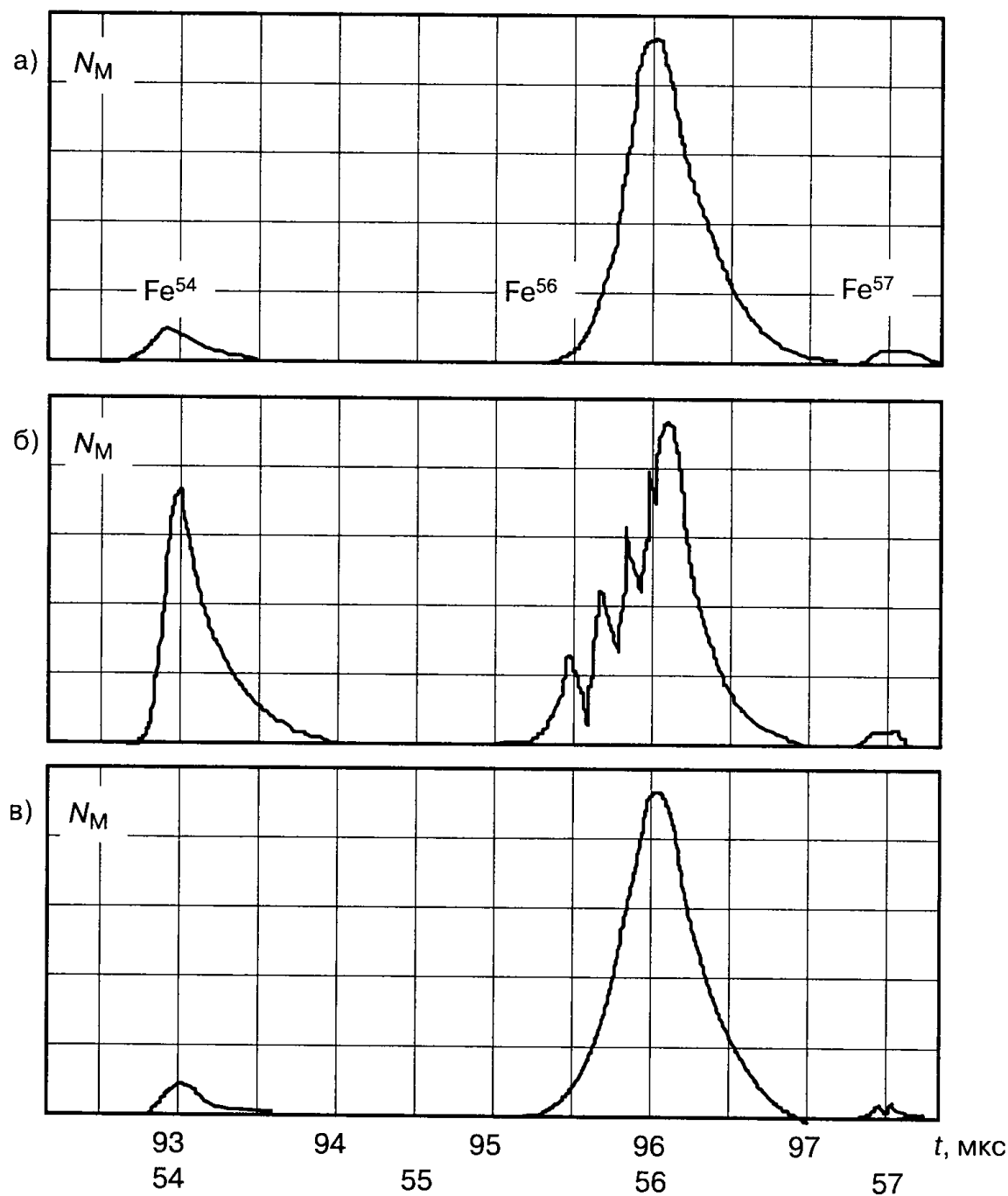


Рис. 4.7. Типичная серия масс-спектра изотопов железа: *а* — опорный эксперимент для чистого природного железа; *б* — эксперимент по трансмутации (культура выращена в среде при наличии изотопов P^{31} и Na^{23}); *в* — контрольный эксперимент (культура выращена в среде, не содержащей изотопа P^{31}). t — время пролета ионов изотопов от мишени до детектора, A_i — атомный номер изотопа, N_M — амплитуда сигнала на экране осциллографа

разным изотопам, влево (т. е. в сторону меньших масс) относительно спектра соответствующих изотопов природного железа. Этот сдвиг связан со спецификой время-пролетного спектрометра и обусловлен особенностями движения и взаимодействия (небольшого отталкивания) ионных пакетов, соответствующих разным элементам в процессе их разделения и последующего движения. Основное влияние на дополнительное смещение ионных сгустков оказывает присутствие в плазме пакета тяжелых ионов свинца, которые, отталкивая ионы более легких элементов и изотопов, немного сдвигают их на траектории движения и вызывают более раннюю регистрацию детектором.

Из фотографий и графиков четко видно очень значительное возрастание абсолютной и относительной концентрации редкого изотопа Fe^{54} для культуры, выросшей в среде оптимального состава. Это возрастание соответствовало изменению отношения концентраций изотопов по сравнению с природным значением:

$\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,06$ (для природного железа в базовом эксперименте и редкого примесного природного железа в контрольном эксперименте)

$\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,2-0,25$ (для эксперимента по трансмутации в оптимальной среде)

Повторяемость успешных результатов с этих экспериментов была близка к 100%.

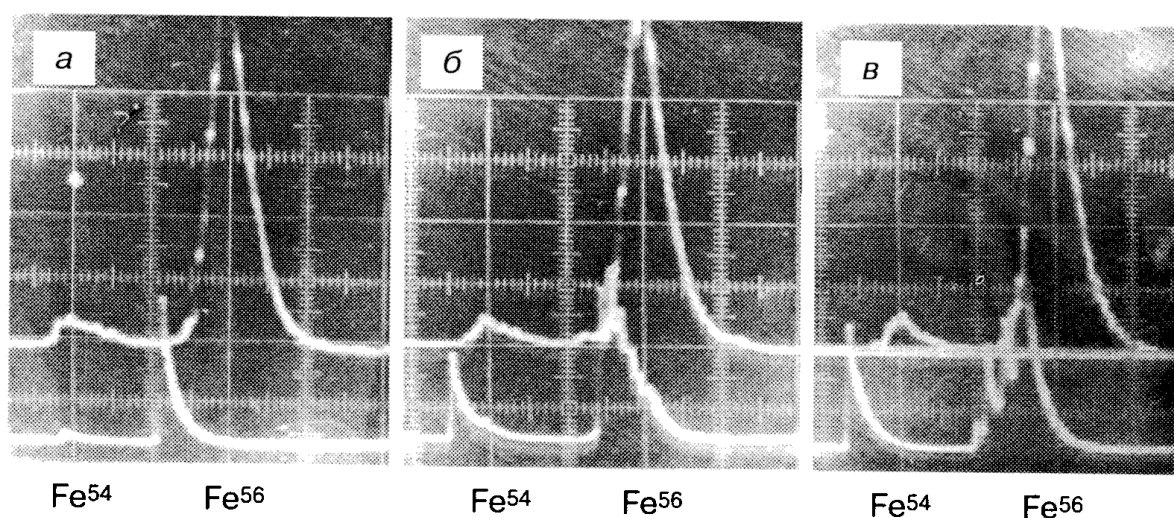


Рис. 4.8. Фотографии с экрана осциллографа, соответствующие масс-спектру в области изотопов железа. Вверху — базовый (опорный) эксперимент для чистого природного железа, внизу — масс-спектр выращенной микробиологической культуры. а — контрольный эксперимент (культура выращена в среде, не содержащей изотопа P^{31}); б и в — эксперименты по трансмутации (культура выращена в среде при наличии изотопов P^{31} и Na^{23})

Усредненные по нескольким сериям измерений коэффициенты трансмутации в реакции $\text{Na}^{23} + \text{P}^{31} = \text{Fe}^{54}$ равны

$$\lambda_{\text{P}} = N(\text{Fe}^{54})/N(\text{P}^{31})\Delta t = [\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56})]N(\text{Fe}^{56})/N(\text{P}^{31})\Delta t \approx (3-6) \cdot 10^{-10}$$

(ядер синтезируемого изотопа Fe^{54} на 1 с и одно ядро изотопа P^{31})

$$\lambda_{\text{Na}} = N(\text{Fe}^{54})/N(\text{Na}^{23})\Delta t = [\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56})]N(\text{Fe}^{56})/N(\text{Na}^{23})\Delta t \approx (1-2) \cdot 10^{-10}$$

(ядер синтезируемого изотопа Fe^{54} на 1 с и одно ядро изотопа Na^{23})

Для повышения достоверности измерений также были проведены исследования масс-спектров всех сухих (исходных) компонентов сахарно-солевой питательной среды.

Особенно важным было изучение результатов прямого действия лазерного импульса в масс-спектрометре на основные (в отношении участия в реакции синтеза) компоненты питательной среды — соли NaNO_3 и K_2HPO_4 . Измерения показали, что отношение концентраций изотопов $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,06$ остается неизменным как в случае лазерного облучения индивидуальных образцов NaNO_3 и K_2HPO_4 , так и облучения тщательно приготовленной мелкодисперсной смеси этих солей.

Последний результат имеет особое значение. Он позволяет сделать вывод о том, что образование изотопа Fe^{54} и связанное с этим процессом изменение изотопного отношения $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56})$ действительно наблюдается в процессе роста культуры в среде оптимального состава, когда присутствуют соли NaNO_3 и K_2HPO_4 , т. е. является результатом низкотемпературного ядерного синтеза $\text{Na}^{23} + \text{P}^{31} = \text{Fe}^{54}$, и не связано с тепловым действием лазерного импульса на облучаемый образец в масса-спектрометре. Это доказывает, что наблюдаемая реакция не есть результат «теплого» синтеза с температурой $kT \approx 100$ эВ в фокусе лазерного импульса, а протекает при температуре 32°C в растущей микробиологической культуре.

4.4. НАБЛЮДЕНИЕ ТРАНСМУТАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТРАНСМУТАЦИИ В РАСТУЩИХ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ

4.4.1. Каталитическое влияние цезия на эффективности ядерного превращения промежуточных и тяжелых изотопов в растущей биологической культуре

Целью данного исследования было изучение процесса трансмутации изотопов при низкой энергии относительного движения ядер этих изотопов и при наличии тяжелых активных (в биохимических реакци-

ях) элементов. В первую очередь, к числу таких элементов относится цезий — биохимический аналог калия.

Хорошо известно, что цезий не входит в число жизненно необходимых микроэлементов, в то же время калий и цезий биохимически подобны и цезий может успешно заменять калий во многих химических и биохимических реакциях. Более детально вопрос об элементах-аналогах и «биохимических заменителях» рассмотрен в гл. 6.

Наши эксперименты были нацелены на оптимизацию исследованной нами ранее реакции трансмутации $\text{Na}^{23} + \text{P}^{31} = \text{Fe}^{54}$ в растущей культуре в сахарно-солевой питательной среде при дополнительном воздействии на процесс роста солей цезия. Реакции проводились на основе культуры *Saccharomyces cerevisiae*.

Кроме того, в этих же экспериментах проводилось исследование одновременно протекающей реакции трансмутации изотопа цезия $\text{Cs}^{133} + \text{p}^1 = \text{Ba}^{134}$ с образованием редкого стабильного изотопа Ba^{134} . Фактически, это первое успешное исследование биологической трансмутации тяжелых изотопов.

Схема эксперимента была традиционной для микробиологических культур и проводилась при температуре 32°С.

В контрольном эксперименте предварительно полученная культура после промывания и процедуры подращивания помещалась в кювету с сахарно-солевой питательной средой, содержащей соли Mg, Ca, K или Cs, Na, а также глюкозу и 100 мл чистой легкой воды H_2O (табл. 4.3). В базовом эксперименте по ядерной трансмутации изотопов Na^{23} и P^{31} (состав питательной среды см. композиции 1.1 и 1.2) в питательную среду добавлялась дополнительная соль Na_2HPO_4 , содержащая изотоп P^{31} .

В эксперименте по каталитическому воздействию и индуцированию (стимуляции) ядерной трансмутации, которому соответствуют композиции 2.1 и 2.2, в питательную среду вместо базовой соли KCl добавлялась соль CsCl. Соли KCl и CsCl химически подобны, и ионы Cs^+ могут заменять ионы K^+ при росте микробиологической культуры.

Полученный полный масс-спектр изотопов и элементов в выросшей культуре представлен на рис. 4.9 и в табл. 4.4. На рис. 4.10 представлен в увеличенном масштабе фрагмент общего масс-спектра, включающий область локализации изотопов железа.

Масс-спектры были получены во время-пролетном спектрометре при единичном действии лазерного импульса на исследуемую культуру.

Сопоставление с масс-спектрами для изотопов природного железа (верхние кривые на рис. 4.10, а–в) позволяет провести точную идентификацию и количественную интерпретацию полученных изотопов

Таблица 4.3. Состав питательной среды

Постоянные компоненты	Концентрация, %
Глюкоза	2
NaNO_3	0,5
MgSO_4	0,05
Чистая вода H_2O	100
Переменные компоненты	
(1.) KCl	0,05
(1.1.) Na_2HPO_4	0,1
(1.2.) Na_2HPO_4	0,1
Триптон	0,5
(2.) CsCl	0,05
(2.1.) Na_2HPO_4	0,1
(2.2.) Na_2HPO_4	0,1
Триптон	0,5

(примесных изотопов Fe^{56} и Fe^{54} на рис. 4.10,в и синтезируемого изотопа железа Fe^{54} на рис. 4.10,а и б).

Из масс-спектроскопического исследования культур, выросших в разных питательных средах, можно сделать следующие выводы:

- 1) Типичный изотопный масс-спектр культур, выросших в отсутствие фосфата (композиции 1 или 2), показан на рис. 4.10,в. Видно, что, как и следовало ожидать, отношение концентраций изотопов в выросшей культуре $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,06$ было таким же, как в природном железе, а само железо было примесного происхождения.
- 2) Для композиций 1.1 или 1.2, которые соответствовали отсутствию соли цезия CsCl в питательной среде, экспериментальные результаты для базовых экспериментов были теми же, как в рассмотренной выше задаче (пп. 4.3.1 и 4.3.2) по трансмутации на основе реакции $\text{Na}^{23} + \text{P}^{31} = \text{Fe}^{54}$. В этом случае в масс-спектре выращенной культуры присутствовали все химические элементы, содержащиеся в питательной среде (включая калий), но отсутствовал цезий. Часть масс-спектра, соответствующая области локализации изотопов железа, представлена на рис. 4.10,б. Для этого случая отношение концентраций изотопов Fe^{54} и Fe^{56} равно $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,2-0,4$.

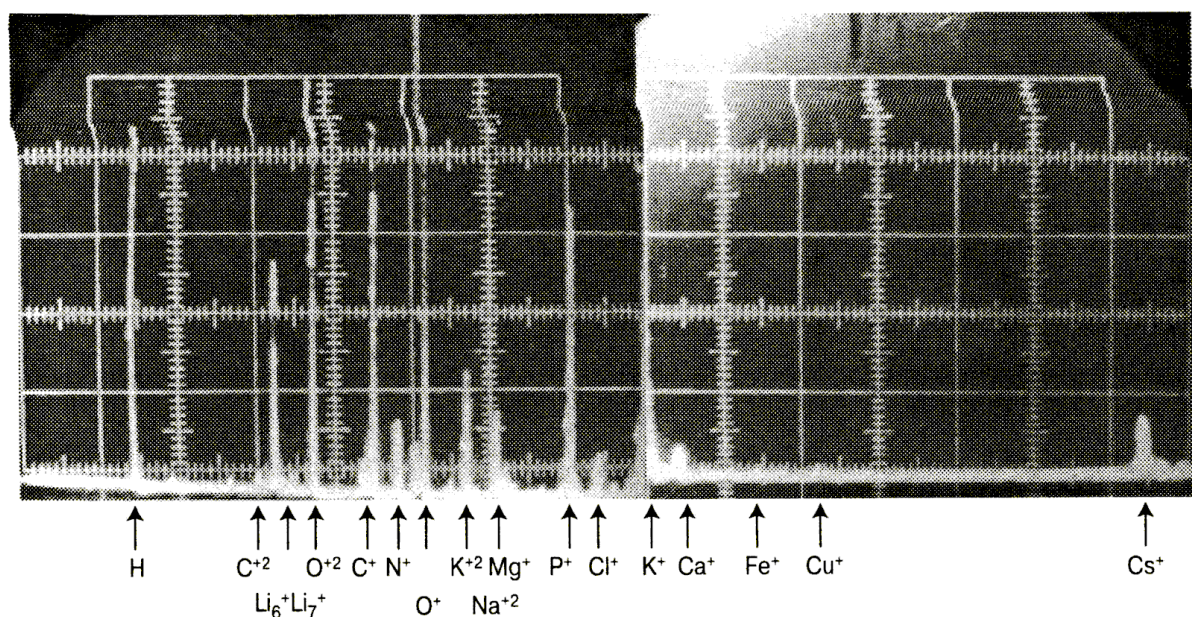


Рис. 4.9. Полный масс-спектр изотопов и химических элементов выращенной культуры *Saccharomyces cerevisiae*

3) В композициях 2.1 или 2.2, которым соответствует замена калия на химически подобный цезий (замена соли KCl на CsCl), регистрируется резкое увеличение концентрации цезия в выросшей культуре. Поскольку соль цезия CsCl полностью растворима в питательной среде на основе обычной (легкой) воды, то включение цезия в состав выросшей культуры происходит на атомно-молекулярном уровне, а не в больших нерастворимых кластерах. Это ожидаемый и достаточно тривиальный результат.

Нетривиальным и неожиданным явилось влияние такой замены на вероятность и итоговую эффективность трансмутации натрия и фосфора в железо.

Из рис. 4.10,а следует, что наличие цезия в составе питательной среды оказывает стимулирующую роль на процесс трансмутации и увеличивает отношение изотопных концентраций в 1,5–2 и более раз, т. е. $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 1,0\text{--}1,5$.

Соответствующий коэффициент трансмутации для такого управляемого (стимулированного) процесса равен

$\lambda \approx N(\text{Fe}^{54})/N(\text{P}^{31} + \text{Na}^{23})\Delta t \approx 10^{-9}$ (синтезированных ядер изотопа Fe^{54} за 1 с и на одну пару ядер изотопов P^{31} и Na^{23})

Предварительно проведенные с сухими компонентами питательной среды контрольные измерения показали, что наблюдавшиеся в полном масс-спектре малые по амплитуде линии изотопов железа характеризуются тем же изотопным отношением $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,06$, как и природное железо. Это подтверждает, что «избыточный» изотоп Fe^{54} мог образоваться только в процессе трансмутации.

Таблица 4.4. Содержание изотопов в микробиологической культуре

Элемент	Композиция			
	(1.1)	(1.2)	(2.1)	(2.2)
H	0.53	1.0	0.67	0.69
C	23.4	32.1	19.3	18.1
N	3.60	7.90	2.30	6.0
O	21.0	21.3	18.3	25.0
Na	4.80	3.30	5.80	4.40
Mg	0.17	0.40	0.36	0.25
Al	0.30	0.26	0.38	0.04
Si	0.42	0.13	0.67	0.33
P	6.70	11.9	3.47	11.0
S	3.83	7.90	2.22	5.50
Cl	12.6	2.68	5.80	8.80
K	18.6	10.8	13.5	17.0
Ca	0.77	0.62	—	—
Fe	2.5	0.66	2.40	0.27
F	0.03	—	—	0.03
Ti	0.06	—	0.40	0.05
Cu	0.11	—	0.04	0.11
Zn	0.11	—	—	0.11
Cr	0.30	—	0.04	—
Cs	—	—	22.4	2.30
Ba	—	—	1.90	<0.01
Mn	—	0.06	—	0.02

Вопрос о механизме стимулирующего воздействия цезия на синтез железа остается открытым. Цезий не участвует в реакции синтеза железа в качестве необходимого элемента (для этого достаточно наличие фосфора и натрия), но оказывает опосредованное и очень существенное влияние на этот процесс. Объяснить факт оптимизации синтеза простым предположением о том, что наличие цезия непосредственно стимулирует более активный рост культуры, также не удастся — ускорения роста микробиологической культуры при замене калия на цезий

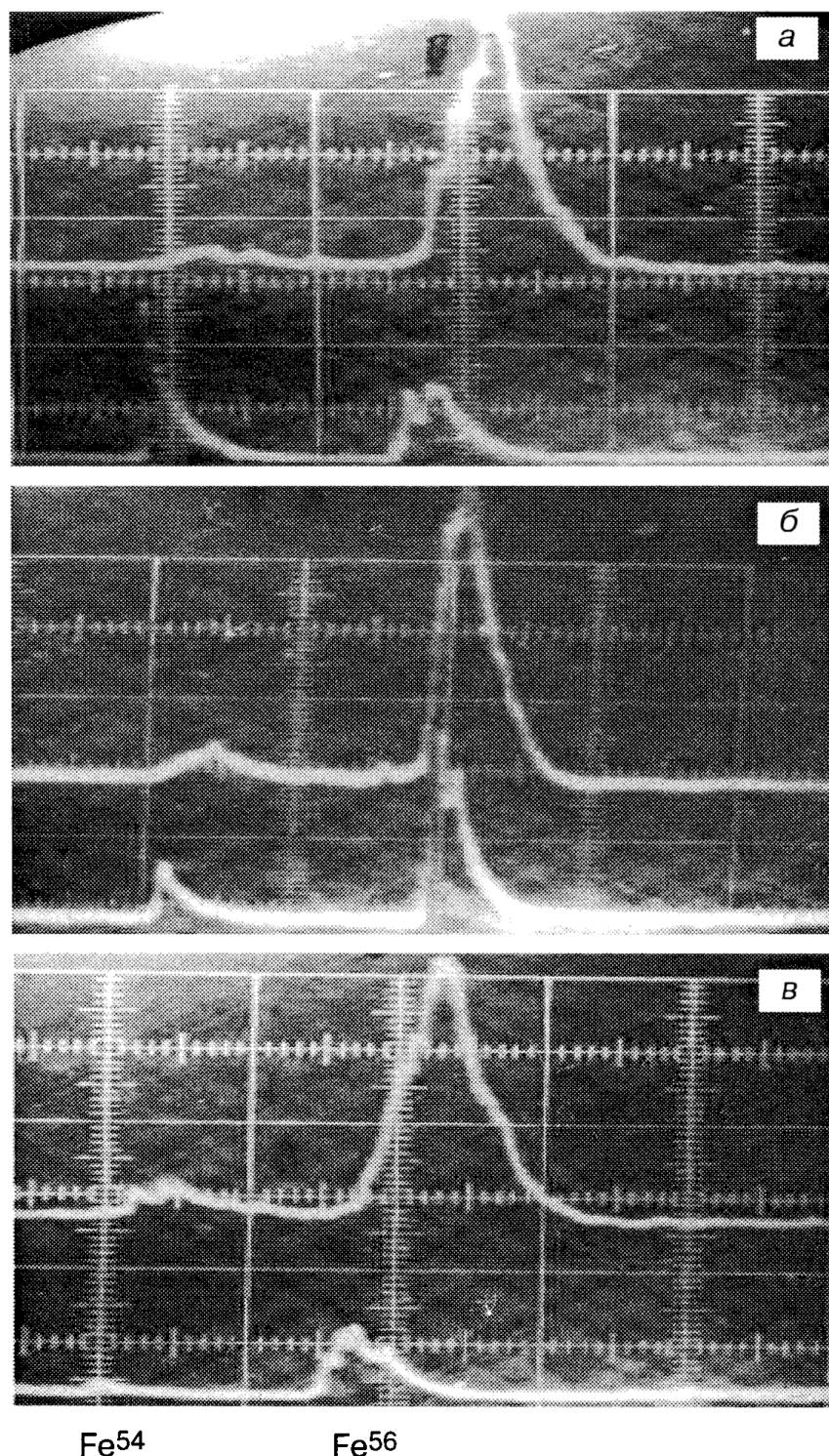


Рис. 4.10. Масс-спектр регистрируемых изотопов железа: верхние кривые — опорный (базовый) эксперимент на основе природного железа. *а* — стимулированная трансмутация (в среде с изотопами P^{31} , Na^{23} и Cs^{133}); *б* — спонтанная трансмутация (в среде с изотопами P^{31} , Na^{23} и K^{39}); *в* — контрольный эксперимент в среде без P^{31}

не наблюдается. Возможным объяснением такой стимуляции является предположение, что цезий влияет не просто на рост культуры, а именно на ту часть временной динамики роста, которая (по нашему предположению) влияет на кратковременное интерференционное устранение воздействия кулоновского барьера на процесс синтезе. Эти вопросы более детально рассмотрены в гл. 5.

4.4.2. Обнаружение трансмутации тяжелых изотопов в растущей биологической культуре

При проведении экспериментов, направленных на изучение стимуляции с помощью цезия процесса трансмутации натрия и фосфора в железо, было проведено одновременное изучение реакции трансмутации цезия $\text{Cs}^{133} + p^1 = \text{Ba}^{134}$ с образованием редкого изотопа бария, природная концентрация которого среди других изотопов не превышает 2,4%. Предпосылка осуществления этой реакции соответствовала композиции 2.1 для состава питательной среды (табл. 4.3). Несмотря на то, что такая реакция трансмутации соответствует синтезу и приводит к образованию изотопа, более тяжелого, чем железо, реакция является энергетически выгодной и характеризуется выходом энергии

$$\Delta E = [M(\text{Cs}^{133}) + M(p^1) - M(\text{Ba}^{134})]c^2 = 8,3 \text{ МэВ}$$

На фотографии (рис. 4.11), сделанной с экрана многолучевого осциллографа с памятью, представлены результаты масс-спектрометрического исследования культуры, выросшей в питательной среде, оптимальной для протекания реакции трансмутации цезия в барий. В качестве репера (опорного химического элемента) был использован барий. Вверху рис. 4.11 представлен масс-спектр основных стабильных изотопов бария. Основным максимум соответствует изотопу Ba^{138} (природное содержание 71,7%). Кроме того, в спектре присутствуют максимумы, принадлежащие более редким изотопам бария Ba^{134} (содержание в природе 2,4%), Ba^{135} (6,6%), Ba^{136} (7,9%), Ba^{137} (11,2%). Они расположены слева от основного изотопа бария.

На нижней фотографии верхняя кривая представляет масс-спектр бария, используемого в качестве репера для идентификации изотопов; нижняя кривая — фрагмент полного масс-спектра высушенной культуры, выросшей в питательной среде оптимального состава (т. е. при наличии одноизотопного цезия Cs^{133} и протонов p^1 , содержащихся в воде). Видно, что в спектре присутствует как находящийся в питательной среде и усвоенный культурой изотоп Cs^{133} , так и изотоп Ba^{134} , образуемый в результате реакции синтеза $\text{Cs}^{133} + p^1 = \text{Ba}^{134}$.

Небольшая деформация спектра (смещение пика изотопа Cs^{133} влево, т. е. в направлении более легких масс, а пика изотопа Ba^{134} вправо в направлении более тяжелых масс) связано с отмеченной выше особенностью взаимодействия (взаимного расталкивания) реальных ионных сгустков разных изотопов при их движении в протяженных вакуумированных каналах время-пролетного масс-спектрометра.

Из примерного равенства пиков, соответствующих Cs^{133} и Ba^{134} , следует очень высокая эффективность трансмутации цезия в барий. Коэффициент трансмутации равен $\lambda \approx 10^{-8}$ (синтезируемых ядер изотопа Ba^{134} за 1 с и на одно ядро изотопа Cs^{133}).

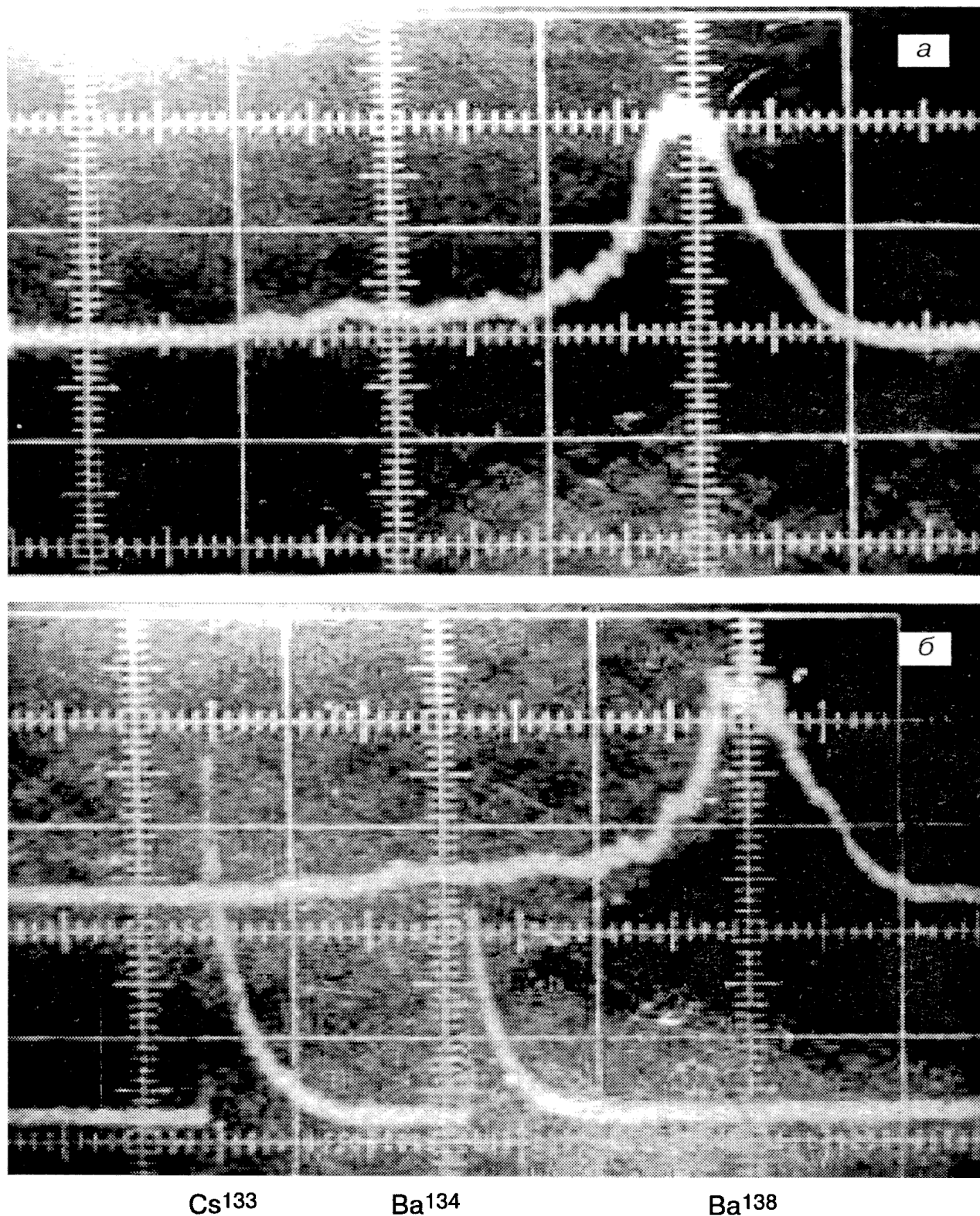


Рис. 4.11. Масс-спектр природного бария (верхняя кривая — присутствуют основной изотоп Ba^{138} и более редкие изотопы Ba^{134} , Ba^{135} , Ba^{136} , Ba^{137}) и синтезированный изотоп Ba^{134} при наличии изотопа Cs^{133} в выросшей культуре

4.4.3. Изучение комбинированного воздействия Sr, Cl и S на эффективность процесса трансмутации в биологических культурах

Хорошо известно, что случайный (а часто непредсказуемый) характер низкотемпературного синтеза является одной из тех основных характеристик, которые отличают его от «нормального» (горячего) синтеза и является одним из основных препятствий, которые тормозят его научное признание. Это обстоятельство стимулирует разработку способов управления таким процессом.

После неожиданных результатов экспериментов с заменой калия на цезий в среде, где происходит процесс трансмутации, логичным было изучение влияния на процесс синтеза тех элементов (Sr, Cl и S), которые, как следует из практики микробиологии, сами по себе оказывают стимулирующее или угнетающее воздействие на рост культур.

Мы провели серию исследований, посвященных изучению влияния этих элементов на эффективность реакции трансмутации $\text{Na}^{23} + \text{P}^{31} = \text{Fe}^{54}$ в растущей микробиологической культуре. Ни один из этих элементов не участвует непосредственно в ядерной реакции, но сами по себе они действуют по-разному на процесс роста культур: Cl подавляет процесс роста в наибольшей степени, S действует также угнетающе, но, как правило, гораздо слабее, а наличие в питательной среде ацетата CH_3COO^- ведет, как правило, к стимуляции процесса роста при любых условиях.

Исследования проводились на основе бактериальной культуры *Azotobacter chroococcum*. Эксперименты каждой серии имели следующие особенности.

Процесс роста проходил в средах, содержащих как традиционные и неизменяемые компоненты (KCl, KH_2PO_4 , NaNO_3 , чистую глюкозу и чистую легкую воду H_2O), так и переменные компоненты в зависимости от общей постановки задачи.

В частности, прежде всего проводилась замена базисных жизненно необходимых микроэлементов ($\text{Ca} \Leftrightarrow \text{Sr}$) с помощью солей CaCl_2 и SrCl_2 . Из биохимической практики хорошо известно, что ионы кальция и стронция химически подобны и способны замещать друг друга.

Вторая группа замен относилась к исследуемым химическим элементам, которые не являются жизненно необходимыми (Cl и S). Для большей эффективности и однозначности интерпретации эти элементы вводились в состав питательной среды в виде разных растворимых солей ($\text{MgCl}_2 \Leftrightarrow \text{MgSO}_4 \Leftrightarrow \text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) одного и того же химического элемента (магния), который является жизненно необходимым для роста культуры микроэлементом.

Состав питательных сред представлен в табл. 4.5.

Все используемые соли хорошо растворимы в жидкой питательной среде. До растворения в воде они были исследованы масс-спектрометрически на содержание железа. Температура и время выращивания культур типичны для микробиологических экспериментов (32°C и 24, 48 и 72 ч). Масса культуры в процессе роста увеличивалась в 4–5 раз.

В каждой серии исследований проводились следующие измерения:

- а) Получение полного масс-спектра по всем элементам (от водорода до урана) выращенной культуры (результаты этих измерений и концентрации присутствующих в культуре элементов представлены на рис. 4.12 и в табл. 4.6).
- б) Получение опорного масс-спектра всех изотопов железа (верхние кривые на рис. 4.13, 4.14, а–в).

Таблица 4.5. Состав питательных сред

Компоненты	Концентрация, %
Глюкоза	2
NaNO_3	0.5
KCl	0.05
KH_2PO_4	0.15
MnSO_4	0.01
Чистая дистиллированная вода H_2O	100
Переменные компоненты для трансмутации	
(1.) KCl_2	0.5
(1.1.) MgSO_4	0.05
(1.2.) MgCl_2	0.04
(1.3.) $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$	0.11
(2.) SrCl_2	0.5
(2.1.) MgSO_4	0.05
(2.2.) MgCl_2	0.04
(2.3.) $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$	0.11

в) Исследование масс-спектра изотопов в составе культур, выращенных в средах, подготовленных для трансмутации (композиции 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3).

Из полученного полного масс-спектра по всем элементам следует очень хорошая усвояемость стронция выращенной микробиологической культурой.

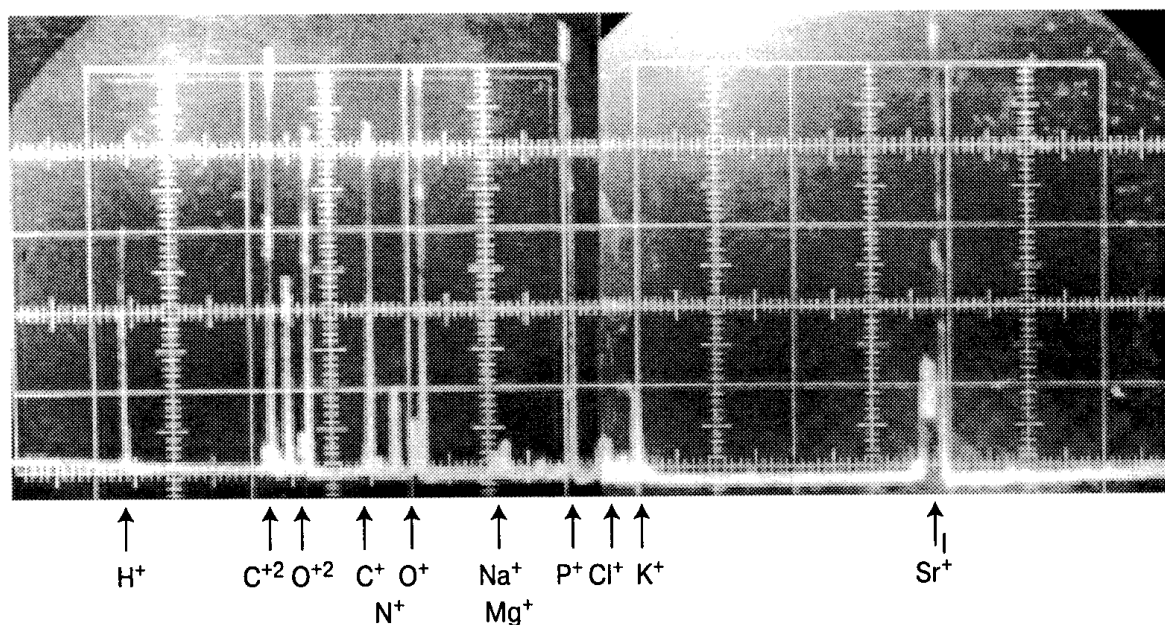


Рис. 4.12. Полный масс-спектр выращенной культуры при наличии в питательной среде стронция

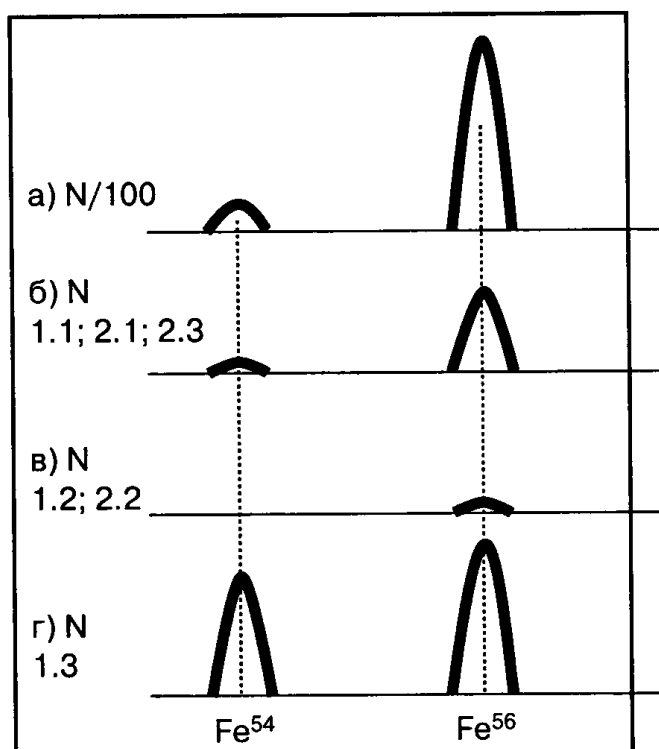


Рис. 4.13. Усредненный масс-спектр регистрируемых изотопов железа.
а — спектр природного железа; б–г — спектр культур, выросших в питательных средах с композициями 1.1–2.3

Фотографии с экрана осциллографа (рис. 4.14) демонстрируют несколько типичных результатов для зависимости вида масс-спектра разных изотопов железа от состава питательной среды.

Из полученных данных следует, что на процесс синтеза изотопа Fe^{54} влияет наличие Sr и (в меньшей степени) Cl (т. е. трансмутация наблюдается только при наличии солей MgSO_4 или $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$, а ее стимулирование — при наличии соли $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$).

В этом случае отношение концентраций равно

$$\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,2-0,4 \text{ (для композиции 1.1),}$$

$$\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0,5-0,6 \text{ (для композиции 1.3).}$$

В других случаях наблюдаемое в масс-спектре железо отсутствует или регистрируется на уровне фона (композиции 1.2 и 2.2) или соответствует изотопному отношению природного железа (композиции 2.1, 2.3), что подтверждает его чисто примесное происхождение.

Из полученных результатов следует общий вывод. Химические элементы, которые частично подавляют процесс роста культур (Sr, Cl и S), в еще большей степени подавляют процесс трансмутации в этих культурах.

Таблица 4.6. Состав питательных сред

Элемент	Композиция					
	1.1	2.1	1.2	2.2	1.3	2.3
H	0.49	0.74	1.44	0.33	0.14	0.58
C	15.0	12.6	31.3	29.3	14.0	11.3
N	5.8	3.8	6.8	1.10	1.63	3.13
O	14.0	11.8	31.3	29.3	13.1	23.4
Na	13.0	5.4	25.8	16.4	1.68	0.46
Mg	0.35	0.5	0.85	0.35	1.0	1.06
Al	0.15	0.16	0.31	0.66	0.15	0.53
P	18.0	17.2	1.1	11.6	27.1	41.2
S	3.0	3.8	—	—	—	—
Cl	7.5	16.5	0.4	1.98	1.0	1.3
K	22.0	18.0	0.15	2.07	39.5	8.65
Ca	0.2	0.8	0.47	0.92	0.34	1.86
Fe	0.1	0.16	<0.01	<0.01	0.13	0.23
Sr	—	5.1	—	4.3	—	5.9
Mo	—	0.26	—	0.38	—	0.18

В то же время элементы и их солевые композиции, которые стимулируют рост (в данном случае соль $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$), увеличивают также скорость синтеза и оптимизируют процесс трансмутации изотопов.

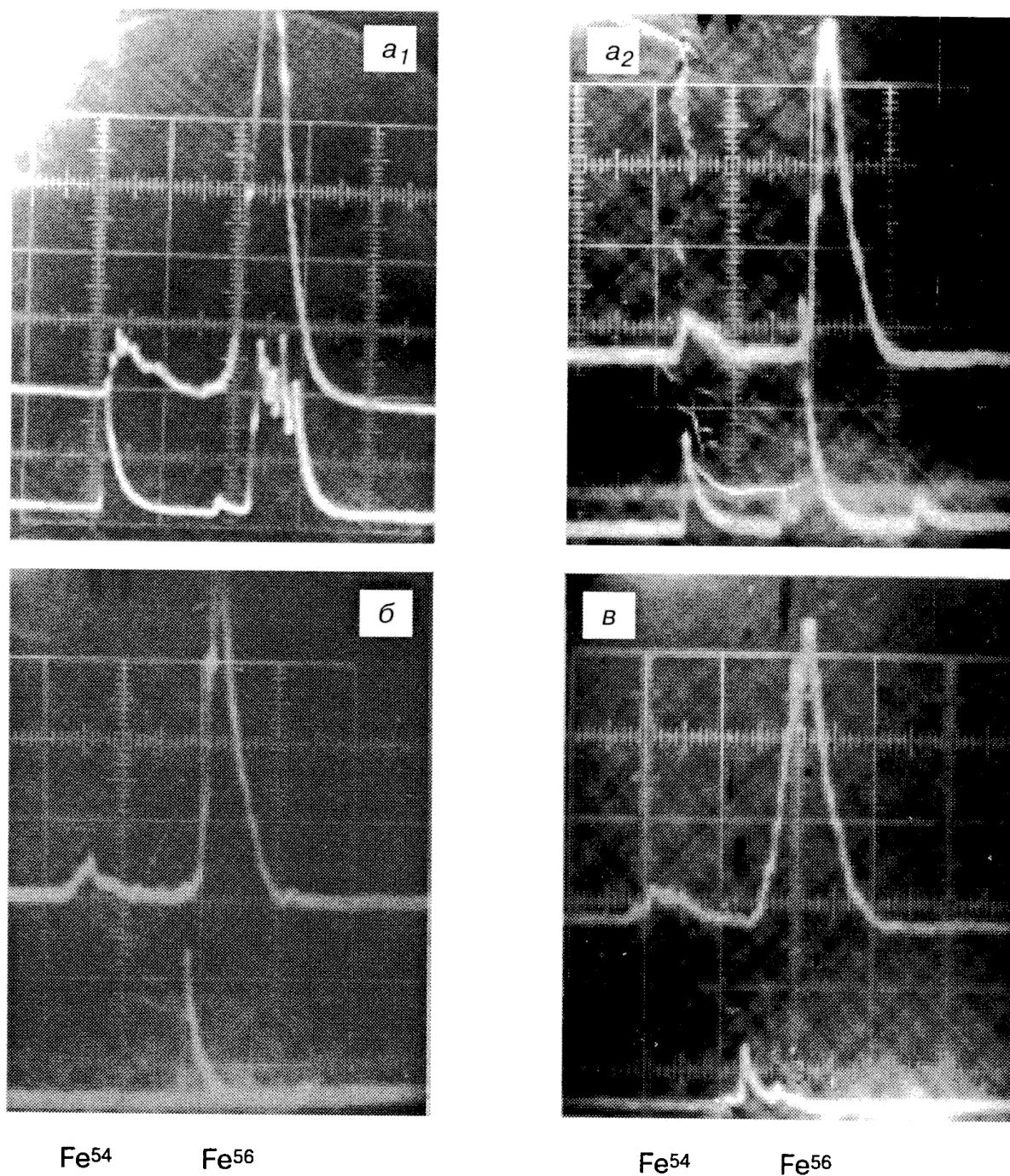


Рис. 4.14. Масс-спектр регистрируемых изотопов железа: верхние кривые — спектр природного железа, a_1 и a_2 — два независимых примера масс-спектра культуры, выросшей в среде 1.3 при наличии изотопов P^{31} и Na^{23} , а также соли $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_3$; $б$ — культура выросла в среде 2.1 при наличии P^{31} и Na^{23} , а также соли MgCl_2 ; $в$ — культура выросла в среде 2

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

5.1. ПРОБЛЕМА БЕСПОРОГОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА ПРИ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ С УЧАСТИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Хорошо известно, что наличие кулоновского потенциального барьера является основным препятствием осуществления ядерных реакций синтеза при низкой энергии взаимодействующих заряженных ядер. Для осуществления реакции необходимо, чтобы взаимодействующие частицы оказались одновременно в одном месте (в пределах радиуса действия ядерных сил $R_n \approx 2 \cdot 10^{-13}$ см). В этом случае сечение ядерной реакции зависит от энергии взаимного движения ядер и соответствует «внутреннему ядерному сечению»

$$\sigma_0 = (S(E)/E) \quad (5.1)$$

где $S(E)$ — медленно изменяющаяся функция энергии, которая при малой относительной энергии взаимодействующих частиц в случае нерезонансных ядерных реакций является константой $S(E) = S_0$. Например, для нерезонансной реакции dd-синтеза $S_0 \approx 0,11$ МэВ·бн.

Если выразить кинетическую энергию E взаимного встречного движения ядер в единицах эВ, то в случае чистого кулоновского взаимодействия (без учета экранирования зарядов ядер собственными электронами) наличие кулоновского потенциального барьера $V(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$ приводит к тому, что при классическом подходе минимальное расстояние между ядрами ограничено и определяется формулой:

$$r_{\min} = Z_1 Z_2 e^2 / E \approx 14 / E (\text{эВ}) \cdot \text{\AA} \quad (5.2)$$

Видно, что при низкой кинетической энергии ядер (на уровне, соответствующему тепловой энергии $E \approx 0,025$ эВ) ядра могут сблизиться только до макроскопических расстояний

$$r_{\min} \approx 640 Z_1 Z_2 \text{ \AA} \quad (5.3)$$

Наличие электронного экранирования приводит к более быстрому убыванию энергии взаимодействия, а именно, по экспоненциальному закону $V(r) = (Z_1 Z_2 e^2 / r) \exp(-r/a)$, что позволяет частицам с низкой энергией сблизиться до расстояния $r_{\min} \approx a$, примерно равного радиусу экранирования. Например, в молекуле дейтерия D_2 равновесное расстояние между дейтонами при комнатной температуре ($kT = 0,025$ эВ) равно $0,74 \text{ \AA}$. Для того чтобы достичь такого же сближения ядер в отсутствие экранирования, относительная энергия ядер должна быть около 20 эВ.

Вместе с тем, при любой разумной плотности электронов радиус экранирования на несколько порядков превосходит радиус действия ядерных сил R_n .

Альтернативой прямому (классическому) методу сближения взаимодействующих ядер является квантовомеханическое туннельное проникновение одного из ядер через потенциальный барьер, создаваемый другим ядром.

При таком взаимодействии сечение ядерной реакции

$$\sigma = (S(E)/E) P(E) \quad (5.4)$$

определяется произведением «внутреннего ядерного сечения» σ_0 и квазиклассической вероятности проникновения через кулоновский барьер $V(r)$ («фактора Гамова»)

$$P = \exp[-2 W(E)]$$

$$W(E) = \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2\mu(V(r) - E)} dr / \hbar = \sqrt{2\mu \langle V(E) \rangle} |r_2 - r_1| / \hbar \quad (5.5)$$

где r_1 и r_2 — классические «точки поворота» при движении одной из частиц в поле другой; μ — приведенная масса взаимодействующих частиц, $\langle V(E) \rangle$ — средняя высота потенциального барьера, лежащего выше уровня E .

Видно, что ширина барьера $|r_2 - r_1|$ (которая является линейной функцией координаты) влияет на фактор Гамова более существенно, чем его средняя высота $\langle V(E) \rangle$, входящая в (5.5) в виде квадратного корня.

В случае чистого кулоновского взаимодействия $V(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$ (без учета экранирования кулоновской потенциальной энергии взаимодействия ядер)

$$W(E) = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0 \quad (5.6)$$

где $v_0 = (2E/\mu)^{1/2}$ — асимптотическая (на большом расстоянии от области взаимодействия) относительная скорость сближения ядер.

Для чисто кулоновского взаимодействия плотность вероятности нахождения ядер в одном месте определяется волновой функцией (Давыдов, 1963)

$$|\Psi_n(0)|^2 = (2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0^2) \exp(-2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0) \quad (5.7)$$

Скорость ядерного синтеза (вероятность в единицу времени на одну пару взаимодействующих ядер) равна

$$\lambda_r = \Lambda |\Psi_n(0)|^2 \quad (5.8)$$

Здесь $\Lambda = S_0 \hbar / \pi \mu e^2$ — константа ядерного взаимодействия для конкретной пары ядер, равная, например, для dd-взаимодействия величине $\Lambda \approx 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

В естественных условиях (т. е. без нагрева до высокой температуры и без сверхсжатия) вероятность туннельного эффекта очень мала. Даже для наиболее оптимальной (в отношении максимальной прозрачности барьера) природной системы — молекулы дейтерия с расстоянием между ядрами $\Delta r \approx 0,74 \text{ \AA}$, вероятность туннельного эффекта при комнатной температуре исчезающе мала и равна $P \approx 10^{-150}$. Следствием этого является очень малая скорость синтеза $\lambda_r \approx 10^{-72} \text{ с}^{-1}$.

Отметим, что все приведенные соотношения для вероятности туннельного эффекта получены на основе стационарного уравнения Шредингера и поэтому относятся только к стационарному взаимодействию ядер, хотя сам процесс взаимодействия всегда нестационарный. Нестационарность любого взаимодействия очевидна хотя бы из-за того, что система взаимодействующих ядер имеет предысторию и была создана в какой-то момент времени в прошлом.

Из формулы (5.5) следуют два очевидных пути увеличения прозрачности барьера и достижения высокой эффективности синтеза — увеличение энергии или температуры частиц (это область термоядерного или ускорительного синтеза) и уменьшение ширины барьера при низкой температуре (это пикноядерный синтез при сжатии системы, а также мюонный катализ при уменьшении радиуса экранирования за счет захвата тяжелого μ -мюона хотя бы одним из участвующих в синтезе ядер).

Мюонный катализ был предложен независимо Франком (Frank, 1947) и Сахаровым (1948), а затем проверен в экспериментах (Alvarez, 1957). Сложность такой привлекательной модели в первую очередь связана с тем, что экранирующие поле ядра тяжелые μ -мюоны являются нестабильными частицами и имеют недостаточное для практических применений время жизни около 1 мкс.

Пикноядерный синтез был предложен в работах Зельдовича и Герштейна (1960), а также Харрисона (Harrison, 1964). Для достижения практически приемлемого результата необходимо решить крайне сложную задачу — сжатие конденсированной среды в 10^4 – 10^5 раз, что может привести к уменьшению ширины барьера в 10–15 раз.

Поиск оптимального пути привел к тому, что все ведущие лаборатории мира в начале 50-х годов XX столетия выбрали в качестве основного термоядерный механизм оптимизации синтеза и пытаются достичь успеха в квазистационарных системах долговременного удержания высокотемпературной плазмы низкого давления в магнитных ловушках или при использовании кратковременного сжатия в 100–1000 раз и инерционного удержания при всестороннем лазерном или пучковом сжатии конденсированной мишени.

Как показывает опыт последних 50 лет, этот путь осуществления ядерных реакций, основанный на термоядерном механизме, в условиях Земли оказался чрезвычайно затратным и неэффективным (в отличие от звезд, где стабилизация горячей термоядерной плазмы очень естественно и эффективно осуществляется силами гравитации). Общие затраты на термоядерные программы давно превысили 100 млрд. долларов США, а перспективы получения энергвыгодного синтеза остаются такими же неопределенными, как в начале пути.

5.2. ФЕНОМЕН «ХОЛОДНОГО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА»

Существует еще одна, непризнанная специалистами по термоядерным моделям, ветвь исследований ядерного синтеза, к которой можно отнести работы, в которых ядерный синтез наблюдался в отсутствие каких-либо высокоэнергетических воздействий.

Первыми из достоверно известных работ этого направления можно считать работы по образованию и регистрации гелия из водорода электрохимическим путем в присутствии палладия (Paneth, Peters, 1926). Общая атмосфера полного скепсиса и непризнание этих исследований ведущими физиками-ядерщиками того времени, привело к тому, что эти результаты были оценены как ошибочные и были отнесены

к области научных курьезов. Авторы этих работ были химиками, недостаточно хорошо знакомыми с ядерной физикой, что в итоге сыграло отрицательную роль в развитии таких исследований. Авторы не смогли отстоять свои эксперименты от критики «авторитетов» и обосновать их реальность.

Столь же малое внимание было уделено более поздним работам, в которых наблюдалась небольшая эмиссия нейтронов при механическом или электромеханическом воздействии на кристаллы, содержащие дейтерий (Клюев, 1986; Дерягин и соавт., 1986; Ярославский, 1986, 1989). Объяснить отсутствие общественного интереса к этим работам можно, по-видимому, тем, что в исследуемых кристаллах значительную роль играют ионные связи, что сразу наводило на мысль о проявлении ускорительного механизма из-за сильных электрических полей при разрыве этих связей.

Ажиотажный всплеск интереса возник только после заявлений двух групп исследователей из шт. Юта, которые независимо занимались электролитическим насыщением палладия и титана дейтерием. Флейшман и Понс из Солт-Лейк-Сити (Fleischmann, Pons, 1989) объявили о выделении большого количества избыточного тепла, регистрации нейтронов и трития. Джоунс из Прово (Jones, 1989) также объявил о регистрации в процессе электролиза нейтронов в количестве, существенно превышающем уровень фона. Это явление позже получило название холодный ядерный синтез.

Результаты независимой экспертизы этих исследований были противоречивыми.

Многие лаборатории мира сразу же подтвердили результаты Флейшмана, Понса и Джоунса, обнаружив новые, иногда парадоксальные (типа безнейтронных реакций dd -синтеза) закономерности протекания эффективных ядерных реакций при малой энергии, хотя отметили, что эффект недостаточно хорошо повторяем.

В то же время большинство крупнейших лабораторий, известных своей активной деятельностью в области термоядерных исследований, сразу объявили о том, что результаты не подтверждаются и высказали резко отрицательное отношение к самой возможности осуществления холодного ядерного синтеза. Более того, под их нажимом были приняты беспрецедентные административные меры, направленные на дискредитацию и запрет таких исследований. Методы дискредитации были аналогичны инквизиции. В частности, в США был наложен официальный запрет на финансирование этих исследований на основе государственных грантов. Запрет был наложен также на возможность

публикации результатов в наиболее авторитетных научных изданиях. Таких акций «борьбы с ведьмами» наука не знала со времен средневековья.

Однако «джин был выпущен из бутылки» и остановить научный поиск в альтернативном направлении синтеза административными мерами не удалось. Около 50 специализированных научных групп в Европе, Азии и Северной Америке занимались и продолжают заниматься изучением природы холодного ядерного синтеза.

За последнее десятилетие была существенно усовершенствована техника и методика экспериментов по холодному ядерному синтезу, найдены более эффективные ядерные реакции, существенно видоизменена техника регистрации, что в итоге привело к значительному повышению достоверности и повторяемости результатов.

Частично эти результаты изложены в ряде обзоров (например, (Царев, 1990,1992,1993)).

Среди наиболее убедительных результатов можно отметить надежно фиксируемую генерацию нейтронов (Arata, Zhang, 1992; Takahashi, 1992), выход избыточного тепла (McKubre, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 2000; Storms, 1991, 1996, 2000; Miles, 1990, 1993a,b, 1994, 1997; Miles, Bush, 1994; Miles et al., 2000; Arata, Zhang, 1994, 1995, 1996, 1997, 2000; Takahashi, 1992; Patterson, 1994, 1997), трансмутацию изотопов в тлеющем разряде в дейтерии (Karabut, 1992; Карабут, 1994; Savvatimova, 1992, 1998), а также трансмутацию при электролизе (Iwamura Y. et al. 2000). Непосредственно примыкают к этой проблеме работы по обнаружению трансмутации химических элементов в биологических системах (Kervran, 1963, 1966, 1968, 1998; Komaki, 1965, 1967, 1993), а также цикл работ по трансмутации изотопов в микробиологических культурах (Высоцкий, Корнилова, Самойленко, 1996; Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996, 2000, 2001).

Наряду с этими основной недостаток «раннего» холодного ядерного синтеза — недостаточно хорошая повторяемость экспериментальных результатов — в значительной степени остался и присущ даже самым достоверным работам.

Другие недостатки методов регистрации ХЯС отмечены в ряде критических обзоров (Morrison, 1994; Huizenga, 1993; Taubes, 1993).

В настоящее время можно считать надежно установленными такие основные черты феномена холодного ядерного синтеза, кардинально отличающие его от области средних и высоких энергий, как спорадический нестационарный характер в стационарных условиях, практически полное отсутствие радиоактивности итоговых продук-

тов, очень существенное изменение весовых долей разных каналов реакции. При этом главное и кардинальное отличие состоит, естественно, в том, что синтез протекает при тех условиях, которые его полностью запрещают, если исходить из теории, успешно работающей при большой энергии.

В связи с этим возникает вопрос о том, где содержится логическая ошибка — то ли при экстраполяции теории ядерных реакций при большой энергии в область низкой энергии, то ли сама теория реакций при высокой энергии строилась так, что изначально игнорировала некоторые важные закономерности, присущие взаимодействиям при очень низких энергиях?

По нашему мнению, более правильной является вторая часть поставленного вопроса и мы попробуем обосновать это мнение в следующем разделе.

К настоящему времени опубликовано более 300 работ, в которых с разной степенью аргументации предложены различные физические модели, которые способны, по мнению их авторов, объяснить феномен «холодного ядерного синтеза» или, по крайней мере, обосновать пути к его объяснению. Можно сказать, что теория холодного ядерного синтеза является своеобразной вершиной (вроде знаменитой теоремы Ферма), которую пытается покорить каждый уважающий себя физик-теоретик из числа тех, кто не считает, что это просто мираж. Количество теоретических работ по ХЯС и их разнообразие позволяют проводить их своеобразную сортировку и классификацию. Этот процесс был начат в обзорной статье (Chechin et al., 1994) после того, как число теоретических работ «набрало критическую массу». Из числа недавних обзоров можно отметить работу (Киркинский, Новиков, 1998). В этих обзорах используется примерно одинаковая и логически обоснованная система классификации, которой придерживаемся (за малым исключением) и мы. Данные этих обзоров дополнены нами более поздними работами.

5.2.1. Ускорительные модели

(Дерягин и др., 1986; Голубничий и др., 1989; Fleischmann, Pons, 1989; Липсон, 1989; Cohen, Davies, 1989; Joyce, 1989; Gac et al., 1989; Cassandro et al., 1989; Goldanskii, Dalidchik, 1989; Pool, 1989; Takeda, Takizuka, 1989; Царев, 1990, 1991; Зеленский, Рыбалко, 1990; Lin et al., 1990; Rabinovitz, Worledge, 1990; Tabet, Tenenbaum, 1990; Jorne, 1990; Филимонов, 1990; Zhang, 1991; Chechin, Tsarev, 1992; Yasui, 1992; Chechin

et al., 1994; Kühne, 1994; Вараксин и др., 1991; Fedorovich, 1991; 1992, 1993; Федорович, 1995; González-Martin et al., 1993; Arata, Zhang, 1995; Казачковский, 1995)

5.2.2. Уменьшение кулоновского барьера вследствие электронного экранирования

(Vaselli, 1989; Fujita, 1989; Burrows, 1989; Koonin, Nauenberg, 1989; Parmenter, Lamb, 1989; Мазитов, 1989; Bhattacharjee, 1989; Bussard, 1989; Rabinovitz, Worledge, 1989; Карасевский, 1989; Feng, 1989; Ichimaru, 1989, 1990, 1993; Jändel, 1990; Balian et al, 1989; Давыдов, 1989; Rabinovitz, 1990; Azbel, 1990; Hora et al., 1990, 1993, 1998; Seeliger, 1991; Kim, 1991; Rambaut, 1992; Демиденко, Симаков, 1993; Harrison, 1994; Фимин, 1996; Violante, De Ninno, 1996)

5.2.3. Когерентные и интерференционные эффекты с участием кристаллической решетки

(Высоцкий, Кузьмин, 1981; Turner, 1989; Bressani, 1989; Bush, 1990; Christos, 1990; Danos, 1990; Chatterjee, 1990; Preparata, 1990, 1991, 1995, 1996; Danos, Belyaev, 1991; Vaidya, 1991; Kim, Zubarev, 1993; Kim, 1994; Kim et al., 1994; Fedorovich, 1994; Сапогин, 1994, 1997)

5.2.4. Ферми и Бозе-конденсация ядер

(Matsumoto, 1989; Vysotskii, Kuzmin, 1990, 1991, 1994; Greenland, 1990; Dienes, 1991; Nordlander et al., 1992; Vysotskii, Kuzmin, 1991; Высоцкий, 1994; Chubb, Chubb, 1990, 1991, 1993; Waber, 1997; Kim, 2000)

5.2.5. Реакции, стимулированные фононами кристаллической решетки

(Schwinger, 1989, 1990; Petrillo, Sacchetti, 1989; Hagelstein, 1990, 1994, 1997, 1998; Baldo et al., 1990; Crawford, 1992; Тисенко, 1993; Rambaut, 1994; Rao, Chaplot, 1994; Liu, 1996; Swartz, 1996)

5.2.6. Экзотическая химия

(Mills, Farrel, 1990; Cerofolini, Re, 1990; Ганн, Походящий, 1990; Gryzinski, 1990; Barut, 1990; Мойжес, 1991; Mills, Kneizys, 1991; Maly, Vávra, 1993; Samsonenko, 1996, 1997)

5.2.7. Катализ тяжелыми (трансмюонными) частицами

(Shaw et al., 1989; Takahashi, 1989, 1991; Rafelski et al., 1990; Бажутов, Верешков, 1992, 1993; Nedospasov, Mudretskaya, 1995)

5.2.8. Реакции под действием нейтронов

(Kim, 1989; Anderman, 1990; Hagelstein, 1990, 1991; Matsumoto, 1989, 1990a; Fisher, 1992; Липсон и др., 1993; Липсон, Саков, 1994; Kozima, 1994, 1996)

5.2.9. Специфические ядерные эффекты

(Schwinger, 1989; Becker, 1989; Ragheb, Miley, 1989; Paolo, 1989; Shibab-Eldin et al., 1989; McNally, 1989; Kim, 1989, 1990; Frodl et al., 1990; Zakowicz, 1990; Kim et al., 1990; Rabinowitz, 1990a; Покропивный, Огородников, 1990; Russel, 1990; Chatterjee, 1991; Kenny, 1991; Tsuchiya, 1994; Mayer, Reitz, 1991; Mayer, Reitz, 1991; Yang, 1991; Истомин, Калиев, 1994; Arata, Zhang, 1996; Samsonenko, 1996, 1997; Takahashi, 1998; Dufour et al., 1998; Kim, Zubarev, 2000)

5.3. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФЕНОМЕНА «ХОЛОДНОГО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА» В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

5.3.1. Существует ли специфический механизм осуществления низкотемпературного ядерного синтеза в биологических системах?

Множество и разнообразие теоретических моделей феномена «холодного ядерного синтеза» относится только к классическим объектам и моделям физики (ядра, электроны, кристаллы, плазма). Существует ли некая специфика биологических объектов, выделяющая их из этого естественного ряда? Коректно ли название «биологическая трансмутация» или это просто обычная трансмутация, но протекающая в биологических системах? Какой механизм может обеспечить протекание реакций синтеза трансмутации в растущих микробиологических культурах?

Для ответа на эти очень непростые вопросы прежде всего уточним концептуальную основу процессов, которые могли бы, на наш взгляд, обеспечить эффективное протекание ядерных реакций при низкой температуре и отсутствии других экстремальных условий.

Во-первых, традиционная ядерная физика (особенно в той ее части, которая касается процессов взаимодействия и рассеяния) строилась

на основе представлений о том, что поскольку процесс парного взаимодействия протекает в очень малой области и обусловлен действием очень сильных полей (внутриядерных или кулоновских), то влияние объектов и полей, находящихся далеко за пределами области взаимодействия, всегда априори несущественно, т. е. фактически за редким исключением, постулировалась полная изолированность ядерного взаимодействия от окружения. При этом в качестве обоснования обычно используется аргумент о том, что с увеличением энергии и импульса волновые свойства взаимодействующих частиц (обеспечивающие глобальный, а не локальный характер взаимодействия) проявляются слабее. Кроме того, считается, что само упоминание о том, что энергия взаимодействия между ядрами намного сильнее, чем характерные энергии взаимодействия в окружающей среде, автоматически доказывает возможность пренебрежения влиянием среды на ядерные процессы.

В действительности, из-за присущих любым микрообъектам волновых свойств, такая концепция отнюдь не бесспорна (и не только в области малых энергий взаимодействующих частиц). Ее ошибочность проявилась, например, в эффекте Мессбауэра, который четко продемонстрировал зависимость процессов взаимодействия γ -излучения с ядрами от макроскопических свойств матрицы. Еще одной иллюстрацией может служить тот факт, что при взаимодействии быстрых электронов с упорядоченной решеткой в проблеме каналирования волновые свойства частиц проявляются тем сильнее, чем больше их энергия (это обусловлено тем, что длина области когерентного рассеяния возрастает пропорционально импульсу частиц, так что для релятивистских частиц она существенно превышает межатомное расстояние и может достигать макроскопических значений). К подтверждению сказанного можно также отнести нетривиальное влияние диэлектрической проницаемости разреженного воздуха на динамику преобразования космических лучей очень большой энергии в верхних слоях атмосферы.

Во-вторых, практически все квантовомеханические модели, используемые для описания возможных сценариев протекания ядерных процессов в задачах низкотемпературного синтеза, основывались на стационарном (или квазистационарном) подходе.

Подтверждением этому служит хотя бы тот факт, что базовое для анализа процессов синтеза понятие сечения реакции используется как сугубо стационарная характеристика, хотя на самом деле сечение реакции (если его понимать как вероятность реакции, отнесенную к одной частице-мишени при единичной плотности потока налетающих частиц), безусловно нестационарная функция времени, всегда равная нулю в начале

процесса. Этот вывод сразу следует из соотношения неопределенности Гейзенберга, поскольку неопределенность энергии налетающей частицы $\delta E \geq \hbar/2\delta t$ в начальный момент взаимодействия (при $\delta t \rightarrow 0$) всегда является неограниченно большой по отношению к характерной области энергий ΔE , где реализуется данный канал взаимодействия, что сразу доказывает малую весовую долю этого конкретного канала реакции. Справедливости ради необходимо отметить, что такой эффект увеличения δE иногда используют для прогнозирования надбарьерного прохождения частиц.

Еще один механизм, приводящий к нестационарности сечения реакции и ее обращению в нуль в начале процесса взаимодействия из-за наличия релаксационных процессов, рассмотрен в книге (Высоцкий, Кузьмин, 1989). Адекватное описание процесса взаимодействия в любой смешанной системе (например, в системе двух ядер, которые всегда связаны с имеющимся термостатом, в роли которого выступают собственные электроны, окружающие атомы, квантованные электромагнитные и пионные поля и др.) может быть проведено только на основе метода матрицы плотности. Это существенно отличает смешанную систему от чистой системы в виде двух частиц, которые можно описать с помощью волновых функций в том случае, когда учитывать только идеализированное чисто парное взаимодействие и полностью игнорировать взаимодействие с окружением. Анализ подобных задач показывает, что сечение реакции всегда является нестационарной функцией времени, равной нулю или очень малой для моментов времени, много меньших времени релаксации недиагональных матричных элементов, и асимптотически переходит в свое стационарное значение только для момента времени, значительно превышающего это время релаксации (Высоцкий, Воронцов, 1974). И хотя время релаксации недиагональных матричных элементов уменьшается с усилением связи с термостатом, оно никогда не равно нулю. Отсюда следует простой логический вывод — для очень малых моментов времени после «включения взаимодействия» отклик системы на это взаимодействие равен нулю. Естественно, что это же относится и к такому рутинному результату взаимодействия, как рассеяние в кулоновском поле.

Эти явления относятся к анализу особенностей сечения реакции (в частности рассеяния) при малом времени с момента начала взаимодействия. Однако нестационарность реакции (в том числе обращение сечения рассеяния в нуль) будет проявляться и в последующие моменты времени.

По нашему мнению, учет этих обстоятельств является одним из своеобразных ключей к проблеме, а адекватная теория должна обязательно учитывать их.

По-видимому, в наибольшей степени это относится к растущим биологическим системам. Эти системы вследствие непрерывности процесса жизнедеятельности принципиально нестационарны, естественно сочетают относительную стабильность и абсолютную изменчивость (особенно на молекулярном уровне) и этим безусловно отличаются от стационарных кристаллов или квазистационарной плазмы. При этом сам характер процессов в транспортных и ферментных системах при непрерывном синтезе белка и столь же непрерывном воспроизводстве клеток непосредственно основывается на молекулярных процессах при непосредственном воздействии и контроле (как в переносном, функциональном, так и в прямом пространственно-конформационном смысле) разного рода молекулярных комплексов.

Для подтверждения этого тезиса достаточно привести пример селективного транспорта в мембранных каналах, диаметр и форма которых непрерывно изменяются, адаптивно и целенаправленно реагируя на вид ионов. В неживой природе нет примеров сочетания такой изменчивости с устойчивостью в среднем.

Эти обстоятельства четко демонстрируют необходимость последовательного учета квантовомеханических характеристик как взаимодействующих частиц (в данном случае ядер, участвующих в синтезе и трансмутации), так и объектов, непосредственно примыкающих к области взаимодействия.

По нашему мнению, проявление таких характеристик и составляет отличительную особенность протекания низкотемпературного ядерного синтеза и трансмутации в биологических системах. Таким образом, хотя понятие «биологическая трансмутация» изотопов по сути ошибочно и должно быть заменено на более корректное определение «трансмутация, протекающая в биологических системах», но специфика трансмутации в динамичных по своей природе биологических системах безусловно существует, а сам процесс трансмутации при этом оказывается гораздо более эффективным.

5.3.2. Возможный механизм безбарьерного ядерного синтеза в оптимальных квантующих потенциальных ямах в нестационарном режиме

Какая же модель в наибольшей степени соответствует перечисленным выше требованиям? Мы полагаем, что наиболее эффективным в случае динамичных биологических систем является механизм, предложенный нами ранее (Vysotskii, 1994; Vysotskii et al., 1996, 2000)

и способный на короткое время устранить влияние кулоновского барьера ядерной реакции в потенциальной яме со структурой, близкой к параболической.

Рассмотрим этот механизм более подробно на примере проведенной нами реакции синтеза мессбауэровского изотопа $\text{Mn}^{55} + d^2 = \text{Fe}^{57}$ в растущих микробиологических системах (Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996).

Допустим, что атом марганца находится в центре трехмерной потенциальной параболической ямы. Благодаря процессу диссоциации в жидкой среде имеется большое количество свободных дейтонов (при $T=300$ К вероятность диссоциации равна $\xi \approx 10^{-10}$). Когда дейтон d в результате диффузии попадает в яму, в ней появляется комплекс $\text{Mn} + d$, который дополняется обобществленным электроном из решетки. В свободном пространстве этот комплекс не может образовать молекулу за счет ковалентных или ионных связей, но мог бы образовать устойчивую квазимолекулу $(\text{MnD})^+$ при очень низкой температуре за счет, например, сил Ван-дер-Ваальса. В квантованной системе ситуация более сложная.

Известно, что процесс рассеяния для заряженных частиц определяется в основном кулоновским отталкиванием ядер и

$$V(r) = Ze^2/r > 0 \quad \text{при } r < a/Z \quad (a \equiv \hbar^2/me^2)$$

Может ли эта энергия быть малой поправкой и не влиять на характер движения ядер в квантовой системе? Если да, то при каких условиях это возможно?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим процесс взаимодействия и рассеяния частиц в яме.

Рассмотрим задачу рассеяния частицы (дейтона) на ядре марганца в импульсном представлении, которое в данном случае более адекватно описывает задачу.

Для того чтобы более детально рассмотреть суть процесса кратковременного исключения влияния кулоновского барьера, вначале рассмотрим модельную задачу, когда одна из взаимодействующих частиц постоянно находится в яме и неподвижна (классический центр рассеяния), а вторая движется по законам квантовой механики с учетом взаимодействия с полем ямы и с первой частицей.

Волновая функция движущейся частицы в потенциальной яме $U(r)$ имеет вид когерентной суперпозиции

$$\psi(r, t) = \sum_p C_p \psi_p(r) \exp(-iE_p t/\hbar) \quad (5.9)$$

определяемой спектром уровней энергии E_p частицы в яме и собственными

ми координатными функциями частицы $\psi_p(r)$, соответствующими этим уровням энергии.

Уравнение Шредингера имеет вид

$$i\hbar \partial C_{p_0} / \partial t = \sum_p C_p V_{p_0 p} \exp[i(E_p - E_{p_0})/\hbar]$$

$$V_{p_0 p} = \int \Psi_{p_0}^*(r) V(r) \Psi_p(r) d^3r \quad (5.10)$$

Конкретизируем задачу. Пусть частица попала в яму в момент времени $t=0$. В начальный момент состояние частицы характеризуется энергией E_{p_0} и волновой функцией $\Psi_{p_0}(r)$ (при этом $C_{p_0} = 1$).

В борновском приближении процесс рассеяния частицы описывается уравнением

$$i\hbar \partial C_p / \partial t = C_{p_0} V_{p p_0} \exp[i(E_{p_0} - E_p)/\hbar] \quad (5.11)$$

Вопрос об обоснованности использования борновского приближения для задачи рассеяния на кулоновском потенциале с исчерпывающей полнотой изложен Бомом в его известной книге по квантовой теории (Бом, 1965): «Борновское приближение часто дает удивительно хорошие результаты, несмотря на то, что не выполняется ни один из общих критериев его применимости. Это обусловлено следующими причинами.

Около границы атома сила далека от кулоновской, но она мала, так как большая часть заряда ядра экранируется электронами. Поэтому здесь борновское приближение применимо просто из-за малости $V(r)$. Внутри атома потенциал $V(r)$ настолько велик, что можно ожидать полной непригодности борновского приближения, но здесь отсутствует экранирование и потенциал кулоновский, поэтому точный результат близок к тому, который дает приближение Борна. Следовательно, во всем атоме борновское приближение дает сравнительно хороший результат, который, однако, не может быть объяснен общими положениями».

Решение уравнения движения при начальном условии $C_{p_0}(0)=1$, $C_p(0)=0$ имеет вид

$$|C_p(t)|^2 \equiv W_{p_0 p}(t) = |V_{p_0 p}|^2 \frac{\sin^2[(E_{p_0} - E_p)t/2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p)/2]^2} \quad (5.12)$$

Это выражение имеет очевидный смысл вероятности рассеяния частицы с переходом из начального состояния $\Psi_{p_0}(r)$ с энергией E_{p_0} в произвольное другое состояние $\Psi_p(r)$ с энергией E_p за счет взаимодействия с рассеивающим центром (другой частицей).

Отметим, что эта вероятность является достаточно сложной немонотонной функцией времени.

Дальнейший анализ задачи принципиально отличается для двух случаев:

- а) для отмеченной выше и традиционно используемой модели чисто парного взаимодействия в свободном пространстве и без учета влияния других тел и полей;
- б) для рассматриваемой нами задачи о взаимодействии частиц в конкретном квантующем поле $U(r)$.

а) Сначала рассмотрим анализ задачи рассеяния на основе традиционной модели рассеяния в свободном пространстве.

Для случая свободного пространства, аппроксимируемого неограниченно возрастающим объемом квантования V_0 , можно ввести трехмерную плотность конечных состояний в импульсном пространстве, соответствующих разным значениям импульса

$$\rho(p) \equiv dN/dp = (d/dp) \iiint d^3x \iiint d^3p / (2\pi\hbar)^3 = V_0 / (2\pi^2\hbar^3) \quad (5.13)$$

Видно, что расстояние между соседними разрешенными состояниями в импульсном пространстве с отличающимися значениями импульса

$$\rho(p)^{-1} = (2\pi^2\hbar^3) / V_0 \quad (5.14)$$

и с неограниченным увеличением размеров области квантования ($V_0 \rightarrow \infty$) неограниченно уменьшается.

После этого дифференциальная вероятность рассеяния частицы в направлении телесного угла $\delta\Omega$ и конечного импульса p в интервале dp принимает вид

$$dW(p, t) = \rho(p) |C_p(t)|^2 dp_x dp_y dp_z = \rho(p) |C_p(t)|^2 p^2 dp \delta\Omega \quad (5.15)$$

После этого, используя нерелятивистскую связь энергии и импульса $E_p = p^2/2M$ можно ввести плотность конечных состояний энергии

$$\rho(E_p) = \sqrt{2M^{3/2} E_p} \rho(p)$$

и преобразовать (5.15) к виду, определяющему дифференциальную вероятность рассеяния частицы в том же направлении $\delta\Omega$ с одновременным переходом в состояние с энергией E_p в интервале dE_p

$$dW(E_p, t) = \rho(E) |C_p(t)|^2 dE_p \delta\Omega \quad (5.16)$$

После подстановки (5.13) находим выражения для полной вероятности рассеяния частицы в направлении $\delta\Omega$ в момент времени t

$$\delta W(t) = \rho(E) \delta\Omega \int |V_{p_0 p}|^2 \frac{\sin^2[(E_{p_0} - E_p)t/2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p)/2]^2} dE_p \quad (5.17)$$

Далее обычно поступают следующим образом. При использовании одного из определений дельта-функции Дирака

$$\frac{\sin^2 xt}{\pi t x^2} = \delta(x) \quad (5.18)$$

которое имеет место при большом значении t , выражение (5.17) легко интегрируется, что сразу приводит к итоговому хорошо известному выражению для полной вероятности рассеяния в телесный угол $\delta\Omega$

$$\delta W(t) = (2\pi/\hbar) t \rho(E) |V_{p_0 p}|^2 \delta\Omega \quad (5.19)$$

Из (5.19) после подстановки явного выражения для $\rho(E_p)$ можно найти формулу для стационарного сечения рассеяния (Бом, 1965)

$$\sigma = |V_{p_0 p}|^2 (2\pi M/\hbar^2)^2 \quad (5.20)$$

Из (5.18) видно, что вероятность рассеяния монотонно возрастает с увеличением времени, нигде не обращаясь в нуль. Сечение рассеяния частицы (5.19) на рассеивающем центре также отлично от нуля, что в итоге соответствует сильному рассеянию и малой вероятности попадания одного ядра в область локализации другого.

Эти формулы обычно используются как универсальные (в том числе и при анализе условий осуществления ядерных реакций), хотя они были получены при некоторых ограничениях (в частности, при условии неограниченного возрастания объема квантования V_0 , что соответствует переходу к свободному пространству и пренебрежению наличием других тел и при использовании асимптотической формулы (5.18), которая справедлива только при очень больших t).

б) Проведем альтернативное рассмотрение задачи о взаимодействии и рассеянии частиц в конкретном квантующем поле $U(r)$ с дискретным распределением уровней.

Рассмотрим ситуацию, которая соответствует рассматриваемому выше рассеянию в трехмерной параболической яме, потенциальная энергия которой равна

$$U(r) = kr^2/2 = M\omega_0^2 r^2/2 \quad (5.21)$$

Здесь $\omega_0 = \sqrt{2U_0/MR^2}$, $k = M\omega_0^2$, $U_0 \equiv U(R)$ — высота стенок параболической потенциальной ямы.

Для параболической потенциальной ямы спектр уровней энергии также эквидистантный, отсчитывается от дна ямы и имеет вид

$$E_n = \hbar\omega_0(n + 3/2), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.22)$$

Найденная выше вероятность рассеяния с заселением конкретного уровня энергии E_p определяется решением (5.13)

$$W_{p_0 p}(t) \equiv |V_{p_0 p}|^2 F((E_{p_0} - E_p), t)$$

в котором зависимость от времени и энергии определяется функцией

$$F(E, t) = \frac{\sin^2[(E_{p_0} - E_p)t / 2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p) / 2]^2} \quad (5.23)$$

После подстановки энергии уровней E_n (5.22) в функцию (5.23) находим

$$F(E, t) = \frac{\sin^2[\omega_0 t(n_0 - n) / 2]}{\hbar^2[\omega_0(n_0 - n) / 2]^2} \quad (5.24)$$

Видно, что функция $F(E, t)$ и связанная с ней вероятность рассеяния являются осциллирующими функциями времени и характеризуется эквидистантным распределением нулей.

Это означает, что для последовательности моментов времени (начиная с момента попадания частицы в яму $t=0$)

$$\tau_k = 2\pi k / \omega_0, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5.25)$$

в конкретной параболической потенциальной яме вероятность рассеяния одной частицы на другой с переходом рассеиваемой частицы из начального уровня $E_{n_0} \equiv E_{p_0}$ на любой из уровней $E_n \equiv E_p$ обращается в нуль.

Эта ситуация изображена на рис. 5.1 для трех последовательных моментов времени.

Очевидная причина такого эффекта состоит в том, что именно в оптимальные моменты времени τ_k в спектре взаимодействия частиц отсутствуют компоненты с энергией, соответствующей междуровневым переходам или рассеянию в направлении любого разрешенного собственного состояния. Имеет место интерференционное подавление действия кулоновского рассеивания. А поскольку в квантованном поле $U(r)$ отсутствуют уровни энергии и состояния, отличные от собственных состояний, то в эти моменты времени рассеяние вообще оказывается запрещенным. Это соответствует тому, что в эти моменты времени τ_k (и, естественно, в пределах небольших интервалов времени около всех значений τ_k) действие кулоновского отталкивания оказывается несущественным. В эти моменты времени состояния частиц вообще не зависят от их взаимодействия, а определяются только свойствами квантующего поля.

Легко провести обобщение рассмотренного случая, когда одна из частиц фиксирована в яме, а вторая движется в соответствии с харак-

тером взаимодействия с первой частицей и с полем потенциальной ямы, на случай, когда движутся обе частицы.

Если частицы одинаковые, то они имеют общую систему квантовых уровней. При этом запрет рассеяния одной частицы в моменты времени τ_k (5.25) автоматически запрещает рассеяние другой частицы.

Если частицы разные, то каждая из них характеризуется своей системой уровней энергии в потенциальной яме, своими характерными частотами $\omega_0^{(i)}$ и, соответственно, своими значениями моментов времени $\tau_k^{(i)}$ (5.25), при которых рассеяние невозможно. Однако поскольку единственной причиной рассеяния одной частицы является ее взаимодействие с другой частицей, то запрет рассеяния в определенные моменты τ_k для одной частицы соответствует такому же запрету рассеяния для другой. Таким образом, действие кулоновского барьера устраняется в те моменты времени, которые соответствуют наборам значений $\tau_k^{(i)}$ для каждой из частиц.

В эти моменты времени фактор Гамова $P = \exp[-2W(E)]$ становится равным нулю, а эффективное сечение реакции синтеза $\sigma = (S(E)/E)P(E)$ соответствует внутреннему ядерному сечению $\sigma_0 = (S_0/E)$.

Тот факт, что в моменты времени τ_k локализация частиц в одной и той же яме определяется не их взаимодействием, а независимым влиянием квантующего потенциального поля, приводит к тому, что волновая функция одной частицы в месте нахождения другой $\Psi_n(0)$ не зависит от туннельного эффекта и, вследствие этого, может быть произвольной (она определяется только из условий квантования в поле U_0).

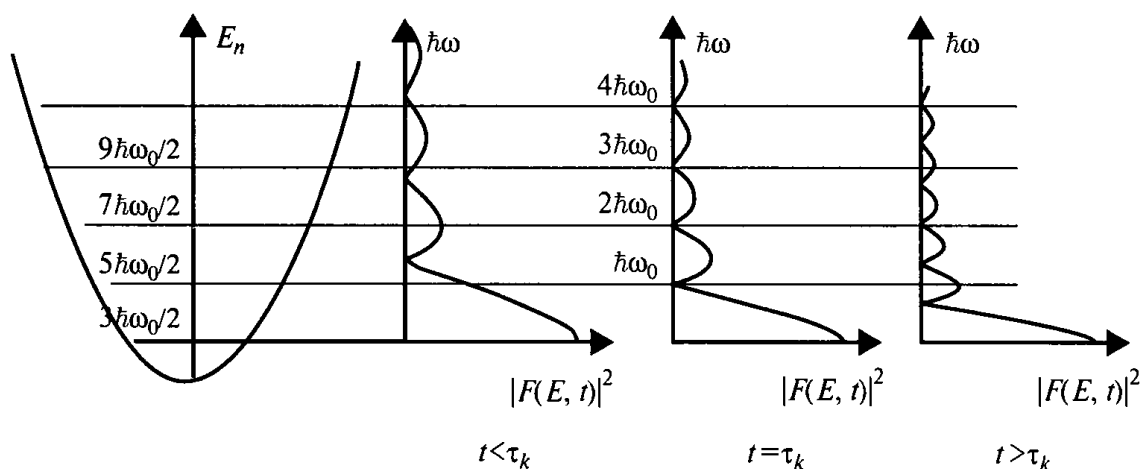


Рис.5.1. Соотношение между уровнями энергии E_n в трехмерной параболической потенциальной яме и полной вероятностью рассеяния для случая короткого ($t < \tau_k$), оптимального ($t = \tau_k$) и большого ($t > \tau_k$) совместного времени нахождения двух взаимодействующих частиц в этой яме

В частности, в квазиклассическом приближении интенсивности волновых функций $\Psi_n(\mathbf{r}_A)$, $\Psi_\alpha(\mathbf{r}_B)$ каждой из частиц определяется выражениями

$$|\Psi_n(\mathbf{r}_A)|^2 \approx 2/[\pi^2 R_n^3 (1 - r_A^2/R_n^2)^{1/2}] \quad \mathbf{r}_A \leq R_n$$

$$|\Psi_\alpha(\mathbf{r}_B)|^2 \approx 2/[\pi^2 R_\alpha^3 (1 - r_B^2/R_\alpha^2)^{1/2}] \quad \mathbf{r}_B \leq R_\alpha$$

Здесь $R_n = (2E_n/M\omega_0^2)^{1/2} = [2\hbar(n + 3/2)/M\omega_0]^{1/2}$ — классическая амплитуда колебаний частицы с энергией E_n в параболическом потенциальном поле.

Скорость реакции при таком делокализованном распределении участвующих в реакции частиц описывается формулой, являющейся обобщением (5.8):

$$\lambda_r = \Lambda \int |\Psi_n(\mathbf{r})|^2 |\Psi_\alpha(\mathbf{r})|^2 d^3r \approx (16C/\pi^2 R_n^3 R_\alpha^3) \int_0^{R_{\max}} (1 - r^2/R_n^2)^{-1/2} (1 - r^2/R_\alpha^2)^{-1/2} r^2 dr \quad (5.26)$$

В формуле (5.26) R_{\max} определен соотношениями

$$R_{\max} = R_n \text{ если } R_n \leq R_\alpha \text{ и } R_{\max} = R_\alpha \text{ если } R_n \geq R_\alpha.$$

Если $R_n \gg R_\alpha$ или $R_\alpha \gg R_n$, из (5.26) имеем

$$\lambda_r \approx \Lambda |\Psi_{n,\alpha}(0)|^2 = 2\Lambda/\pi^2 R_{\max}^3 \quad (5.27)$$

В частности, при $R_{\max} = 3 \text{ \AA}$ скорость реакции для dd-синтеза равна $\lambda_r \approx 10^6 \cdot \text{с}^{-1}$, что в 10^{78} раз превышает скорость реакции dd-синтеза в молекуле D_2 .

Важным является еще одно обстоятельство.

Как следует из (5.26), условие оптимизации ядерного синтеза требует использования малых объемов V_0 квантующих потенциальных ям и большого значения Λ . Вопрос об оптимальном значении V_0 будет рассмотрен дальше. Относительно Λ необходимо отметить следующее.

Константа ядерного синтеза для конкретной пары ядер $\Lambda = S_0 \hbar / \pi \mu e^2$ определяется величиной ядерного параметра S_0 и приведенной массой взаимодействующих частиц μ . Параметр S_0 зависит от типа взаимодействующих ядер и очень резко возрастает с увеличением атомного номера.

Например, для взаимодействия двух протонов (реакция pp-синтеза) $S_0 \approx 3,5 \cdot 10^{-25} \text{ МэВ} \cdot \text{бн}$, что соответствует предельно малой величине $\Lambda_{pp} \approx 10^{-39} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и крайне малой скорости реакции синтеза.

При взаимодействии протона с дейтоном (pd-синтез) $S_0 \approx 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ МэВ} \cdot \text{бн}$, что соответствует $\Lambda_{pd} \approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для dd-взаимодействия $S_0 \approx 0,11 \text{ МэВ} \cdot \text{бн}$ и $\Lambda_{dd} \approx 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для взаимодействия ядер углерода ($C^{12}-C^{12}$ -синтез) ядерный параметр $S_0 \approx 8,8 \cdot 10^{16}$ МэВ·бн (Ichimaru, 1999), что приводит к $\Lambda_{C^{12}C^{12}} \approx 20 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для взаимодействия ядер $C^{12}-O^{16}$ $S_0 \approx 1,15 \cdot 10^{21}$ МэВ·бн (Ichimaru, 1999), что соответствует $\Lambda_{C^{12}O^{16}} \approx 2,3 \cdot 10^5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Наконец, для взаимодействия ядер кислорода ($O^{16}-O^{16}$ -синтез) ядерный параметр еще возрастает ($S_0 \approx 2,3 \cdot 10^{28}$ МэВ·бн (Ichimaru, 1999)), что приводит к крайне большой константе ядерного синтеза $\Lambda_{O^{16}O^{16}} \approx 3,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Такое большое значение $\Lambda_{O^{16}O^{16}}$ приводит к очень большой скорости трансмутации.

Есть все основания считать, что столь быстрое возрастание S_0 и Λ с увеличением атомного номера будет продолжаться для всех тех ядер, синтез с участием которых является энергетически выгодным.

Отмеченное обстоятельство приводит к новому и неожиданному заключению о существенном возрастании вероятности безбарьерного синтеза с увеличением атомного номера участвующих в реакции ядер!

Качественно такой эффект аналогичен запрету на кулоновское рассеяние движущихся в проводнике электронов на ионах внутри заполненной ферми-сферы. Однако в случае ферми-сферы запрет на рассеяние связан с отсутствием свободных (незаселенных) состояний на уровнях энергии, а в рассматриваемом случае такой запрет связан с отсутствием в определенные моменты времени необходимых спектральных компонент рассеивающего потенциала (тех компонент, которые соответствуют частотам всех возможных переходов между уровнями энергии в яме). Очевидно, что этот эффект непосредственно связан как с учетом нестационарности процесса рассеяния (наличием момента времени, когда началось взаимодействие), так и с тем, что на процесс рассеяния непосредственно влияет структура потенциальной ямы.

Это непосредственно следует из полученных результатов при выполнении предельных переходов.

Очевидно, что если неограниченно увеличить время после начала процесса рассеяния (при этом $t \rightarrow \infty$), то быстроосциллирующая функция $\sin^2[\omega_0 t(n_0 - n)/2]$ в выражении (5.24) станет равной 1/2, а само выражение (5.24) примет свою, всегда отличную от нуля, асимптотическую форму

$$F(E, t \rightarrow \infty) = \frac{1}{2\hbar^2[\omega_0(n_0 - n)/2]^2} \neq 0 \quad (5.28)$$

При этом, естественно, и вероятность рассеяния

$$W_{p_0 p}(t) \equiv |V_{p_0 p}|^2 F((E_{p_0} - E_p), t)$$

т. е. в конечном итоге действие кулоновского отталкивания будет отличной от нуля для переходов на любые уровни.

Аналогично, если размер квантующей системы (потенциальной ямы) станет неограниченно большим (при этом $R \rightarrow \infty$, $\omega_0 = \sqrt{2U_0 / MR^2} \rightarrow 0$),

то оптимальные моменты подавления рассеяния $\tau_k = 2\pi k / \omega_0 \rightarrow \infty$ также станут недостижимыми.

Кроме того, при таком неограниченном возрастании размера квантующей системы из-за исчезновения дискретности уровней

$$E_{n+1} - E_n = \hbar\omega_0 \rightarrow 0$$

необходимо переходить к континуальному приближению, рассмотренному выше.

Очевидно, что и в этом случае оказывается невозможным полное подавление рассеяния сразу на все уровни.

Полученные особенности кратковременного подавления влияния кулоновского барьера предъявляют определенные требования к свойствам системы (в первую очередь, к ее температуре).

Частица попадает в яму и может покинуть ее в результате термостимулированной диффузии. Время нахождения частицы в яме

$$t = (2\pi / \omega_0) \exp(\phi_i / kT)$$

определяется температурой T и энергетическим интервалом до вершины ямы ϕ_i (энергией активации). При высокой температуре T значение t очень мало ($t < \tau_k$) и частица покидает яму раньше, чем может произойти подавление действия кулоновского барьера. При более низкой температуре частица может находиться в яме дольше, чем необходимо для удовлетворения условия $t > \tau_k$, что приводит к возможности подавления кулоновского барьера реакции в момент времени $t = \tau_k$.

Таким образом, существует ограничение на температуру среды $T < T_{cr}$, где

$$k_B T_{cr} = \phi_i \ln(\omega_0 \tau_k / 2\pi) = \phi_i \ln(k) \quad (5.29)$$

С учетом того, что $\ln(k)$ всегда удовлетворяет условию $1 < \ln(k) < 10$, требование к температуре среды выполняется, если она ниже энергии активации потенциальной ямы.

Отметим еще одно обстоятельство.

Для того чтобы обе частицы могли достаточно длительное время находиться в одной общей потенциальной яме (а при выполнении рассмотренного выше механизма не «замечать» друг друга и двигаться

так, будто другой частицы не существует), необходимо, чтобы средняя энергия взаимодействия двух ядер с учетом влияния окружения была равна нулю; на языке формализма квантовой механики должны быть равны нулю диагональные матричные элементы энергии взаимодействия частицы n и частицы α :

$$\begin{aligned} V_{n\alpha, n\alpha} &= \iint \Psi_n^*(\mathbf{r}_A) \Psi_\alpha^*(\mathbf{r}_B) V(|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|) \Psi_n(\mathbf{r}_A) \Psi_\alpha(\mathbf{r}_B) d^3r_A d^3r_B = \\ &= \iint |\Psi_n^*(\mathbf{r}_A)|^2 |\Psi_\alpha^*(\mathbf{r}_B)|^2 V(|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|) d^3r_A d^3r_B \approx 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

В приближении «квазиклассики» это условие принимает вид

$$\begin{aligned} V_{n\alpha, n\alpha} &= \left(32/\pi^2 R_n^3 R_\alpha\right) \left\{ \int_0^{R_\alpha} \left(1 - r_A^2 / R_n^2\right)^{-1/2} dr_A \left\{ \int_0^{R_\alpha - r_A} \left[\sqrt{1 - [(r_A - r)/R_\alpha]^2} - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sqrt{1 - [(r_A + r)/R_\alpha]^2} \right] V(r) r_A r dr + \int_{R_\alpha - r_A}^{R_\alpha + r_A} \sqrt{1 - [(r_A - r)/R_\alpha]^2} V(r) r dr \right\} + \\ &\quad \left. + \int_{R_\alpha}^{R_n} \left(1 - r_A^2 / R_n^2\right)^{-1/2} dr_A \int_{r_A - R_\alpha}^{r_A + R_\alpha} \sqrt{1 - [(r_A - r)/R_\alpha]^2} V(r) r_A r dr \right\} \approx 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

в случае $R_n \geq R_\alpha$ (если $E_n \geq E_\alpha$) и

$$\begin{aligned} V_{n\alpha, n\alpha} &= \left(32/\pi^2 R_\alpha^3 R_n\right) \left\{ \int_0^{R_n} \left(1 - r^2 / R_\alpha^2\right)^{-1/2} dr \left\{ \int_0^{R_n - r} \left[\sqrt{1 - [(r - r_A)/R_n]^2} - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sqrt{1 - [(r + r_A)/R_n]^2} \right] V(r_A) r r_A dr_A + \int_{R_n - r}^{R_n + r} \sqrt{1 - [(r - r_A)/R_n]^2} V(r_A) r_A dr_A \right\} + \\ &\quad \left. + \int_{R_n}^{R_\alpha} \left(1 - r^2 / R_\alpha^2\right)^{-1/2} dr \int_{r - R_n}^{r + R_n} \sqrt{1 - [(r - r_A)/R_n]^2} V(r_A) r r_A dr_A \right\} \approx 0 \end{aligned} \quad (5.32)$$

для другого случая $R_n \leq R_\alpha$ (если $E_n \geq E_\alpha$).

Для анализа возможности выполнения условий (5.31) и (5.32) необходимо знание явного вида энергии взаимодействия частиц.

В случае протонов или дейтронов явный вид этой энергии хорошо известен (Давыдов, 1963) и для случая системы из двух протонов и электронов

$$V(r) = (e^2/a\rho)(1 + 5\rho/8 - 3\rho^2/4 - \rho^2/6)\exp(-2\rho), \quad \rho = r/a$$

График этой функции представлен на рис. 5.2

Видно, что энергия взаимодействия двух протонов при наличии двух электронов является знакопеременной функцией координаты.

Энергия взаимодействия двух более тяжелых ядер $V(r)$ в среде с наличием электронов также является знакопеременной функцией расстояния между ядрами (см. рис. 5.3).

Для больших расстояний $r \geq a \equiv \hbar^2/me^2$ эта энергия фактически определяется параметрами ионной связи и характеристиками сил Ван-дер-Ваальса системы $Mn^+ - e - d$, причем $V(r) < 0$.

В области промежуточных расстояний $a/Z < r < a$ эта энергия может быть охарактеризована приближением Томаса–Ферми

$$V(r) = \{Ze^2/r\} \chi(rZ^{1/3}/0,885a)$$

причем в этом интервале расстояний возможны значения $V(r) < 0$ и $V(r) > 0$.

В области малых расстояний $r < a/Z$ ядерное взаимодействие соответствует кулоновскому отталкиванию ядер и $V(r) = Ze^2/r > 0$.

На рис. 5.3 представлена пространственная структура энергии взаимодействия ядер Mn и d (при наличии компенсирующих электронов).

На первый взгляд кажется, что поскольку кулоновское взаимодействие намного более сильное, чем остальные, то обеспечение

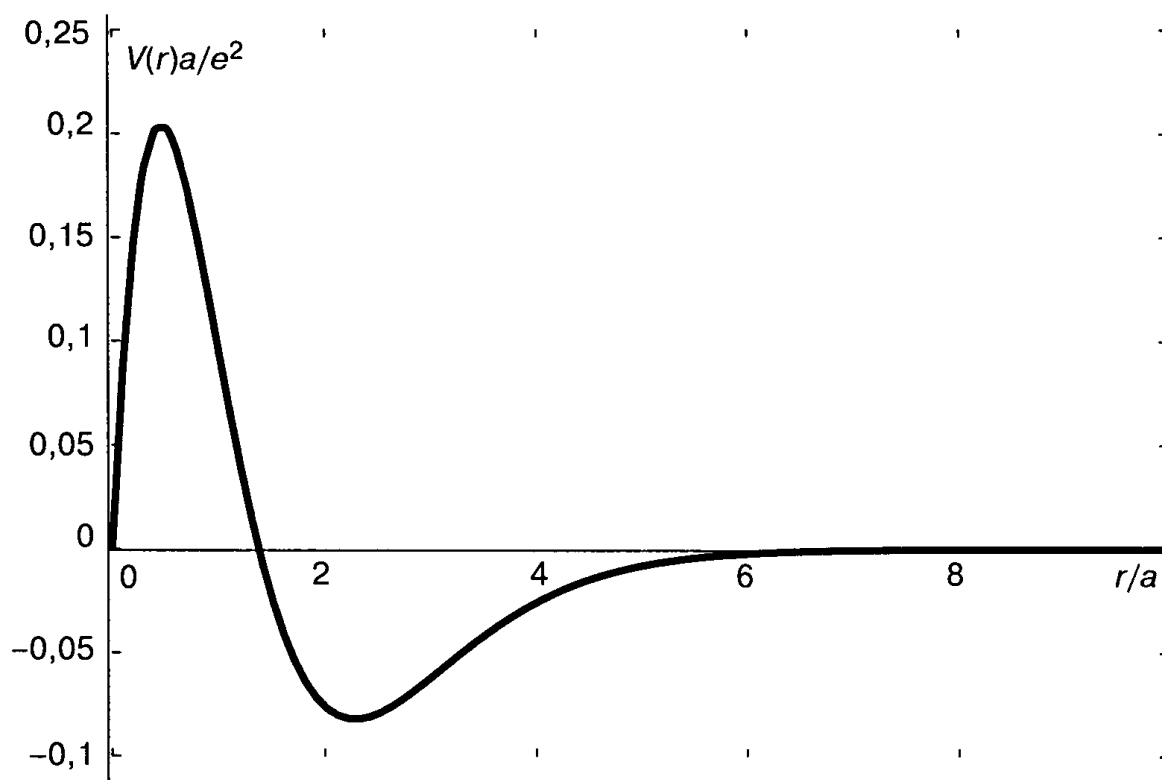


Рис. 5.2. Энергия взаимодействия между двумя дейтонами в системе $d - e - e - d$

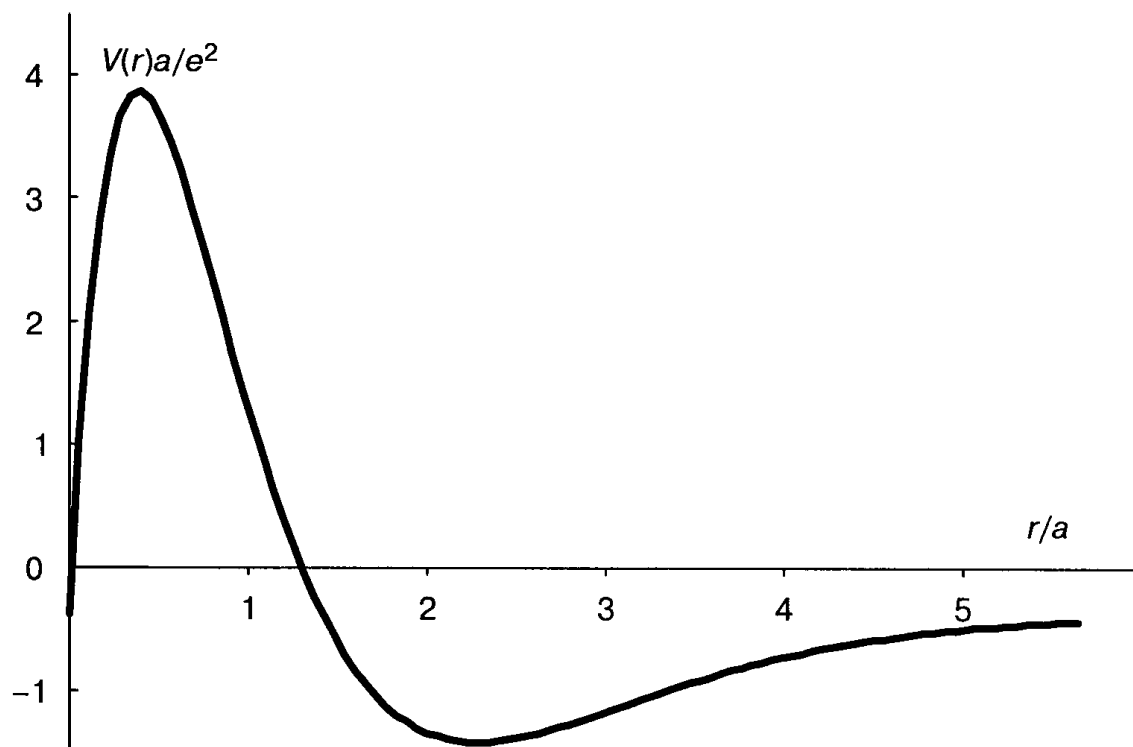


Рис. 5.3. Структура выражения для энергии взаимодействия ядер Mn и d при наличии электронов

условия $V_{n\alpha, n\alpha} \approx 0$ может быть достигнуто только в яме очень большого размера с $R_\alpha, R_n \rightarrow \infty$.

Очевидно, что такое решение не обеспечивает оптимизации скорости и вероятности синтеза (5.26), (5.27), поскольку при этом

$$\lambda_r \approx \Lambda |\Psi_{n,\alpha}(0)|^2 = 2\Lambda/\pi^2 R_{\max}^3 \rightarrow 0$$

Более детальный анализ показывает, что обеспечение условия $V_{n\alpha, n\alpha} \approx 0$ возможно и для ямы с микроскопическим размером. Это обусловлено тем, что в выражения для $V_{n\alpha, n\alpha}$ потенциальная энергия всегда входит в комбинации с квадратом координаты (это следствие интегрирования в сферической системе координат), в результате чего вклад в интеграл областей, где $V(r) > 0$ и $V(r) < 0$, вполне сопоставимы (см. рис. 5.2 и 5.3).

В итоге почти всегда может быть найден такой оптимальный размер ямы, при котором эти вклады компенсируются, что и обеспечивает необходимый результат $V_{n\alpha, n\alpha} \approx 0$.

5.3.3. Возможный сценарий протекания безбарьерного ядерного синтеза в растущих биологических системах

Совокупность полученных условий реализации эффекта кратковременного устранения действия кулоновского барьера на

движения взаимодействующих ядер и эффективность ядерных реакций может быть обеспечена в объеме оптимальных структурных элементов окружающей матрицы (например, в сферических микрополостях диаметром $2R_0 \approx 10 \div 12 \text{ \AA}$, микрощелях шириной $4 \div 5 \text{ \AA}$ и в других микронеоднородностях, создающих двухмерные или трехмерные потенциальные ямы (Vysotskii, Kuzmin, 1990)).

При выполнении заданных требований к параметрам потенциальных ям каталитической матрицы становится возможным протекание «безбарьерного» низкотемпературного (не ускорительного и не туннельного!) ядерного синтеза. Необходимо отметить, что эти требования достаточно критичны.

Например, размер (радиус) потенциальных ям R_0 и крутизна потенциального рельефа U_{\max}/R_0^2 должны быть строго определенными.

Согласно нашим оценкам для d—e—d системы (рис. 5.2) оптимальной является яма с $R_0 \approx 2 \text{ \AA}$. Для системы Mn—d (рис. 5.3) оптимальный размер ямы около $R_0 \approx 4,5 \text{ \AA}$. Видно, что оптимальный размер этих ям сопоставим с межатомным расстоянием. Из-за этого такие ямы не будут замкнутыми в общепринятом смысле (их «стенки» не будут состоять из атомов). Скорее всего, такие ямы будут образовываться в центральной области аксиально симметричных ям большого размера.

Вместе с этим точное значение этих параметров крайне сложно вычислить из-за множества факторов, вытекающих из-за наличия искажений кристаллической решетки. Крайне мала вероятность того, что структура и размер микронеоднородностей будут случайно соответствовать точно необходимым требованиям (квадратичный профиль и оптимальная крутизна потенциальной энергии, оптимальный размер).

Это, по-видимому, является той причиной, которая ведет к малой эффективности и низкой повторяемости экспериментов по ХЯС в жестко фиксированных твердых телах. Для оптимизации процесса ХЯС необходим механизм «автоподстройки» существующих параметров микронеоднородностей под оптимальные.

Предпосылки ХЯС имеют место в растущей микробиологической культуре. В области роста происходит быстрое структурное преобразование развивающейся культуры. Непрерывно возникают структурные микронеоднородности с изменяющимися во времени размерами и потенциальным профилем. Происходит адаптивное изменение диаметра и формы каналов в мембранах. Изменяется взаимное расположение ферментов и белков (например, в процессе репликации ДНК и при синтезе белков в зоне действия ДНК-полимеразы и других фермен-

тов), что естественно изменяет характер потенциальной энергии в этой области. Происходит множество других динамических процессов, каждый из которых ведет к формированию и трансформации потенциальных ям. Эти процессы протекают одновременно в разных местах и в очень большом числе объектов. Каждый из этих объектов потенциально может в какой-то момент времени стать своеобразным катализатором ядерного синтеза и трансмутации (т. е. фактически стать микрореактором одноразового действия).

В процессе развития культуры характерные размеры и форма этих потенциальных ям неизбежно (в течение некоторого интервала времени) оказываются близкими к характерным оптимальным значениям, что создает предпосылки для синтеза и трансмутации элементов

Такой процесс непрерывного «структурирования» с неизбежным «проходом» характерных размеров микронеоднородностей R через оптимальные значения R_0 в разные моменты времени неизбежно охватывает все без исключения области растущей микробиологической культуры. Это обстоятельство принципиально отличает развивающуюся микрокультуру от почти статичных кристаллов палладия и титана, в которых размеры, форма и количество микронеоднородностей практически фиксированы и отсутствует механизм «самонастройки» на оптимальные условия.

Если в составе питательной среды, в которой развивается микробиологическая культура, имеются необходимые для трансмутации исходные изотопные компоненты, то при их попадании в объем микрополостей с оптимальной структурой происходит реакция синтеза и возникает изотоп, который изначально отсутствовал в питательной среде, но является необходимым для дальнейшего роста культуры. Этот изотоп сразу усваивается растущей культурой и встраивается в ее структуру. Такой процесс непрерывно повторяется по всей области культурального роста. Если же случайно образующийся изотоп не является необходимым для роста культуры, то он, по-видимому, может так же флуктуационно разделиться на исходные компоненты.

ХИМИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЦЕССА ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В предыдущей главе были рассмотрены некоторые чисто физические механизмы взаимодействия ядер, ионов и молекулярных систем, которые учитывают специфику квантовомеханического движения этих частиц и систем и могут непротиворечивым образом обосновать возможность протекания низкотемпературных ядерных реакций в оптимизированных силовых полях. По сути, была сделана попытка ответить на фундаментальный вопрос ядерной физики «Как может быть ускорена и оптимизирована реакции низкоэнергетической трансмутации изотопов?» Ответ основан на законах квантовой механики и в равной степени может быть отнесен к любым объектам живой и неживой природы.

При анализе проблемы трансмутации изотопов в растущих биологических культурах (особенно в случае трансмутации с образованием изотопов таких химических элементов, которые растущей культуре в обычных условиях не нужны) возникает много дополнительных специфических вопросов.

Главные из них: «Для чего это нужно растущей культуре? Где и как она это делает? Можно ли управлять этим процессом?»

Полные и окончательные ответы на эти вопросы — дело будущего. Мы осознаем всю сложность этой проблемы. Изложенное ниже можно трактовать только как некоторый схематический путь ее решения, основанный на нашем понимании проблемы.

Оставаясь на позиции неизменной объективности, логически обоснованной закономерности и принципиальной познаваемости процесса низкоэнергетической трансмутации изотопов в биологических системах, мы должны сразу отметить, что причину большой эффективности этого процесса нужно искать, исходя из известных законов физики, химии и биологии. Мы не видим оснований выходить за рамки существующей системы знаний, но пытаемся провести более независимый анализ этих знаний.

6.1. ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОБЛЕМА УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА В РАСТУЩЕЙ КУЛЬТУРЕ

Сначала рассмотрим общие закономерности процесса метаболизма живых систем, относящиеся к их элементному составу.

Хорошо известно, что любая живая система представляет собой самостабилизируемый объект, химический состав которого определяется генетическим кодом, заложенным в ДНК, и остается практически неизменным в течение всей жизни. Принимая за основу классификацию по относительной концентрации, химические элементы обычно разделяют на жизненно необходимые макроэлементы и микроэлементы.

К числу жизненно необходимых макроэлементов относятся: О (типичная концентрация в живой культуре около 24%), Н (64%), С (9%), N (0,13%).

В число необходимых для роста биологических культур жизненно необходимых микроэлементов входят Na ($7 \cdot 10^{-3}\%$), К ($4,5 \cdot 10^{-2}\%$), Са ($7,5 \cdot 10^{-2}\%$), Mg ($2 \cdot 10^{-2}\%$), Fe ($8 \cdot 10^{-4}\%$), Р ($1,3 \cdot 10^{-2}\%$), Si ($3,5 \cdot 10^{-2}\%$).

Специфика роста и существования биологических объектов также требует присутствия ряда следовых микроэлементов Cl ($7 \cdot 10^{-3}\%$), Al ($6 \cdot 10^{-3}\%$), В ($6 \cdot 10^{-4}\%$), Ti ($10^{-4}\%$), Zn ($3 \cdot 10^{-5}\%$), Li ($10^{-4}\%$), Cu ($10^{-5}\%$), Sr ($10^{-5}\%$), Ва ($5 \cdot 10^{-6}\%$), F ($3 \cdot 10^{-5}\%$), Br ($6 \cdot 10^{-6}\%$), Rb ($4 \cdot 10^{-6}\%$), Sn ($10^{-6}\%$), Ni ($5 \cdot 10^{-6}\%$), Мо ($10^{-6}\%$), Со ($10^{-6}\%$).

Для некоторых микробиологических культур необходимыми являются также микроэлементы S, Mn, I, Hg и другие.

Приведенные величины являются средними и для отдельных культур могут отличаться на несколько порядков.

Насколько сбалансированным и взаимно стабилизированным должно быть соотношение химических элементов в организме? Что будет, если один из элементов отсутствует?

Это не праздные вопросы. Сам феномен низкоэнергетической трансмутации химических элементов и изотопов в биологических системах и создание условий для его осуществления основывается на том эвристическом предположении, что если какой-то из необходимых элементов или микроэлементов отсутствует в среде обитания (или питательной среде), то при наличии соответствующих предпосылок он может быть синтезирован в процессе трансмутации. Фактически такой подход однозначно предполагает, что соотношение всех необходимых элементов в каждом из видов живых организмов является (или стремится быть) фиксированным и максимально близким к оп-

тимальному, а процесс метаболизма способствует стабилизации этого соотношения!

Последовательное изучение этого стержневого вопроса было начато в основополагающих работах Вернадского (Вернадский, 1987).

Не останавливаясь подробно на общей проблеме постоянства баланса всех макро- и микроэлементов во всех объектах живой природы (это более детально рассмотрено в следующей главе), рассмотрим эту проблему на примере наиболее простых объектов — микроорганизмов.

Достаточно убедительное подтверждение постоянства баланса элементов было получено в работе (Сыроешкин, 2002), посвященной исследованию взаимозависимого метаболизма металлов в микробиологических культурах и высших растениях.

На рис. 6.1 представлено определенное в этой работе относительное содержание различных металлов в высушенных клетках микробиологических культур *Bacillus subtilis*, *Mycobacterium tuberculosis* и *Rhodococcus rhodochrous* и в высшем растении семейства лилейных *Allium aflatuense*, а также отклонения от средних значений для серии одновременно проведенных параллельных экспериментов.

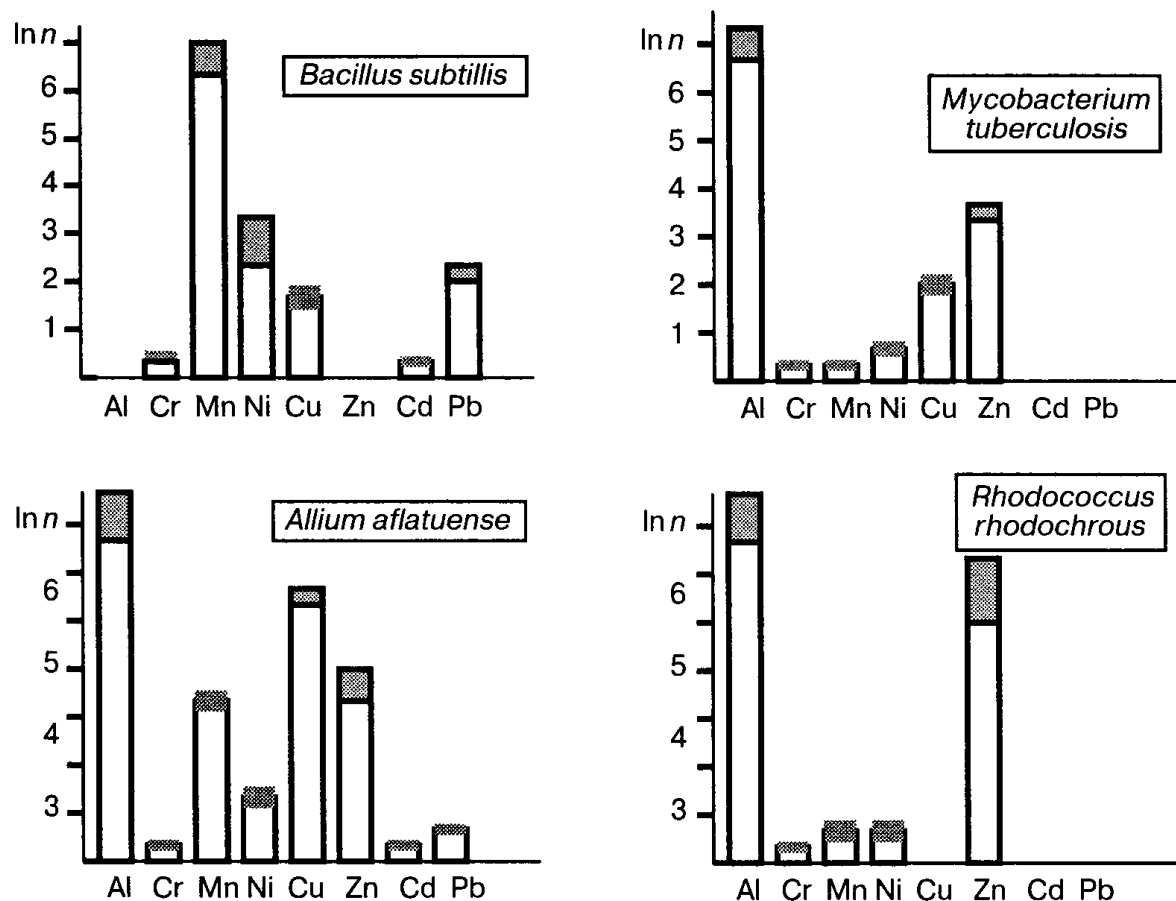


Рис. 6.1. Масс-спектр (элементный состав) и его дисперсия в высушенных клетках микробиологических культур *Bacillus subtilis*, *Mycobacterium tuberculosis* и *Rhodococcus rhodochrous* и высшего растения *Allium aflatuense*

Из полученных данных видно, что соотношение разных микро-элементов-металлов постоянно для данного биологического объекта, но очень существенно отличается для разных объектов. В работе (Сыроешкин, 2002) было также обнаружено, что преднамеренное и очень значительное увеличение концентрации одного из металлов в составе питательной среды не приводило к изменению соотношения разных металлов. Например, увеличение концентрации марганца в 10 раз (от 1 мкг/мл до 10 мкг/мл) не изменяло элементный спектр выращенных биологических объектов. Достаточно необычным также является регистрируемый масс-спектрометрический набор микроэлементов (в частности, относительно большое количество алюминия или свинца в культурах), что демонстрирует индивидуальную потребность данного вида в конкретных химических элементах, традиционно не относимых к жизненно необходимым.

Более того, соотношение разных микроэлементов в одной и той же культуре кардинально изменяется при переходе ее от одной стадии жизненного цикла к другой (переход между различными физиологическими состояниями).

На рис. 6.2 представлен масс-спектр спор той же культуры *Bacillus subtilis*, который образуется при клеточном делении при полном усвоении (переработке) глицерина из питательной среды. Для стимуляции такого спорообразования увеличивалось время нахождения клеток культуры *Bacillus subtilis* от 15 ч (что соответствовало данным, приведенным на рис. 6.1) до 14 сут, в течение которых происходило полное усвоение глицерина.

Из сопоставления рис. 6.1 и 6.2 видно, что изменение физиологического состояния культуры *Bacillus subtilis* существенно изменило ее

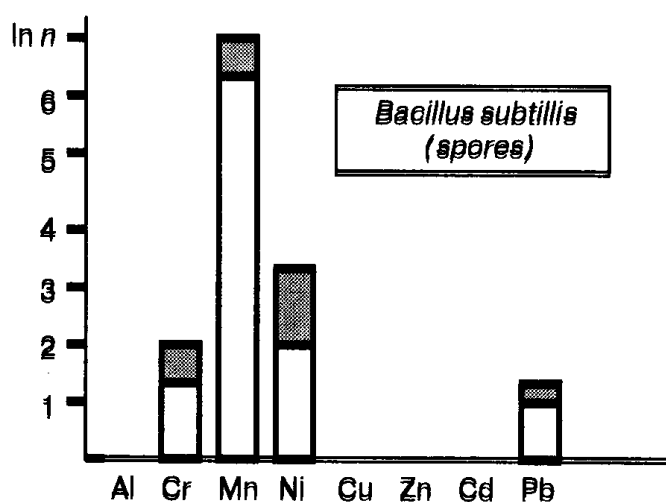


Рис. 6.2. Масс-спектр высушенных спор микробиологической культуры *Bacillus subtilis*

состав по микроэлементам (происходит, в частности, почти полная потеря культурой меди).

По мнению авторов работы (Сыроешкин, 2002), это связано с изменением состава мембранных ферментов (Басоло, 1971; Хьюз, 1983) и транспортных межфазных мембранных систем клетки, что имеет место при изменении физиологического состояния культуры.

Эти результаты демонстрируют нетривиальный характер взаимосвязей разных микроэлементов. Изменяя состав питательной среды, можно управлять скоростью ее роста. Отсутствие в питательной среде хотя бы одного из микроэлементов тормозит развитие всего биологического объекта.

По-видимому, именно этот механизм постоянства элементного состава микроорганизмов и является ключом к ответу на поставленный выше вопрос: «Для чего процесс синтеза и трансмутации нужен растущей культуре?»

В свете таких представлений становится более очевидным возможный механизм стимуляции роста культур, а также, возможно, стимуляции процесса синтеза и трансмутации. В частности, обнаруженный нами и рассмотренный в гл. 4 эффект стимуляции синтеза изотопа Fe^{54} при дополнительном введении в питательную среду цезия может иметь простое объяснение.

И железо и цезий (или один из биохимических аналогов цезия) входят в число необходимых микроэлементов, причем их оптимальные концентрации связаны достаточно критичными условиями. Отсутствие обоих компонентов (или их низкая концентрация) ограничивают рост культуры.

Допустим, что в растущей культуре созданы все условия для синтеза ядер конкретного изотопа железа на основе эффекта трансмутации ядер фосфора и натрия. Синтез одного только железа (в отсутствие цезия) не приводит к вовлечению синтезируемых ядер в процесс метаболизма. Рассмотренный выше процесс синтеза ядер на основе эффекта динамического подавления действия кулоновского барьера в оптимальной потенциальной яме является принципиально обратимым в течение того малого интервала времени, пока не произошли необратимые релаксационные процессы. Это обстоятельство оставляет открытым путь к обратному распаду синтезированного ядра железа на исходные компоненты (фосфор и натрий).

Добавка цезия приводит к тому, что синтезируемое железо Fe^{54} сразу вовлекается в процесс метаболизма и участвует в быстром образовании новых электронных межатомных связей в потенциальной яме, где

проходил синтез, что, соответственно, изменяет структуру этой ямы. Поскольку характерное «электронное время» перестройки структуры потенциальной ямы и установления таких связей, т. е. $\tau \approx \hbar^3/m_e e^4 \approx 10^{-17}$ с, на несколько порядков меньше «ионного времени» (равного по порядку величины периоду дебаевских колебаний тяжелых ионов в конденсированной среде, $T \approx 10^{-13}$ с), то обратный распад становится невозможным. В итоге синтезируемое железо встраивается посредством электронных связей в растущую культуру и тем самым фиксируется в ней.

6.2. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С МЕТАЛЛАМИ

Метаболизм и все процессы биохимии в живых организмах так или иначе связаны с взаимодействием ионов. Очевидно, что сам процесс трансмутации также должен основываться на таком взаимодействии. В данном разделе рассмотрены особенности взаимодействия микробиологических культур с ионами различных металлов. Для металлов процесс образования ионов является наиболее естественным. Далее под понятием «металлы» мы будем подразумевать окисленные формы металлов в виде катионов, анионов, комплексных соединений, оксидов и гидроксидов. Материал данного раздела в значительной степени основывается на обзоре Таширева (Таширев, 1995).

Вначале проведем общую классификацию процессов взаимодействия, имея в виду выявить и конкретизировать процессы, которые потенциально способны способствовать ядерной трансмутации изотопов.

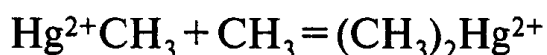
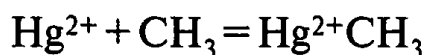
В работах (Iske, 1989; Silver, 1984) показано, что взаимодействие ионов металла с микроорганизмами может проявляться в следующих процессах:

- 1) мобилизация (перевод нерастворимых форм металлов в растворимые);
- 2) иммобилизация (образование нерастворимых осадков из растворимых соединений металлов);
- 3) аккумуляция (сорбция металлов на поверхности клетки или накопление металла внутри клетки);
- 4) образование летучих соединений металлов.

В основе каждого из четырех указанных процессов могут лежать совершенно различные механизмы.

В частности, при взаимодействии микроорганизмов с Hg^{2+} летучие соединения могут образовываться в виде паров металли-

ческой ртути Hg^0 (Tezuka, 1976) или метилированных производных Hg^{2+} — монометилртути и диметилртути (Pan-Hou Hidemitsu, 1982). Как металлическая ртуть, так и ее метилпроизводные улетучиваются из водных растворов, но в первом случае происходит восстановление металла $\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg}^0$, а во втором — присоединение метильных радикалов к катиону Hg^{2+} без изменения степени его окисления



Иммобилизация металла может осуществляться микроорганизмами путем взаимодействия с метаболитами или путем восстановления металла. Так, сульфатвосстанавливающие организмы выделяют сероводород, образующий со многими металлами нерастворимые осадки. При взаимодействии микроорганизмов с хроматами, хорошо растворимыми при pH близких к 7, происходит их восстановление с образованием гидроксида хрома.

В то же время для разных металлов один и тот же процесс может иметь совершенно различный результат.

Например, при восстановлении теллуридов внутри клеток бактерий образуются кристаллы металлического теллура, а восстановление ртути приводит к образованию летучей металлической ртути. Видно, что и в том и другом случае происходит восстановление, однако результат разный: аккумуляция металла в первом случае и образование летучего соединения во втором.

Рассмотрим более подробно три первых процесса взаимодействия микроорганизмов с металлами.

1) **Мобилизация металлов.** Мобилизация нерастворимых соединений окисленных металлов происходит в основном благодаря понижению pH среды и окислению органических соединений микроорганизмами, а также путем выделения микроорганизмами соединений, образующих с металлами органоминеральные комплексы — хелаты. Большинство металлов переходят в растворимую форму при снижении pH среды до pH 3–4. Особенностью хелатов является возможность их существования в очень широком диапазоне значений pH среды. Если катион Ti^{3+} уже при pH 2–2,5 начинает выпадать в осадок (гидроксид титана), то при введении в раствор хелатирующего агента (цитрата) титан устойчив в растворе в виде цитрата титана даже в сильнощелочных растворах (pH 9–10).

Хелатирующими агентами металлов могут служить практически все микробные экзометаболиты — витамины, ферменты, антибиотики,

гуминовые кислоты (Rohde, 1963), гумусоподобные полимеры — меланины (Senesi, 1987) и органические кислоты (Callander, 1983).

Наиболее эффективно мобилизация металлов происходит в анаэробных условиях при брожении углеводов и полисахаридов (природных полимеров). Это связано с сочетанием двух факторов, способствующих быстрому растворению металлов. Во-первых, при окислении субстратов рН среды снижается до 3—4, а во-вторых, главные конечные продукты брожения (органические кислоты) являются сильными хелатирующими агентами. В целом хелатирование может повышать растворимость окисленных соединений металлов в природных условиях на 4 порядка (Callander, 1983).

После перевода металла в растворимую форму он становится доступным для клеток и вовлекается в процессы микробного метаболизма. Этот процесс, как отмечено выше, может привести к иммобилизации, аккумуляции или образованию летучих соединений металла.

Отметим одно очень важное обстоятельство. В литературе отсутствуют данные о существовании таких металлов, окисленные формы которых не переходят в растворимую форму при взаимодействии с микроорганизмами! Очевидно, что хотя мобилизация сама не приводит к ядерным превращениям, но она стимулирует микробный метаболизм и может выступать косвенным катализатором трансмутации элементов и изотопов.

2) **Иммобилизация металлов.** Осаждение растворенных металлов микроорганизмами наблюдается чаще всего при взаимодействии с биогенным сероводородом, образующимся при диссимиляторной сульфатредукции или разложении органических соединений, содержащих серу в предельно восстановленном состоянии (например, цистеин, метионин). За исключением однозарядных щелочных металлов главной подгруппы первой группы элементов (катионы лития, натрия, калия и т. д.), а также некоторых катионов второй группы (кальций, магний), все остальные металлы образуют в подавляющем большинстве практически нерастворимые сульфиды металлов. Как правило, для осаждения металлов не требуется непосредственного контакта с клетками сульфидогенов (Илялетдинов, 1982), но часто этот процесс сочетается с транспортом катионов металлов в цитоплазму клетки и последующим образованием сульфидов внутри клетки (Jones, 1976). Так, некоторые представители (культуры *Desulfovibrio* и *Desulfotomaculum*) активно накапливают в клетках железо в виде сульфида.

Металлы также могут иммобилизоваться при взаимодействии с белками с образованием прочных нерастворимых комплексов (Weege, 1989).

Такое взаимодействие наиболее характерно для меди. Углекислый газ CO_2 , образующийся практически всеми гетеротрофными микроорганизмами, приводит к образованию нерастворимых соединений кадмия и свинца (CdCO_3 , PbCO_3) (Babich, 1979). Свинец и другие металлы могут образовывать нерастворимые соединения с янтарной кислотой (Aickin, 1979). Кроме того, возможна иммобилизация металлов при взаимодействии с пероксидами (Wood, 1983).

3) Аккумуляция металлов. Микроорганизмы аккумулируют металлы путем отложения на поверхности клетки или внутри нее. В результате такой аккумуляции концентрация металлов в биомассе микроорганизмов может быть на несколько порядков выше, чем в окружающей среде. Например, коэффициенты извлечения металлов микроорганизмами из морской воды определяется величинами: кадмий — 910, кобальт — 4600, медь — 7000, железо — 87000, свинец — 41000, марганец — 94000, титан — 20000 и цинк — 65000 (Bowen, 1966). Коэффициент извлечения никеля с помощью некоторых видов анаэробных микроорганизмов равен 3000 (Lundie, 1988).

Аккумуляция металлов микроорганизмами имеет место не только при малых концентрациях металлов в водных растворах, но и при очень высоких. Так, культура *Thiobacillus ferrooxidans* ATCC 19859 способна расти и аккумулировать металлы при чрезвычайно высокой концентрации катионов меди и цинка — 30 и 40 г/л соответственно (Brahmaprakash, 1988).

Концентрация металла, связанного клетками микроорганизмов, чаще всего находится в пределах нескольких десятков миллиграммов на 1 г сухой массы клеток, но иногда эта величина может составлять сотни миллиграммов на 1 г. Клетки *Escherichia coli* аккумулируют цинк в концентрации 16 мг на 1 г сухого вещества клеток, а клетки *Pseudomonas serasia* могут поглощать кадмий и свинец в концентрации 77 и 53 мг/г соответственно (Drapeau, 1983). Устойчивые к действию металлов микроорганизмы проявляют повышенную способность к их аккумуляции: *Alcaligenes eutrophus* CH 34 поглощают от 130 до 150 мкг/г кадмия (Diels, 1987), а штаммы *Pseudomonas sp.* — до 200 мг/г серебра (Glombitza, 1988).

Один и тот же штамм микроорганизмов способен эффективно аккумулировать металлы, находящиеся в различных группах Периодической системы элементов. Например, *Rhodotorula glutinis* накапливает в высоких концентрациях такие непохожие металлы, как марганец, железо, медь, цинк, кадмий, свинец, бериллий и хром (Drapeau, 1983). В то же время и один и тот же металл может аккумулироваться представителями разных таксонов микроорганизмов. Например, кадмий поглощается

зелеными микроводорослями (Sakaguchi, 1979), грибами (Gadd, 1983) и псевдомонадами (Kurek, 1989).

Такая выраженная неспецифичность аккумуляции металлов микроорганизмами указывает на преобладание физико-химических механизмов взаимодействия микроорганизмов с металлами.

Аккумуляция металлов в большинстве случаев происходит путем отложения на поверхности клеток. Металлы могут связываться капсульными полисахаридами (Scott, 1988), причем в капсуле могут аккумулялироваться одновременно несколько металлов. Например, клетки *Bacillus megaterium* ATCC 19213, образующие большую капсулу, аккумулялируют катионы меди, ртути, серебра, железа, цинка и марганца (Cassidy, 1984).

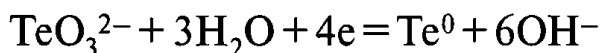
Аккумуляция металлов на поверхности клеток может происходить в результате образования комплекса металлов с белками клеточной мембраны. Например, *Mycoplasma capricolum* накапливает железо, которое локализуется в клеточной мембране в виде комплекса с белком (Bauminger, 1980).

Многие металлы образуют на поверхности клеток нерастворимые соединения, такие как $PbHPO_4$ (Aickin, 1979), $CdHPO_4$ (Macaskie, 1987), Au^0 и $Pd(OH)_2$ (Beveridge, 1978), сульфиды металлов и т. д. Образование нерастворимых соединений на поверхности клеток иногда связано с активностью ферментов. Так, образование фосфата кадмия сопряжено с активностью фосфатазы, индуцируемой глицеро-2-фосфатом и катализирующей его расщепление с образованием HPO_4^{2-} . Этот анион взаимодействует с Cd^{2+} с образованием нерастворимого связанного с клетками $CdHPO_4$ (Macaskie, 1987).

Аккумуляция металлов поверхностью микроорганизмов осуществляется также путем связывания структурами клеточной стенки (Beveridge, 1978, 1982).

Металлы могут не только связываться поверхностными структурами клеток, но и накапливаться внутри клеток. Имеются данные о внутриклеточном накоплении кадмия (Gadd, 1983), кобальта (Белов, 1985), серебра (Glombitza, 1988), цинка (Kasan, 1988), а также ряда других металлов. Очевидно, что накопление металлов внутри клеток связано с функционированием транспортных систем, причем в извлечении металла могут участвовать системы как активного, так и пассивного транспорта (Laddaga, 1985). После проникновения внутрь клетки металлы могут связываться с белками цитоплазмы и внутренними мембранными структурами или образовывать нерастворимые продукты внутри клетки (Laube, 1980).

Образование внутриклеточных нерастворимых соединений металлов может происходить по совершенно различным механизмам. Например, окисленные соединения теллура трансформируются внутри клетки с образованием элементарного теллура по пути восстановления (Горджян, 1970):



Кадмий и железо внутри клеток сульфатредукторов образуют соответствующие сульфиды (Jones, 1989), а марганец может образовывать в цитоплазме клеток нерастворимый кристаллический гидрофосфат MnHPO_4 (Kihn, 1988).

Несмотря на то что в большинстве случаев аккумуляция металлов микроорганизмов имеет четкую пространственную локализацию, иногда металлы распределяются одновременно в различных местах (например, в клеточной стенке, мембранной и цитоплазматической фракциях (Kihn, 1988).

По нашему мнению, процесс аккумуляции может быть непосредственно причастен к явлению трансмутации. Это обстоятельство уже обсуждалось выше и связано с тем, что для протекания ядерного синтеза и трансмутации необходимо выполнение нескольких обязательных условий, одно из которых связано с необходимостью максимально быстрого вовлечения синтезируемого изотопа в процесс метаболизма с сопутствующей этому фиксацией в качестве стабильного ядра (стабильного атома). Очевидно, что биохимические процессы, способствующие процессу аккумуляции, одновременно способствуют процессу низкоэнергетической трансмутации ядер.

6.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ С МЕТАЛЛАМИ

Биологическое значение взаимодействия микроорганизмов с металлами определяется тремя основными характеристиками — концентрацией металла, степенью его токсичности, а также метаболическим потенциалом микроорганизмов.

По отношению к любому элементу биологической системы могут быть определены три уровня его концентрации, радикально отличающиеся по степени влияния на метаболизм и жизнедеятельность этой системы:

- 1) стимулирующее действие (металл необходим для поддержания нормального метаболизма клетки и активно поглощается из окружающей среды при помощи транспортных систем);

- 2) умеренно ингибирующее действие (металл находится в избытке и ингибирует метаболизм, а у клетки включаются защитные механизмы, компенсирующие отрицательное действие металла);
- 3) бактерицидное действие (металл присутствует в летальной дозе и необратимо подавляет развитие клетки).

Характерная иллюстрация этого влияния может быть сделана на примере ионов меди.

Известно, что медь входит в состав голубых медьсодержащих белков метилотрофных бактерий — амицианина и азурина, которые играют роль первичных акцепторов электронов от метиламиндегидрогеназы и передают электроны на цитохромы C_H и C_L (Lawton, 1985; Tobar, 1983).

Стимулирующая концентрация меди для большинства микроорганизмов находится в пределах 0,1–0,2 мМ, и именно в этом узком диапазоне концентраций она необходима клеткам метилотрофов для эффективного функционирования медьсодержащих переносчиков.

При повышении концентрации меди до 0,5–0,8 мМ проявляются ее ингибиторные свойства. Повреждающее действие меди многообразно. Оно проявляется при блокировке метаболических процессов в клетке (Towiner, 1976), что имеет место, например, при ингибировании транспорта электронов в дыхательной цепи (Smith, 1980); в блокировке гликолиза и цикла трикарбоновых кислот (Domek Matthew, 1987); в изменении трансмембранного потенциала цитоплазматической мембраны и последующем пробое мембраны собственным электрическим полем (Лебедев, 1989); в образовании пероксидных радикалов при реагировании меди с тиолсодержащими компонентами клетки (Naiki, 1980). В ответ на повреждающее действие меди клетка может синтезировать капсульные полисахариды и низкомолекулярные белки, связывающие избыток катионов меди; супероксиддисмутазу, разлагающую пероксидные радикалы (Naiki, 1980); снижать скорость поглощения меди из среды путем изменения структуры цитоплазматической мембраны (Gadd, 1984).

Дальнейшее повышение концентрации меди до 1–2 мМ приводит к снижению на 60 % количества жизнеспособных клеток в течение нескольких минут, а затем — к гибели культуры (Jones, 1989).

Таким образом, медь, которая считается одним из токсичных металлов, в зависимости от ее концентрации в среде может оказывать на микроорганизмы стимулирующее, умеренно ингибирующее и бактерицидное действие.

Любой из видов трансформации металлов внутри клетки может иметь место лишь при наличии эффективных транспортных систем.

Наивно ожидать, что в клетке имеются транспортные пути для всех металлов-«ксенобиотиков». Как же ионы различных металлов попадают внутрь клетки?

Большинство из них являются стереохимическими аналогами ионов, необходимых для нормальных процессов жизнедеятельности клетки (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} и др.) и активно участвующих в ионном обмене. Вследствие такой аналогии металлы-«ксенобиотики» активно взаимодействуют и пользуются «чужими» транспортными системами. Так, кислородные анионы VI группы элементов (молибдат, хромат, селенат и вольфрамат) вследствие стереохимического сходства с сульфатом конкурируют с ним за ферменты и транспортную систему (Tezuka, 1976), а ионы Co^{2+} и Cu^{2+} конкурируют за системы транспорта цинка в клетки микроорганизмов (Каспарова, 1989; Macaskie, 1987).

По мере возрастания степени адаптации микроорганизмов к элементам, ранее отсутствовавшим в значительных концентрациях в биосфере, наблюдается все более полное их вовлечение в биологические процессы, вплоть до образования замкнутого круговорота, аналогичного круговороту таких жизненно необходимых элементов, как, например, углерод, сера, азот.

Характерным примером является, в частности селен. В природных условиях микроорганизмы осуществляют все виды трансформации селена (Doran, 1982; Oremland, 1986):

- а) способствуют окислению и восстановлению неорганических соединений;
- б) осуществляют иммобилизацию в микробных клетках и минерализацию органических соединений;
- в) осуществляют метилирование и деметилирование органических и неорганических соединений.

Исходя из этого, трудно считать селен ксенобиотиком или токсичным элементом!

Аналогичная адаптация микроорганизмов имеет место и по отношению ко многим токсичным металлам.

В то же время микроорганизмы, не имеющие специфических защитных систем по отношению к металлам и другим токсичным элементам, способны взаимодействовать с ними с образованием простых форм путем восстановления. Например, гомогенат клеток *Micrococcus lactilyticus* (*Veillonella alcalescens*) восстанавливает окисленные соединения марганца, железа и меди. Это неудивительно, поскольку эти металлы относятся к числу жизненно необходимых для метаболизма микроорганизмов. Удивительным является то, что эти микроорганизмы столь же эффек-

тивно восстанавливают окисленные соединения таких сверхтоксичных элементов, как мышьяк, висмут, селен, теллур, свинец, таллий, ванадий, молибден, вольфрам, осмий, рутений, золото, серебро и уран, причем многие из них восстанавливаются до свободного элемента (Woolfolk, 1966). В «мире микробиологических культур» понятие токсичности полностью утрачивает свой первоначальный и однозначный смысл!

Таким образом металлы, в том числе крайне токсичные, могут вовлекаться в метаболические процессы без «трагических» последствий для микроорганизмов. По своему конечному результату взаимодействие микроорганизмов с металлами проявляется в виде мобилизации (перевод металлов в растворимую форму) или, напротив, в «иммобилизации — аккумуляции» (перевод металлов в нерастворимую форму или их связывание клетками).

Отмеченные особенности метаболизма в полной мере применимы для радионуклидов, которые, так же, как и нерадиоактивные металлы, будут образовывать сульфиды металлов при биогенной сульфатредукции. При этом радионуклиды необходимо рассматривать, прежде всего, как элементы, которые вступают во взаимодействие с микроорганизмами по тем же механизмам, как и нерадиоактивные металлы. Долгоживущий радионуклид биохимически ничем не отличается от стабильного. Специфика его действия проявляется на уровне первичных радиобиологических процессов, проходящих, как правило, через стадию радиолитической воды с образованием множества свободных радикалов. Это, очевидно, приводит к частичной идентичности (в отношении первичных радиобиологических процессов) действия токсинов и радионуклидов. Существенное различие между этими процессами проявляется, очевидно, только на более высоком (системном) уровне организации жизнедеятельности живых систем. Это обстоятельство позволяет использовать микроорганизмы в полной мере в микробных радиационных технологиях.

6.4. БИОХИМИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ ЖИЗНЕННО НЕОБХОДИМЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ. МЕТАБОЛИЗМ МИКРООРГАНИЗМОВ И ПРОБЛЕМА УПРАВЛЯЕМОЙ ТРАНСМУТАЦИИ

Итак, на поставленный выше вопрос: «Для чего процесс синтеза и трансмутации нужен растущей культуре?» — можно дать простой и, по-видимому, окончательный ответ: «Он объективно нужен для восполнения недостающих до эталонного соотношения химических элементов». Однако следующий вопрос: «Где и как микробиологическая

система это делает?» — требует рассмотрения конкретных механизмов взаимодействия.

Еще в 30-е годы XX века Вернадский высказал мнение о том, что живые организмы концентрируют химические элементы (Вернадский, 1987). Возможно, что в основе этого явления лежит, прежде всего, стереохимическая аналогия «макроэлементов» и «минорных» (согласно терминологии Вернадского) элементов, рассеянных в биосфере.

Изложенная выше модель динамического кратковременного «устранения» действия кулоновского барьера на вероятность ядерного синтеза напрямую основывается на квантовых процессах, в которых главенствующую роль играют оптимизированные по размерам квантовые потенциальные ямы, размеры которых строго индивидуальны для каждого типа взаимодействующих частиц. Наша физическая модель представляла собой идеализацию реального физического или биохимического процесса.

В идейном плане авторам очень близка развитая в работах (Таширев, 1994, 1995) концепция взаимодействия микроорганизмов с металлами, которая также основывается на размерных эффектах и включает следующие положения.

1. Каждый металл имеет свой окислительно-восстановительный и (или) стереохимический аналог среди жизненно необходимых и адаптированных к культуре микроэлементов, которые являются распространенными компонентами в метаболизме микроорганизмов (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , NO_3^- и другие). Окислительно-восстановительная аналогия, или редокс-аналогия, подразумевает близость или равенство редокс-потенциалов реакций восстановления металла и макроэлемента; стереохимическая — близость или равенство ионных радиусов металла и макроэлемента.

2. Следствием стереохимической аналогии и редокс-аналогии является неспецифичность взаимодействия микроорганизмов с металлами. Рецепторные, транспортные и окислительно-восстановительные системы микробной клетки «ошибаются» вследствие близости величин ионных радиусов или редокс-потенциалов металла и макроэлемента, и поэтому металл или аккумулируется микробной клеткой, или восстанавливается (часто с образованием нерастворимых в воде соединений). Ряд металлов может как аккумулироваться, так и восстанавливаться микроорганизмами.

3. Вследствие неспецифичности указанных процессов с металлами должны взаимодействовать не адаптированные к ним микроорганизмы.

В работах (Таширев, 1994, 1995) проведено обобщение данных литературы по аккумуляции металлов микроорганизмами, а также сформулированы теоретические закономерности накопления в микробной клетке металлов вследствие их стереохимической аналогии с макроэлементами.

Стереохимическая аналогия подразумевает близость или равенство ионных радиусов металла и макроэлемента. Вследствие стереохимической аналогии микроорганизмы взаимодействуют с металлами. Рецепторные и транспортные системы микробной клетки «ошибаются» вследствие равенства или близости величин ионных радиусов металла и макроэлемента, и поэтому металл неспецифически аккумулируется микробной клеткой (под «неспецифичностью» подразумевается аккумуляция металлов не адаптированными к ним микроорганизмами).

В табл. 6.1 приведены ионные радиусы катионов макроэлементов и других металлов (Лурье, 1979), причем данные для «макроэлементов» Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Fe^{3+} , и Na^+ помещены в две верхние строки. Остальные металлы расположены в соответствии с их принадлежностью к группам Периодической системы элементов. Длина горизонтальной метки при каждом катионе характеризует разброс данных различных авторов, что связано с методом измерения ионного радиуса.

Например, ионный радиус Cu^{2+} по Белову и Бокию равен 0,080 нм, а по другим данным — 0,072 и 0,082 нм; радиус Zn^{2+} по данным Гольдшмидта, Полинга, а также Белова и Бокия равен, 0,083, 0,074 и 0,083 нм соответственно. В итоге ионный радиус Cu^{2+} изображен линией с координатами 0,072—0,082 нм, а Zn^{2+} — линией 0,074—0,083 нм. Значения ионных радиусов этих элементов дают основания отнести оба иона к стереохимическим аналогам Fe^{2+} и, в меньшей степени, Mg^{2+} .

Очевидно также, что в максимальной степени возможность взаимозамены элементов на основе принципа «стереохимической аналогии» присуща тем ионам, которые имеют одинаковый заряд (одинаковую валентность) и одинаковый ионный радиус. В случае разных (хотя и близких) зарядов идентичность ионных радиусов также приводит к определенной стереохимической аналогии, хотя она, очевидно, выражена в меньшей степени.

Анализ распределения ионов разных элементов по их ионным радиусам позволяет произвести одну из возможных классификаций. Среди макроэлементов четко выделяются три группы ионов, имеющих близкие ионные радиусы и образующие три «зоны» стереохимической аналогии.

В первую группу входят Fe^{3+} , Mg^{2+} и Fe^{2+} ; они образуют **первую зону** стереохимической аналогии с ионными размерами 0,06–0,083 нм. Вторую группу образуют Na^+ и Ca^{2+} (**вторая зона**): 0,095–0,106 нм. Третья группа представлена K^+ и NH_4^+ (**третья зона**) 0,133–0,159 нм.

Из табл. 6.1 видно, что практически все металлы (за исключением Be^{2+}) являются стереохимическими аналогами макроэлементов.

Наибольшее количество катионов находится в первой зоне стереохимической аналогии (Fe^{3+} , Mg^{2+} и Fe^{2+}). Так, полностью совпадают размеры этих макроэлементов и 47 катионов металлов. Очень близки к этой зоне еще 17 катионов металлов. Таким образом, макроэлементы первой зоны стереохимической аналогии близки по размерам к 64 катионам металлов, относящихся к семи группам Периодической системы элементов.

Во вторую зону (Na^+ и Ca^{2+}) входят непосредственно 11 катионов и близки к ней еще 9 катионов. В третью зону (K^+ и NH_4^+) входят 5 и близки к ней 7 катионов металлов.

Некоторые катионы занимают промежуточное положение между указанными зонами. Например, Sr^{2+} находится между второй и третьей зонами, а Cs^+ — правее от третьей зоны. Однако известно, что Ca^{2+} и Sr^{2+} (Borst-Pauwels, 1986; Wilkens, 1989), а также K^+ и Cs^+ (Bossemeyer, 1989) имеют соответствующие общие транспортные системы. Следовательно, стереохимическая аналогия проявляется даже при достаточно большом различии в размерах ионов.

Вместе с этим очевидно, что максимальная конкуренция за транспортные системы микроорганизмов наблюдается между ионами, имеющими разные или близкие ионные радиусы (Norris, 1977).

Простой анализ показывает, что практически все металлы имеют стереохимические аналоги. Это обстоятельство открывает реальный путь к широкомасштабной трансмутации самых разных изотопов и элементов.

При прогнозировании неспецифической аккумуляции металлов микроорганизмами необходимо учитывать физико-химические условия существования окисленных форм металлов в реальных водных растворах. Подавляющее большинство металлов (см. табл. 6.1) устойчивы в виде катионов только в кислой среде, а при нейтральных pH переходят в другие формы.

Например, Ti^{3+} при pH, близких к нейтральным, образует нерастворимый гидроксид $\text{Ti}(\text{OH})_3$, а Cr^{6+} переходит в форму CrO_4^{2-} , Cu^{2+} при $\text{pH} > 3$ переходит в $\text{Cu}(\text{OH})_2$ и т. д. Однако стереохимическая аналогия катионов, представленных в табл. 6.1, должна иметь место

Таблица 6.1. Стереохимическая аналогия металлов

		Ионные радиусы катионов, нм											
		0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16			
Макро- элементы						<u>Mg²⁺</u>		<u>Ca²⁺</u>		<u>K⁺</u>	<u>NH₄⁺</u>		
					<u>Fe³⁺</u>	<u>Fe²⁺</u>	<u>Na⁺</u>						
Группы элементов	I					<u>Li⁺</u>	<u>Au³⁺</u>		<u>Ag⁺</u>	<u>Au⁺</u>	<u>Rb⁺</u>	<u>Cs⁺</u>	
						<u>Cu²⁺</u>	<u>Cu⁺</u>						
	II		<u>Be²⁺</u>			<u>Zn²⁺</u>		<u>Cd²⁺</u>	<u>Sr²⁺</u>	<u>Ba²⁺</u>			
									<u>Hg²⁺</u>		<u>Ra²⁺</u>		
	III		<u>B³⁺</u>		<u>Al³⁺</u>	<u>Ga³⁺</u>	<u>Sc³⁺</u>	<u>Y³⁺</u>					
							<u>In³⁺</u>		<u>In⁺</u>				
							<u>La⁺</u>	<u>La³⁺</u>					
							<u>Pu⁶⁺</u>	<u>Pu⁵⁺</u>	<u>Pu⁴⁺</u>	<u>Tl³⁺</u>	<u>Ac³⁺</u>	<u>Tl⁺</u>	
									<u>Pu³⁺</u>				
	IV				<u>Ti⁴⁺</u>	<u>Ti³⁺</u>	<u>Ti²⁺</u>						
				<u>Ge⁴⁺</u>	<u>Ge²⁺</u>		<u>Zr⁴⁺</u>	<u>Sn²⁺</u>	<u>Th³⁺</u>	<u>Pb²⁺</u>			
					<u>Sn⁴⁺</u>	<u>Hf⁴⁺</u>		<u>Th⁴⁺</u>					
	V		<u>V⁵⁺</u>	<u>V⁴⁺</u>	<u>V³⁺</u>	<u>V²⁺</u>	<u>Sb³⁺</u>						
				<u>Sb⁵⁺</u>	<u>Nb⁵⁺</u>	<u>Nb⁴⁺</u>	<u>Pa⁵⁺</u>	<u>Pa³⁺</u>					
					<u>Ta⁵⁺</u>	<u>Bi³⁺</u>	<u>Pa⁴⁺</u>	<u>Bi³⁺</u>					
	VI			<u>Te⁶⁺</u>	<u>Cr³⁺</u>	<u>Se⁴⁺</u>	<u>Cr²⁺</u>						
				<u>W⁶⁺</u>	<u>W⁴⁺</u>		<u>Te⁴⁺</u>						
					<u>Mo⁴⁺</u>								
	VII			<u>Mn⁴⁺</u>	<u>Mn³⁺</u>	<u>Mn²⁺</u>							
				<u>Re⁶⁺</u>	<u>Re⁴⁺</u>								
	VIII				<u>Co³⁺</u>	<u>Co²⁺</u>							
					<u>Ni³⁺</u>	<u>Ni²⁺</u>							
				<u>Ru⁸⁺</u>	<u>Ru⁴⁺</u>	<u>Ru³⁺</u>							
					<u>Rh⁴⁺</u>	<u>Pd²⁺</u>							
					<u>Pd⁴⁺</u>	<u>Rh³⁺</u>							
					<u>Rt⁴⁺</u>	<u>Pt²⁺</u>							
				<u>Ir⁶⁺</u>	<u>Ir⁴⁺</u>	<u>Ir³⁺</u>	<u>Ir²⁺</u>						
				<u>Os⁸⁺</u>	<u>Os⁴⁺</u>	<u>Os³⁺</u>	<u>Os²⁺</u>						

(проявляться), если микроорганизмы взаимодействуют с металлами в кислых растворах.

Некоторые из металлов (Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cs^+ , Sr^{2+}) устойчивы в катионной форме как в кислых, так и в нейтральных и слабощелочных растворах. В нейтральных растворах переходят в анионную форму такие металлы, как Cr(VI) , Mo(VI) , W(VI) . Однако и в анионной форме они имеют свои стереохимические аналоги среди макроэлементов (табл. 6.2). Так, ионный радиус аниона CrO_4^{2-} равен соответствующему ионному радиусу PO_4^{3-} и очень близок к ионному радиусу SO_4^{2-} .

Теоретический прогноз неспецифического микробного транспорта металлов вследствие стереохимической аналогии с макроэлементами подтверждается экспериментальным данным.

В табл. 6.3 представлены данные о взаимодействии микроорганизмов со стереохимическими аналогами-металлами.

По-видимому, вне зависимости от таксономического положения микроорганизмов стереохимические аналоги (особенно те, которые имеют одинаковые заряды ионов) имеют общие системы транспорта. Так, общую транспортную систему для K^+ и Rb^+ имеют грибы (*Blastocladiella emersonii*), дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae*), бактерии (*Escherichia coli*) и цианобактерии (*Anabaena variabilis*). Стереохимическими аналогами сульфата являются молибдат, хромат и вольфрамат, имеющие общие транспортные системы у аэробных (*Pseudomonas aeruginosa*, *P. fluorescens*), факультативно анаэробных (*Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*) и облигатно анаэробных (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfotomaculum orientis*) микроорганизмов.

Можно отметить, что наличие стереохимического аналога может приводить как к стимуляции, так и к подавлению транспорта металла в клетку.

Так, у культур *P. aeruginosa* и *P. fluorescens* сульфат активирует транспорт хромата в клетку, а у культуры *Rhizobium sp.* вольфрамат активирует транспорт молибдата.

Соответственно, у культуры *S. cerevisiae* и сульфатредуцирующих

Таблица 6.2. Ионные радиусы некоторых анионов

Анион	Ионный радиус, нм	Анион	Ионный радиус, нм
NO_3^-	0,189–0,257	SO_4^{2-}	0,295
SH^-	0,200	PO_4^{3-}	0,300
HSO_4^-	0,206	CrO_4^{2-}	0,300
ClO_4^-	0,236	MoO_4^{2-}	0,345

Таблица 6.3. Взаимодействие микроорганизмов с макроэлементами
и их стереохимическими аналогами

Стереохимические аналоги		Микроорганизмы	Тип взаимодействия в биологической системе	Источник литературы
Макро- элемент	Металл- аналог			
K ⁺	Rb ⁺	<i>Blastocladiella emersonii</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Kropf, Harold, 1982
K ⁺	Rb ⁺ , Ba ²⁺	<i>B. emersonii</i>	Общая система транспорта ионов из клетки	Van Brunt, 1982
K ⁺	Rb ⁺ , Cs ⁺	<i>Escherichia coli</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Bossemeyer, 1989
K ⁺	Rb ⁺	<i>Anabaena variabilis</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Reed, 1981
K ⁺	Rb ⁺	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Rodriguez-Navarro, 1984
Mg ²⁺	Co ²⁺ , Ni ²⁺	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Ainsworth, 1980
Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Cd ²⁺	<i>Bacillus subtilis</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Burke, 1986
Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Co ²⁺	<i>Escherichia coli</i>	Co ²⁺ ингибирует транспорт Mn ²⁺ в клетку	Laddaga, 1985
Fe ²⁺	Co ²⁺	<i>Acidophilium sp.</i>	Конкуренция за систему транспорта ионов в клетку	Dou, 1989
Ca ²⁺	Sr ²⁺	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Borst-Pauwels, 1986
Ca ²⁺	Zn ²⁺ , Cd ²⁺	<i>Escherichia coli</i>	Zn ²⁺ активирует транспорт Cd ²⁺ в клетку	Sakaguchi, 1981
Ca ²⁺	Zn ²⁺ , Co ²⁺ , Mn ²⁺	<i>Candida utilis</i>	Общая система транспорта ионов в клетку; Zn ²⁺ ингибирует транспорт Co ²⁺ в клетку	Каспарова, 1989
Ca ²⁺	Mn ²⁺ , Cd ²⁺	<i>B. subtilis</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Laddaga, 1985
Ca ²⁺	Zn ²⁺ , Cu ²⁺	<i>Debariomyces hansenii</i>	Конкуренция за центры связывания металлов в клеточной стенке	Wakatsuki, 1970
Fe ²⁺	Co ²⁺ , Mn ²⁺	<i>B. brevis</i>	Fe ²⁺ и Co ²⁺ ингибируют транспорт Mn ²⁺ в клетку	Jack, 1979
Fe ²⁺	Mn ²⁺ , Cd ²⁺	<i>B. subtilis</i>	Fe ²⁺ и Co ²⁺ ингибируют транспорт Mn ²⁺ в клетку	Burke, 1988
Fe ²⁺	Mn ²⁺ H, Cd ²⁺	<i>Staphylococcus aureus</i>	Конкуренция за систему транспорта ионов в клетку	Weiss, 1976

Na ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	Cd ²⁺	<i>B. cereus</i> , <i>E. coli</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Возрастание защитного действия катионов от Cd ²⁺ в следующем порядке: Na ⁺ > Mg ²⁺ > Ca ²⁺	Naidu, 1988
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Mn ²⁺ , CO ²⁺ , Cd ²⁺	<i>S. cerevisiae</i>	Максимальная конкуренция за транспортную систему между ионами с близкими ионными радиусами	Naidu, 1988
Mg ²⁺	Co ²⁺ , Mn ²⁺	<i>E. coli</i>	Общая система транспорта ионов в клетку	Park, 1976
Mg ²⁺ , Ca ²⁺	Cu ²⁺ , Al ³⁺ , Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Cd ²⁺	<i>E. coli</i>	Подавление поглощения меди ионами металлов и макроэлементами	Baldry, 1980
Mg ²⁺	Ni ²⁺	Микроэлементы	Конкуренция за общие центры клеточной стенки	Babich, 1981
SO ₄ ²⁻	CrO ₄ ²⁻	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>P. fluorescens</i>	SO ₄ ²⁻ активирует транспорт CrO ₄ ²⁻ в клетку	Ohtake, 1981
SO ₄ ²⁻	WO ₄ ²⁻ , MoO ₄ ²⁻	<i>Rhizobium sp.</i>	WO ₄ ²⁻ активирует транспорт MoO ₄ ²⁻ в клетку	Baxi, 1988
SO ₄ ²⁻	MoO ₄ ²⁻ , CrO ₄ ²⁻	<i>S. cerevisiae</i>	MoO ₄ ²⁻ и CrO ₄ ²⁻ ингибирует транспорт SO ₄ ²⁻ в клетку	McCready, 1979
SO ₄ ²⁻	MoO ₄ ²⁻	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> , <i>Desulfotomaculum orientis</i>	MoO ₄ ²⁻ ингибирует транспорт SO ₄ ²⁻ в клетку	Fukui, 1989
SO ₄ ²⁻	MoO ₄ ²⁻ , CrO ₄ ²⁻ , WO ₄ ²⁻ , SeO ₄ ²⁻	<i>Desulfovibrio sp.</i>	Анионы металлов ингибируют транспорт SO ₄ ²⁻ в клетку	Taylor, 1979
NO ₃ ⁻	MoO ₄ ²⁻ , CrO ₄ ²⁻ , WO ₄ ²⁻	<i>E. coli</i>	CrO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WO ₄ ²⁻ ингибируют восстановление MoO ₄ ²⁻	Baldry, 1980

бактерий хромат и молибдат конкурируют за систему транспорта сульфата в клетку.

Как видно из табл. 6.3, в настоящее время хорошо изучено взаимодействие микроорганизмов с металлами, входящими в первую зону стереохимической аналогии (Fe³⁺, Mg²⁺, Fe²⁺). К ним относятся металлы, устойчивые в воде в катионной форме в широком диапазоне pH:

Zn^{2+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} и др. Эти металлы имеют общие транспортные системы с макроэлементами (прежде всего с Mg^{2+}) и, как правило, конкурируют с ними. Конкуренция за транспортные и рецепторные системы проявляется не только по отношению к макроэлементу, но и между отдельными металлами, например между Mn^{2+} и Cd^{2+} у *Bacillus subtilis* и *Staphylococcus aureus*, Co^{2+} и Ni^{2+} у *Klebsiella pneumoniae* и *Saccharomyces cerevisiae*.

Необходимо уточнить, что при наличии в среде органических кислот и других экзометаболитов металлы образуют с ними комплексные соединения, имеющие размеры значительно большие, чем ионы металлов. Тем не менее очень велика вероятность того, что определяющим критерием стереохимической аналогии является все же размер катиона.

Так, если близки размеры катионов S^{6+} (0,029–0,034 нм) и Cr^{6+} (0,035–0,053), то эти же элементы являются стереохимическими аналогами и в анионной форме, поскольку имеют большие ионные радиусы: SO_4^{2-} (0,295 нм), CrO_4^{2-} (0,300 нм). По-видимому, этот же эффект будет проявляться и при образовании комплексных соединений с экзометаболитами микроорганизмов.

Можно утверждать, что стереохимическая аналогия металлов и неспецифическая аккумуляция металлов вследствие стереохимической аналогии — распространенное явление в мире микроорганизмов.

Важным является еще одно обстоятельство. Одни и те же стереохимические аналоги (например, Mg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}) имеют общие транспортные системы (табл. 6.3) у микроорганизмов, относящихся к различным таксонам (культуры *Klebsiella*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Aspergillus*).

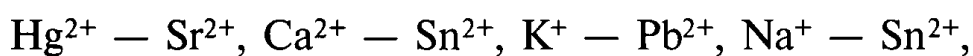
Приведенные факты позволяют сделать вывод о том, что неспецифический транспорт, биоаккумуляция стереохимических аналогов микроорганизмами, а, возможно, и трансмутация изотопов являются общебиологической закономерностью.

Очевидно, что аккумуляция металлов микроорганизмами вследствие активного транспорта особенно эффективна в тех случаях, когда их концентрация сопоставима с «физиологически необходимой концентрацией» макроэлемента. Учитывая тот факт, что потребность популяции микроорганизмов в макроэлементах (и микроэлементах) составляет от 10 до 20 мг/л, можно предположить, что именно в этом концентрационном диапазоне будет реализовываться неспецифическая микробная аккумуляция металлов. При более высоких концентрациях металлов (20–100 мг/л) удаление их из водных растворов возможно при поглощении клеточной стенкой (Beveridge, 1976; Beveridge, 1978; Brady, 1991; Marquis,

1976; Pooley, 1976) или полисахаридной капсулой (Ford, 1987; Gessey, 1988; Mittelman, 1985; Scott, 1987, 1988).

Если концентрация металлов в водном растворе превышает 100 мг/л, то ни активный транспорт внутрь клетки, ни поглощение клеточными структурами не обеспечат необходимую степень извлечения металлов. В этом случае эффективное удаление металлов может происходить только путем образования нерастворимых соединений металлов с экзометаболитами (сульфидов, фосфатов или карбонатов).

Приведенная в работах (Таширев, 1994, 1995) систематизация ионов металлов по их стереохимической аналогии позволяет предположить наличие пока еще неизвестных общих транспортных систем для многих металлов. Например, по величине ионного радиуса стереохимическими аналогами Cs^+ являются Rb^+ , Ba^{2+} , Ra^{2+} и Tl^+ . Кроме того, несмотря на то что Cs^+ является аналогом K^+ , он более близок по своему размеру к NH_4^+ , чем к K^+ . Однако до сих пор не изучена конкуренция между Cs^+ и NH_4^+ за транспортные системы микроорганизмов. Теоретически допустимо обнаружение общих транспортных систем у микроорганизмов для следующих пар катионов (см. табл. 6.1):



В ряде работ показана конкуренция за транспортные системы между анионами металлов VI группы и сульфатом (см. табл. 6.3). Однако не изучено влияние фосфата (PO_4^{3-}), имеющего такой же ионный радиус, как и у сульфата, на транспорт анионов тяжелых металлов.

Стереохимическая аналогия катионов металлов проявляется также в ферментных системах микроорганизмов (см. табл. 6.4). Как правило, макроэлементы и металлы с близкими ионными радиусами, активируют ферменты и могут заменять друг друга в активных центрах ферментов.

Так, макроэлементы первой зоны стереохимической аналогии (Mg^{2+} и Fe^{2+}) активируют пиррофосфатазную активность почвенных микроорганизмов. Такое же действие оказывают и их структурные аналоги — Co^{2+} , Zn^{2+} и Mn^{2+} , имеющие ионные радиусы близкие к макроэлементам (пример 9 из табл. 6.4). Способность металлов, имеющих близкие ионные радиусы, заменять друг друга в ферментных системах без нарушения их функционирования, по-видимому, широко распространенное явление.

Так, например, Co^{2+} и Zn^{2+} могут заменять друг друга в L-галактит-1-фосфатдегидрогеназе, алкогольдегидрогеназе, креатиниминогидро-

Таблица 6.4. Стереохимическая аналогия металлов в ферментных системах микроорганизмов

Стереохимические аналоги			Ферментная система микроорганизма, влияние аналогов	Источник литературы
Макро- элемент	Металл- аналог			
1 Mg ²⁺	Mn ²⁺	Активация аденилатциклазного комплекса <i>Escherichia coli</i>		Liberman, 1985
2 Ca ²⁺	Sr ²⁺ , Cd ²⁺ , Mn ²⁺	Реконструкция из апо-формы активной глюкозодегидрогеназы <i>Acinetobacter calcoaceticus</i>		Wilkins, 1989
3 Ca ²⁺	Cg ²⁺ , Mn ²⁺ , Co ²⁺ , Zn ²⁺	Активация L-галактит-1-фосфатдегидрогеназы <i>Klebsiella pneumoniae</i>		Markwell, 1981
4 Ca ²⁺	Mn ²⁺ , Cu ²⁺	Замещение марганцем меди в Cu/Zn- супероксиддисмутазе <i>Bacillus staerothermophilus</i>		Bannister, 1985
5 Ca ²⁺	Co ²⁺ , Zn ²⁺	Восстановление активности алкогольдегидрогеназы <i>Zymomonas mobilis</i> ионами кобальта или цинка		Kinoshita, 1985
6 Fe ²⁺	Co ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Ni ²⁺	Восстановление активности креатининиминогидролазы <i>Flavobacterium filamentosum</i>		Esders, 1985
7 Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Co ²⁺ , Zn ²⁺ , Ni ²⁺	Активация ионами металлов гипоксантин /гуанинфосфорибозилтрансферазы дрожжей		Ali, 1986
8 Fe ²⁺	Mn ²⁺ , Cu ²⁺	Замещение марганцем и железом меди в Cu/Zn-супероксиддисмутазе 8 штаммов <i>Pseudomonas</i> и <i>Xanthomonas sp.</i>		Steinman, 1985
9 Mg ²⁺ , Fe ²⁺ , Ca ²⁺	Co ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺	Активация пирофосфатаз 6 штаммов почвенных микроорганизмов		Searle, 1977
Mg ²⁺	Zn ²⁺ , Sr ²⁺ , Co ²⁺	Реактивация апо-формы металлпротеиназы <i>Pseudomonas fluorescens</i>		Diermayr, 1987
10 K ⁺	Tl ⁺ , Rb ⁺	Связывание Tl ⁺ и Rb ⁺ с калийактивируемой альдегиддегидрогеназой дрожжей		Bostian, 1982
11 Ca ²⁺	Sr ²⁺ , Cd ²⁺ , Mn ²⁺	Конкуренция ионов за активный центр глюкозодегидрогеназы		Wilkins, 1989

лазе, гипоксантин/гуанинфосфорибозилтрансферазе, пирогосфатазе и металлпротеиназе у различных микроорганизмов (примеры 3, 5, 6, 7, 9 и 10 в табл. 6.4). Для трех ферментов активирующими металлами являются Mn^{2+} , Co^{2+} и Zn^{2+} (примеры 3, 7, 9 в табл. 6.4) и т. д. Таким образом, стереохимические аналоги первой зоны являются и физиологическими аналогами.

Размер ионов для ферментных систем с учетом стереохимической аналогии имеет, по-видимому, гораздо большее значение, чем заряд ионов. Во многих случаях ферментные системы проявляют сродство к катионам с равными зарядами. Так, α -карбоксилазу активируют как двухзарядные Mg^{2+} и Fe^{2+} , так и трехзарядные Al^{3+} и Fe^{3+} . Та же закономерность проявляется и в отношении Mg^{2+} , Mn^{2+} и Al^{3+} , Cr^{3+} для фосфоглюкомутазы (Калинин, 1971).

В то же время следует отметить, что некоторые ферменты могут активировать катионы, значительно отличающиеся друг от друга по размерам.

Так, малатдегидрогеназу активируют ионы, которые не являются стереохимическими аналогами: Mg^{2+} (первая зона) и K^+ , Cs^+ , Rb^+ (третья зона) (Калинин, 1971). Однако в этих случаях активация фермента, вероятно, определяется не непосредственно катионами металла, а другими факторами — ионной силой раствора, величиной s -потенциала и т. д.

6.5. РЕПАРАЦИЯ ДНК И ПРОБЛЕМА ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ

Одним из возможных элементов биологической системы, в котором может происходить процесс трансмутации изотопов, является макромолекула ДНК. Эта макромолекула содержит гены, отвечающие за процессы самовоспроизводства самой ДНК и гены, управляющие синтезом белков.

Как известно, молекула ДНК состоит из двух комплементарных цепей, образующих парную последовательность нуклеотидов (аденин, тимин, цитозин, гуанин). При действии внешней ионизирующей радиации или свободных радикалов могут происходить разрывы цепей ДНК. В наибольшей степени это относится к свободным от белка макромолекулам ДНК. Одиночные разрывы ликвидируются с помощью специализированного фермента *лигазы*. Двойные разрывы не ликвидируются ферментами, а процесс самовосстановления ДНК может происходить только по чисто физическим механизмам саморепа-

рации, рассмотренным в работах (Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996, 1997; Vysotskii, Pinchuk, 1999; Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, Pinchuk, 1999, 2001; Pinchuk, Vysotskii, Zhmudskii, 1999; Vysotskii, Pinchuk, 1999; Pinchuk, Vysotskii, 2001).

В этих работах было показано, что характер взаимодействия между концевыми парами нуклеотидов, находящихся на обеих сторонах двойного разрыва, сложным образом зависит от нескольких следующих факторов:

- 1) ширины разрыва L ;
- 2) кулоновского взаимодействия зарядов q_{ni} и q_{mj} , распределенных по поверхностям нуклеотидов i и j с учетом экранирующего действия ионов водно-солевой внутриклеточной среды, представляющей собой электролит:

$$V_C(L) = \sum_{ni,mj} V_C(r_{ni,mj})$$

- 3) дисперсионных свойств, характеризующихся диэлектрической проницаемостью, внутриклеточной жидкости $\epsilon(\omega)$ в диапазоне частот от квазистатической до рентгеновской, и диэлектрических проницаемостей $\epsilon_i(\omega)$ и $\epsilon_j(\omega)$ нуклеотидов.

Полное взаимодействие включает как сумму кулоновских взаимодействий распределенных по поверхности зарядов разных пар нуклеотидов (образованных σ -электронами Дель Ре и π -электронами Хюккеля с учетом конкретной геометрии уотсон-криковских пар), так и электродинамическое ван-дер-ваальсово дисперсионное взаимодействие между этими парами нуклеотидов во внутриклеточной среде.

На основе проведенного анализа нами было обнаружено, что для четырех комбинаций концевых пар нуклеотидов АТ-ТА, АТ-ГЦ, АТ-ЦГ, ГЦ-ЦГ (из числа шести потенциально возможных комбинаций АТ-АТ, АТ-ТА, АТ-ГЦ, АТ-ЦГ, ГЦ-ГЦ, ГЦ-ЦГ на противоположных сторонах двойного разрыва) характер взаимодействия между разорванными частями ДНК при любой ширине разрыва L соответствует их взаимному притяжению и отсутствию потенциального барьера. Этот результат приводит к возможности последующей самоликвидации парного разрыва и самовосстановлению целостности ДНК. Было также обнаружено, что для двух особых комбинаций концевых пар ГЦ-ГЦ и АТ-АТ при ширине разрыва около $L_0 \approx 7 \text{ \AA}$ и $\text{pH} \leq 7-9$ (а также при относительной концентрации гидратированных электронов в водно-солевой внутриклеточной жидкости $\alpha \leq 10^{-7}$) в пространстве между разорванными концами ДНК существует потенциальный барьер $V(L, \eta, \alpha) > 0$, который препятствует процессу саморепарации тех разрывов, ширина которых превышает L_0 (рис.6.3).

Наличие этого антирепарационного барьера и его высота $V_{\max} \equiv V(L_0, \eta, \alpha)$ зависят от соотношения кулоновских и дисперсионных сил, которые, в свою очередь, определяются как типом нуклеотидов в концевых парах, так и характеристиками внутриклеточной жидкости (вязкости η , температуры T , ионного и солевого состава, а также концентрации гидратированных электронов α и др.). Значение V_{\max} может существенно превышать тепловую энергию $k_B T$ (например, для взаимодействия концевых пар нуклеотидов ГЦ-ГЦ имеем $V_{\max} \approx 3k_B T$). При наличии внешних радиационных полей и других воздействий из-за изменения свойств внутриклеточной жидкости происходит изменение характеристик сил взаимодействия между концевыми парами, деформация барьера $V(L, \eta, \alpha)$ и уменьшение его высоты. При определенной комбинации параметров среды и характеристик внешнего воздействия барьер для всех возможных типов парных разрывов исчезает, что приводит к возможности резкого увеличения вероятности авторепарации любых типов разрывов и существенному подавлению процессов деградации ДНК. Фактически такой процесс соответствует решению задачи взаимного распознавания и последующей саморепарации отдельных фрагментов биомолекулы ДНК.

Было показано, что процесс формирования и ликвидации разрыва имеет характер диффузии и связан с флуктуационным воздействием молекул воды на поверхность разделенных частей ДНК. Прямые расчеты показывают, что этот процесс существенно зависит от температуры

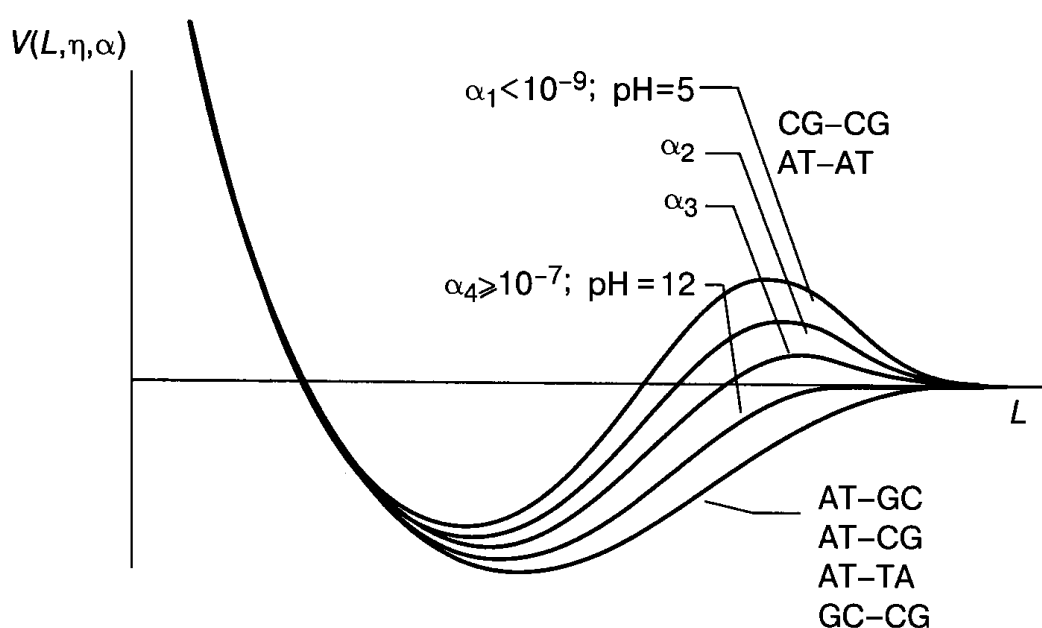


Рис. 6.3. Пространственная структура потенциального барьера в области двойного разрыва ДНК при разных pH и разной концентрации гидратированных электронов во внутриклеточной водно-солевой среде

внутриклеточной среды и характеризуется очень большим временем релаксации (оно может достигать нескольких часов). Центральная часть потенциальной ямы в области двойного разрыва имеет форму, близкую к параболической, что может способствовать осуществлению процессов, ведущих к кратковременному подавлению кулоновского отталкивания ядер атомов, которые могут находиться в области разрыва. Аналогичное каталитическое действие может иметь место также в области действия ДНК-полимеразы. Более детальный анализ физических аспектов таких процессов был проведен в главе, посвященной теории ядерных трансмутаций.

6.6. АДАПТАЦИЯ БИООБЪЕКТОВ, АНАЛОГИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И СИНТЕЗ ИЗОТОПОВ — ЗАКОНОМЕРНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Таким образом, проявление стереохимической аналогии металлов и жизненно необходимых микроэлементов, адаптированных к культуре, лежит в основе явления неспецифической аккумуляции металлов микроорганизмов.

По-видимому, этот процесс является своеобразным ответом эволюции на глобальную дилемму — как совместить тенденцию развития и адаптацию биологических объектов, каждый из которых содержит генетически predetermined требование постоянства элементного состава со случайным характером и неоднородным распределением этих элементов в окружающем мире, а также с глобальными и постоянными изменениями окружающей среды?

Возможно, что и сам процесс трансмутации в растущих биологических системах с образованием необходимых микроэлементов или их аналогов является столь же необходимым ответом эволюции на эту дилемму.

По нашему мнению, процесс трансмутации происходит там, где имеет место конкуренция на основе стереохимической аналогии (как минимум в транспортных и ферментных системах). Пространственная область проявления этой конкуренции определяет область, в пределах которой осуществляется сама трансмутация.

Можно ли указать то конкретное место, где работает этот своеобразный ядерный реактор? Очевидно, что таких мест должно быть очень много (в противном случае реакции были бы столь редкими событиями, что их было бы невозможно обнаружить). Можно также отметить, что с большой вероятностью трансмутация происходит в таких структурных частях биологических объектов, которые подвержены динамическим воз-

действиям (зона роста, нестационарные транспортные системы, системы динамического отклика на любого рода возмущения и др.).

Очевидно также, что эффективность процесса трансмутации в очень значительной степени зависит от того, выполняются ли исходные предпосылки процесса кратковременного устранения влияния кулоновского барьера на ядерное взаимодействие. Необходимо, чтобы участвующие в процессе трансмутации элементы (изотопы) находились в растворимой форме (для металлов это соответствует процессу мобилизации). Ясно, что для большой вероятности протекания таких процессов необходимо, чтобы исходные изотопные компоненты в растворимой форме были отделены от сопутствующих химических элементов (например, ядерное взаимодействие с участием протонов или дейтронов из-за наличия изменяемого кулоновского барьера протекает по-разному в зависимости от того, входят ли эти ядра в состав молекул воды или они представлены в виде независимых ионов). Это требование сразу приводит к необходимости детального рассмотрения всей совокупности окислительно-восстановительных процессов и учета соответствующих редокс-потенциалов по схеме, аналогичной той, которая была рассмотрена выше.

И наконец, итоговая локализация продуктов трансмутации зависит от того, является ли это продукт адаптированным к данной культуре или нет. Для адаптированных элементов (например, синтезированного железа, которое, кроме изотопного состава, ничем не отличается от естественного железа) локализация соответствует естественному и характерному для данного микроэлемента распределению. В то же время для чужеродных неадаптированных элементов итоговая локализация продуктов трансмутации совпадает с анализируемым выше распределением примесных неадаптированных элементов (отложения на поверхности клеток, связывание капсульными полисахаридами, образование комплекса металлов с белками клеточной мембраны, связывание структурами клеточной стенки, связывание с белками цитоплазмы и внутренними мембранными структурами или образование нерастворимых продуктов внутри клетки и др.).

Конкретный поиск места «ядерного биореактора» может быть проведен с помощью позиционно-чувствительных прецизионных методов анализа (например, туннельной микроскопии или масс-спектропии высокого разрешения).

ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

7.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОФИЛАКТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ, ЭТИОЛОГИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДЕФИЦИТОМ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

До начала XIX века общепризнанной была точка зрения, согласно которой все живые организмы состоят из ограниченного (около 12–15) числа химических элементов (так называемых макроэлементов). К числу этих макроэлементов обычно относили Н, С, N, О, Р, S, К, Na, Са, Fe и еще около 10 «биогенных элементов». Вначале считали, что макроэлементами являются самые легкие химические элементы. Затем от этого взгляда отказались и предполагали, что макроэлементы выделяются по их способности образовывать соединения с углеродом.

Принципиально новый взгляд на эту проблему возник после основополагающих работ Вернадского о геохимическом изучении живого вещества. В основание этих работ был положен впервые проведенный детальный анализ грандиозного по своим масштабам геохимического итога действия биосферы Земли, которая за миллиард лет кардинально изменила всю биогенную структуру поверхности суши и воды Земли. Биосфера стала реальным природообразующим и природорегулирующим фактором эволюции. Живой мир в процессе эволюции стал предельно взаимосвязанным и адаптированным к этим процессам. Эти изменения в итоге закрепились в генетическом коде. Если соотношение макроэлементов в различных живых организмах примерно одинаково и имеет существенные отличия, связанные только со строением организмов, то содержание микроэлементов очень сильно изменяется (без видимых причин) от одного вида к другому, оставаясь

для каждого из них строго фиксированным. Отличия могут быть очень большими. Если обычно содержание микроэлементов не превышает сотых и тысячных долей процента, то существуют организмы, которые накапливают и содержат такие разнородные химические элементы, как Si, Fe, Mn, Al, Sr, Ba в количестве нескольких процентов! Это — настоящие обогатительные фабрики с очень высокой эффективностью. Фактически, индивидуальный химический состав может быть отнесен к видовому признаку данного типа живых организмов (первичное элементное квантование).

На рис. 7.1 представлено распределение средней (по всему живому миру суши) концентрации различных химических элементов (Виноградов, 1935). Видно, что хотя концентрация более тяжелых элементов в биологических объектах действительно убывает (в среднем), но распространенность элементов с увеличением их порядкового номера спадает отнюдь не монотонно. Это отражает закономерности эволюции и функциональность отдельных микроэлементов. Более того, распределение элементов с четным и нечетными номерами (четным и нечетным числом протонов в ядре) обнаруживают специфическую периодичность, связанную, в итоге, с ядерными зарядовыми свойствами нуклидов.

Этот взгляд нашел полное подтверждение после того, как было эмпирически установлено, что причиной многих эндемических заболеваний является отсутствие или избыток в окружающей среде (почве, воде,

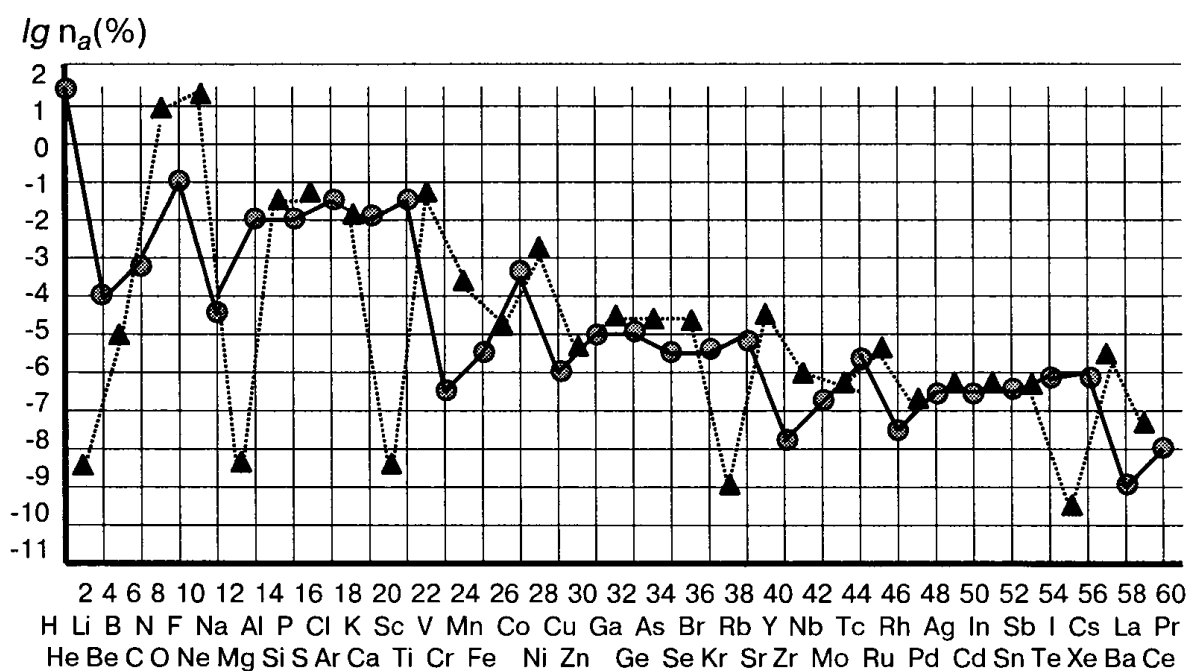


Рис.7.1. Распределение средней (по всему живому миру суши) концентрации различных химических элементов

растениях) определенных химических элементов (микроэлементов). Оказалось, что в живых и нормально функционирующих организмах должны находиться практически все химические элементы. Как макроэлементы, так и микроэлементы в нормальных условиях должны присутствовать в организме в строго определенных пропорциях (при определенных концентрациях), обеспечивая ему нормальную жизнедеятельность. Всякие отклонения в сторону увеличения или уменьшения количества микроэлементов (по отношению к оптимальной концентрации для данного вида) вызывают патологию, а значительное отклонение ведет к заболеванию.

Недостаток или избыток микроэлементов приводит к отрицательным последствиям, как и в случае с витаминами. По-видимому, это не случайно, поскольку микроэлементы входят в состав витаминов, ферментов и гормонов и в значительной степени модифицируют их действие. Например, тироксин содержит 65% иода, витамин B_{12} содержит 4% кобальта, в состав фермента карбоангидраза входит цинк, без меди невозможен синтез гемоглобина.

Каждому микроэлементу присуща своя патология. Например, если недостаток иода ведет к гипотиреозу с соответствующими симптомами, то его избыток приводит к тиреотоксикозу; недостаток магния проявляется общими возбуждениями (судорогами, явлениями рахита), а его избыток приводит к общему угнетению организма (вялость, сонливость). Таких примеров непосредственной связи патологии и нарушения оптимального микроэlementного состава очень много. Выявлены только такие связи, которые коррелируют с нарушениями оптимального состава для микроэлементов, присутствующих в большом количестве. Если же нормальная концентрация микроэлементов очень мала, то такую корреляцию выявить практически невозможно. Есть все основания считать, что многие патологии, не связываемые с такими сложно регистрируемыми нарушениями, на самом деле вызваны именно ими.

Есть еще одно обстоятельство, которое стало очевидным только после открытия генетического кода. Если сбалансированный (в среднем) индивидуальный химический состав может быть отнесен к видовому признаку данного типа живых организмов (первичное элементное квантование), то записанные на ДНК индивидуальные отличия каждой особи внутри этого типа можно отнести к проявлению вторичного элементного квантования. А это может привести к тому, что вообще каждый из индивидуумов нуждается в персональном распределении микроэлементов. Живой мир становится персонифицированным!

Биологически необходимые микроэлементы входят в состав всех органов живых организмов, причем в ряде случаев они естественным путем концентрируются в большом количестве в определенных органах. Барий имеет свойство накапливаться в пигментной и радужной оболочках глаза, фтор — в зубах и костях, мышьяк — в паренхиматозных органах, радиоактивная медь — в костном мозге (Вавилова, 1992).

Врачи-практики давно обнаружили ряд закономерностей, часть из которых подтверждена теоретическим анализом, а часть ждет своего обоснования. В частности, хорошо известна важная роль ионов натрия и калия в процессах на мембранах. Медь участвует в кроветворении и общих процессах роста и развития организма, стимулирует гормональную деятельность передней доли гипофиза. Кальций, магний, стронций, барий и радий участвуют в формировании костных тканей. Бор играет важную роль в функции репродукции человека. Одновременно он активно участвует в процессе углеводного обмена. Алюминий оказывает активное воздействие на соединительные ткани. Таллий, как и бор, активно воздействует на нервную систему. Кремний активно участвует в опорной и защитной функциях соединительной ткани, а свинец и олово — в функциях центральной нервной системы. Сера играет очень большую роль в обеспечении процесса жизнедеятельности, поскольку входит в состав ряда аминокислот (цистин, цистеин, метионин), а также ферментов и гормонов, где она участвует в жизненно важных окислительно-восстановительных процессах.

В медицинской практике дефицит эндогенного (т. е. секретируемого самим организмом) микроэлемента обычно восполняют, искусственно вводя этот микроэлемент извне, из постороннего источника (экзогенный микроэлемент), руководствуясь при этом эмпирическими правилами: «...ежедневная потребность организма в элементе X составляет предположительно 100 мкг, однако, поскольку биологическая доступность элемента X невелика, необходимо вводить 200 мкг в сутки...». Таким образом, в организм при дефиците того или иного микроэлемента вводят его заведомый избыток. Последствия такого «лечения» достаточно сложно предсказать заранее. В то время как гипervитаминозы описаны достаточно подробно, сведения о патологиях (расстройствах), вызванные избыточным содержанием микроэлементов, скудны и противоречивы. Вместе с этим очевидно, что процесс эволюции неизбежно приводит к оптимизации любой системы. Микроэлементный состав не исключение, и содержание микроэлементов в живом организме также должно быть четко сбалансированным.

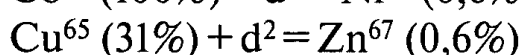
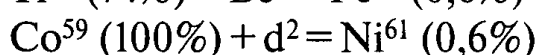
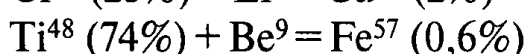
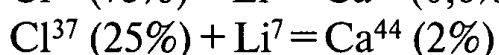
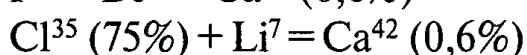
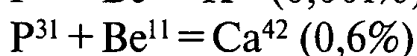
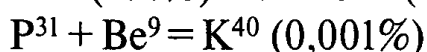
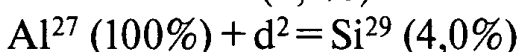
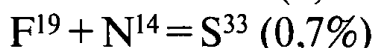
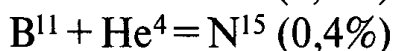
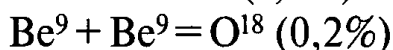
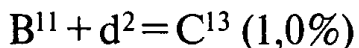
С помощью эффекта трансмутации изотопов можно решить проблему профилактики и лечения заболеваний, обусловленных дефицитом микроэлементов, что позволило бы отказаться от перегрузки организма экзогенными микроэлементами при сохранении терапевтического эффекта за счет мобилизации внутренних ресурсов организма. Особая важность такого подхода становится очевидной, если учесть необходимость персонифицированного распределения микроэлементов. Никакие усредненные (по всему виду) параметры распределения здесь не помогут.

Оптимальное решение состоит в восполнении указанного дефицита микроэлементов эндогенным путем, при котором в организм извне вводятся изотопные предшественники (исходные компоненты для трансмутации) необходимых микроэлементов. Затем в самом организме происходит реакция трансмутации в необходимые микроэлементы. При таком методе профилактики и лечения заболеваний, этиологически обусловленных дефицитом микроэлементов, усваиваться и фиксироваться будет только то количество синтезируемых микроэлементов, которое необходимо индивидуальному организму и только в тех органах, где они необходимы. Такая саморегуляция является прямым следствием рассмотренного в гл. 5 процесса синтеза изотопа, флуктуационно образующегося в процессе ядерного взаимодействия в оптимальной квантующей системе и фиксирующегося в процессе адаптивного встраивания в структуру биологического объекта.

7.2. ПОЛУЧЕНИЕ РЕДКИХ ЛЕГКИХ И ТЯЖЕЛЫХ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ МЕТОДАМИ БИОТЕХНОЛОГИИ, ОСНОВАННЫМИ НА ЯВЛЕНИИ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ

Производство стабильных изотопов является одним из перспективных направлений в технологии. Изотопы используются в микроэлектронике, медицине, фармакологии, материаловедении и в других областях науки и технологии. Однако использование изотопов в настоящее время все еще ограничено (особенно для случая редких и сверхредких изотопов) из-за очень высокой стоимости процесса обогащения и отделения необходимого изотопа от его природной смеси в составе данного химического элемента. Рассмотренные выше методы трансмутации изотопов в биологических системах позволяют прогнозировать возможность использования процессов низкотемпературного ядерного синтеза в растущих микробиологических культурах как для производства редких изотопов, так и для их оптимального использования.

Ниже приведены данные о некоторых редких изотопах, которые можно получить с помощью трансмутации изотопов в растущих микробиологических культурах. Цифры, стоящие в скобках после названия изотопа, соответствуют его содержанию (в процентах) в естественном состоянии данного химического элемента



Все эти реакции являются беспороговыми и экзотермичными и, следовательно, могут протекать без затрат энергии в процессе роста биологических систем (например, микробных культур). Конечными продуктами этих реакций являются изотопы тех химических элементов, которые необходимы для роста культур. Из этого сразу следует, что для максимальной оптимизации этих реакций в составе питательной среды должны отсутствовать (или находиться в минимально возможном количестве) те химические элементы, которые являются аналогами образуемых изотопов. В этом оптимальном случае синтезируемые изотопы будут сразу вовлекаться в процесс жизнедеятельности растущих культур, что предупреждает процесс их обратного распада на исходные изотопные компоненты.

Кроме образования на основе реакций синтеза легких ядер химических элементов и изотопов вплоть до ядер группы железа, эффект трансмутации изотопов позволяет реализовать также синтез более тяжелых ядер X_Z^A вплоть до трансурановых. Возможность протекания энергетически выгодных реакций синтеза тяжелых ядер определяется требованием минимизации энергии системы взаимодействующих ядер.

Как следует из формулы Бете-Вайцзеккера, полная энергия ядра имеет вид

$$E(Z, A) = (A - Z)M_n c^2 + ZM_p c^2 - \varepsilon_1 A + \varepsilon_2 A^{2/3} + \varepsilon_3 Z^2 / A^{1/3} + \varepsilon_4 (2A - Z)^2 / A - \delta \varepsilon_5 / A^{1/2}$$

где $(A - Z)M_n c^2$ и $ZM_p c^2$ — сумма энергий покоя всех $(A - Z)$ нейтронов

и Z протонов ядра; $\epsilon_1 A$ — энергия связи всех нуклонов в ядре (без учета определяемых другими слагаемыми характеристик кулоновского взаимодействия нуклонов, поверхностных эффектов и эффектов спаривания нуклонов); $\epsilon_2 A^{2/3}$ — поверхностная энергия ядра ($\epsilon_2 \approx 17,23$ МэВ); $\epsilon_3 Z^2/A^{1/3}$ — кулоновская энергия взаимного отталкивания протонов в ядре ($\epsilon_3 \approx 0,69$ МэВ); $\epsilon_4 (2A - Z)^2/A$ — «симметричная» энергия системы нуклонов, которая возрастает при нарушении равенства числа протонов и нейтронов из-за необходимости заселения более высоких уровней энергии вследствие существования принципа Паули для этих фермионов; $\delta(A, Z)\epsilon_5/A^{1/2}$ — энергия парных корреляций между одинаковыми нуклонами, причем $\delta(A, Z) = 0$ для ядер с нечетным A , $\delta(A, Z) = -1$ для четных A и четных Z , $\delta(A, Z) = 1$ для четных A и нечетных Z , $\epsilon_5 = 12$ МэВ.

Условие энергетической выгодности реакции синтеза тяжелых ядер

$$X_{Z_1}^{A_1} + X_{Z_2}^{A_2} = X_{Z_3}^{A_3}$$

проходящей с изменением заряда $Z_3 = Z_1 + Z_2$ и массы $A_3 = A_1 + A_2$ исходных изотопных компонентов, определяется из условия положительного изменения энергии связи участвующих в реакции синтеза ядер:

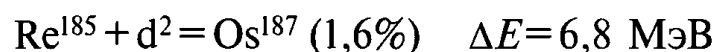
$$\Delta E = E(A_1, Z_1) + E(A_2, Z_2) - E(A_3, Z_3) \geq 0$$

Физическим обоснованием энергетической выгодности таких реакций синтеза с участием тяжелых и сверхтяжелых ядер является тот факт, что при взаимодействии тяжелого или сверхтяжелого ядра с очень легким изотопом (от водорода до углерода) увеличение энергии связи, связанное с поглощением легкого изотопа, оказывается более значительным, чем уменьшение этой энергии из-за увеличения массы тяжелого или сверхтяжелого ядра.

Например, положительный выход энергии будет у реакций синтеза с участием технеция:



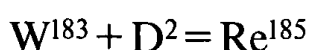
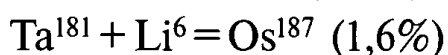
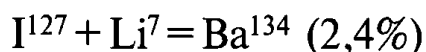
и изотопов рения



Энергетическая выгодность последних из рассмотренных реакций, свидетельствует, в частности, о том, что в естественных условиях все

изотопы рения в процессе трансмутации в биологических системах постепенно преобразуются в изотопы осмия.

Приведем, для примера, еще список некоторых реакций синтеза ядер (в том числе и тех, которые являются редкими, поскольку присутствуют в соответствующих химических элементах в очень малом количестве) тяжелее железа, характеризующихся положительным выходом энергии



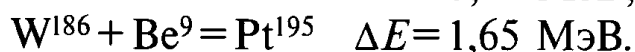
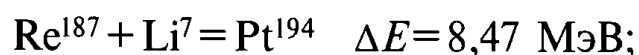
Рений является элементом, который в биохимических реакциях заменяет марганец.

Несложно также предложить реакцию трансмутации



которая в течение многих веков была «золотой мечтой» всех поколений алхимиков и которая естественным путем ведет к синтезу золота в объеме растущей микробиологической культуры. Из приведенных в гл. 6 данных следует, что калий (ионный радиус K^+ равен 1,33 Å) является стереохимическим аналогом золота (ионный радиус Au^+ равен 1,37 Å). В процессе роста культуры необходимый будет заменяться золотом. Эта реакция будет успешно протекать только в том случае, когда питательная среда, в которой растет бактериальная культура, будет обеднена калием и дополнительно содержать осмий и литий. Как следует из учета дефектов масс, эта реакция является экзотермической и беспороговой, не требует затрат энергии, а при ее протекании будет выделяться энергия $\Delta E = 7,37$ МэВ. Конечно, осуществление такой реакции требует определенных усилий и знаний, поскольку необходимо подобрать такие растворимые соли осмия и лития, которые сами не подавляют рост культуры и, кроме того, сама культура должна быть адаптированной к синтезируемому золоту (оно также не должно подавлять ее рост). А это уже вопрос профессиональной микробиологии.

Не менее ценным металлом является платина. Можно привести несколько примеров экзотермических беспороговых реакций, результатом которых будет синтез двух разных изотопов платины



Эти реакции будут протекать в том случае, когда питательная среда, в которой растет бактериальная культура, обеднена железом и допол-

нительно содержит рений и литий (в первом случае) или вольфрам и бериллий (во втором). Поскольку ионные радиусы двухвалентного железа ($0,75\text{--}0,83\text{ \AA}$) и двухвалентной платины ($0,8\text{--}0,85\text{ \AA}$) практически одинаковы, то в отсутствие железа синтезируемые атомы платины будут усваиваться растущей микробной культурой.

7.3. О ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кроме образования из легких, средних и тяжелых стабильных изотопов на основе реакций синтеза более тяжелых стабильных изотопов, возможна также утилизация легких, средних и тяжелых радиоактивных изотопов (например, компонентов отработанного ядерного топлива или изотопов, используемых в метрологии) путем преобразования их в стабильные изотопы тех химических элементов, которые необходимы для процесса жизнедеятельности микробных культур.

Проблема утилизации таких отходов очень важная. Это связано с рядом обстоятельств. Доля атомной энергетики в общем мировом энергетическом балансе по разным оценкам составляет сейчас от 10 до 20%. В ряде промышленно развитых стран атомная энергетика преобладает — ее доля достигает 70 % общего количества производимых и потребляемых энергоресурсов. Однако процесс развития атомной энергетики в настоящее время практически приостановлен. Основная причина состоит не в шоке после Чернобыля, а в том, что не удалось найти удовлетворительного решения проблемы переработки отработанного ядерного топлива, а также хранения и утилизации радиоактивных отходов. Рассмотрим эту проблему более детально.

Известно, что энергетические реакторы делятся на два основных типа: реакторы на быстрых нейтронах, работающие на уране высокого обогащения и реакторы на тепловых нейтронах, работающие на уране с обогащением 3—15% по U^{235} (в зависимости от типа реактора — легководный, тяжеловодный, уран-графитовый канальный, газовый и т. п.).

В процессе работы реактора при делении U^{235} образуется ряд изотопов, обладающих очень большим сечением захвата тепловых нейтронов (в частности, изотопов ксенона), в результате чего реактивность реактора постоянно снижается по мере увеличения выгорания (происходит «ксеноновое отравление»). До определенного уровня это может быть скомпенсировано регулирующими стержнями системы управления реактора. После достижения некоторой степени выгорания топлива

реактор становится, по сути, неуправляемым. В зависимости от типа реактора на тепловых нейтронах допустимая степень выгорания составляет от 5 до 20%, после чего сборки с тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ) должны быть выгружены и заменены новыми. Таким образом, по крайней мере, 80% дорогостоящего обогащенного U^{235} в реакторах на тепловых нейтронах остается неиспользованным.

Для реактора на быстрых нейтронах ситуация несколько упрощается, поскольку сечения захвата быстрых нейтронов для различных изотопов отличаются значительно меньше, чем для тепловых. В итоге опасность ксенонового (или иного) отравления реактора существенно снижается. Однако, в связи с тем, что при делении ядра урана образуется 2–3 ядра других элементов, плотность ядерного топлива по мере его облучения нейтронами постоянно падает, а объем — возрастает. Происходит «радиационное распухание» ТВЭЛов и возникает угроза невозможности их извлечения из реактора при его перезагрузке. Вследствие этого допустимое выгорание для реакторов на быстрых нейтронах тоже ограничено и обычно не превышает 40%. Видно, что и в случае реакторов на быстрых нейтронах используется менее половины ядерного топлива. Необходимо отметить, что это топливо более обогащено изотопом U^{235} и, следовательно, более дорогое.

Во всех странах, развивавших атомную энергетику, в течение нескольких десятилетий предпринимались попытки переработки облученного топлива с целью регенерации невыгоревшего обогащенного U^{235} . Исследовались как классические методы гидрометаллургии с использованием сорбционных и экстракционных процессов, хорошо зарекомендовавших себя при первичном переделе и аффинаже природного урана, так и довольно экзотические пирометаллургические (например, с использованием расплавов солей) и фторидные технологии, на которые возлагались большие надежды.

Все эти многообещающие поначалу исследования и разработки оказались безрезультатны и были прекращены во всех странах. Немногие существующие в мире технологические линии по переработке облученного топлива на основе низкообогащенного урана (ТВЭЛы реакторов на тепловых нейтронах) основаны на классических экстракционных и сорбционных процессах, аналогичных используемым при аффинаже природного урана.

Еще более неопределенна судьба реакторов на быстрых нейтронах. Не удалось разработать удовлетворительной технологии переработки облученного топлива таких реакторов, и оно в настоящее время вообще не перерабатывается. По-видимому, существующие и наиболее

распространенные сейчас легководные водо-водяные и уран-графитовые реакторы и в обозримом будущем останутся основными типами энергетических ядерных реакторов.

Ежегодно в мире из реакторов разных типов выгружается около 10 тыс. тонн отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Вначале почти все страны, развивавшие ядерную энергетику, предпринимали попытки переработки облученного топлива, однако после многих лет неудачных попыток разработки экономически и экологически приемлемой технологии отказались от его переработки. В настоящее время такие предприятия еще действуют во Франции, Великобритании и России, причем и во Франции, и в Великобритании уже обсуждается вопрос об их остановке. Мощности этих предприятий в трех странах обеспечивают возможность переработки только около 10 % ОЯТ, ежегодно выгружаемых из реакторов АЭС этих стран. США принципиально отказались от всяких попыток переработки ОЯТ еще в 70-х годах XX в. в пользу хранения неразделанных сборок отработанных ТВЭЛов в специальных хранилищах.

В настоящее время в мире накоплено более 100 тыс. тонн непереработанного ОЯТ. Существующие хранилища близки к заполнению. Таким образом, сохранение нынешней ситуации с переработкой и накоплением ОЯТ рано или поздно неизбежно приведет к отказу от использования атомной энергетики или, по крайней мере, к существенному ограничению строительства АЭС в наиболее густонаселенных (т. е. наиболее развитых экономически) странах мира. Весь парадокс в том, что основным преимуществом АЭС по сравнению с другими генерирующими мощностями является именно возможность их строительства в непосредственной близости от крупных потребителей электрической и тепловой энергии, т. е. как раз в густонаселенных регионах. Утрата атомной энергетикой этого преимущества в результате вынужденного переноса АЭС и предприятий по хранению и переработке ОЯТ в отдаленные от крупных потребителей регионы поставит под вопрос целесообразность использования атомной энергии вообще.

Есть две причины того, почему почти все страны отказались от переработки ОЯТ.

Первая связана с чисто экономическими проблемами. Первоначально переработка ОЯТ предпринималась с целью извлечения невыгоревшего делящегося материала (обогащенного урана) с последующей рефабрикацией ТВЭЛ из регенерированного урана. Считалось, что затраты на химическую переработку существенно ниже, чем на разделение изотопов урана, т. е. на процесс его обогащения. Однако по мере развития

технологий разделения изотопов, в частности повсеместному переходу от газодиффузионного к центробежному разделению, себестоимость процесса обогащения урана резко снижалась. В то же время за многие годы так и не удалось разработать технологий очистки вторичного урана от осколков деления, создающих высокую фоновую активность регенерированного урана.

Все это вместе взятое привело к тому, что экономическая целесообразность переработки ОЯТ с целью извлечения невыгоревшего делящегося материала была утрачена. Единственным обоснованием необходимости развития технологий переработки ОЯТ остались только ограниченность разведанных запасов природного урана и возможность их скорого исчерпания.

Вторая причина менее очевидна, но более серьезна. Существующие технологии переработки ОЯТ не являются безотходными, а действующие предприятия не работают по замкнутому циклу. Более того, в результате переработки ОЯТ количество радиоактивных отходов (в массовом исчислении), которые не поддаются дальнейшей переработке по существующим технологиям и подлежат захоронению в могильниках, увеличивается в сотни и тысячи раз по сравнению с первоначальным количеством (естественно, с соответствующим снижением их удельной активности).

Для примера укажем, что из одной тонны ОЯТ получается примерно такое же или чуть более количество твердых и предельно высокоактивных отходов (концентрированные радиоактивные изотопы различных элементов-осколков деления, остеклованные или цементированные), которые необходимо хранить в специальных могильниках для высокоактивных отходов не менее тысячи лет. Кроме того, образуется 10–20 т твердых и жидких отходов средней активности (смесь остатков осколков деления с различными неактивными веществами и материалами, использованными в процессе разделки и переработки ТВЭЛов), которые также подлежат захоронению. Наконец, образуется несколько сотен тонн газообразных, жидких и твердых низкоактивных отходов: различные газовые выхлопы, промывные воды, сливы, демонтированное оборудование, отработанные экстрагенты и сорбенты, спецодежда, использованные средства защиты и другие отходы любой химической технологии, загрязненные радиоактивными веществами. Эти отходы подлежат хранению в обычных могильниках, не требующих специального дорогостоящего оборудования. Однако объем их, в отличие от высокоактивных отходов, огромен.

Таким образом, в результате переработки выгружаемых ОЯТ по существующим технологиям ежегодно может образоваться более 10 млн тонн низкоактивных отходов. При этом остается открытым вопрос о газообразных отходах, которые пока просто выбрасываются в атмосферу после разбавления атмосферным воздухом до относительно безопасной концентрации радиоактивных загрязнений. Отметим, что коллективная доза при этом не изменяется.

С учетом этих факторов вполне допустим и обоснован вывод, что хранение ОЯТ дешевле и безопаснее их переработки по существующим технологиям. Несмотря на чрезвычайно высокие удельные затраты на хранение непереработанных ОЯТ, огромные затраты на сооружение и обслуживание специализированных хранилищ для высокоактивных ядерно-опасных отходов, по мнению многих специалистов это гораздо дешевле и безопаснее переработки с использованием существующих технологий. Однако, как уже отмечалось выше, существующие хранилища ОЯТ во всем мире заполнены, а строительство новых в густонаселенных регионах и странах мира (т. е. там, где в них наибольшая потребность) практически невозможно.

Ограниченные возможности существующих химических технологий связана с тем, что при классическом химическом подходе как регенерированный уран, так и различные низкоактивные отходы (как твердые, так и жидкие и газообразные) являются химически чистыми: содержание радиоактивных изотопов в качестве химической примеси составляет пренебрежимо малую величину. Эти отходы только радиохимически «грязные». В настоящее время не существует эффективных химических, физико-химических или физических процессов и технологий, способных удалить столь ничтожные количества радиоактивных загрязнений с соблюдением разумных экономических затрат.

После 3-летней выдержки в бассейнах-охладителях при АЭС суммарная активность ТВЭЛов снижается примерно на порядок вследствие распада наиболее короткоживущих изотопов. Из оставшейся активности более 99% создают относительно долгоживущие изотопы стронция, циркония, рутения, цезия, иода и редкоземельных элементов. Определенную активность создают также изотопы благородных газов.

В процессе химической переработки достаточно легко удастся очистить регенерированный уран от изотопов редкоземельных элементов, иода, благородных газов, значительной части стронция и цезия. Существенную проблему составляет очистка от изотопов рутения, который в силу своих химических свойств (многочисленные

валентные состояния и легкость перехода между ними) оказывается распределенным по всей технологической цепочке и загрязняет ее.

Низкоактивные отходы загрязнены радиоактивными изотопами практически тех же элементов, за исключением изотопов ксенона, криптона, иода.

Активность газообразных отходов определяется (помимо аэрозолей) главным образом изотопами благородных газов (криптона и ксенона) и иода, образующегося преимущественно в результате распада изотопов ксенона.

Эффект трансмутации изотопов в бактериальных культурах, устойчивых к чрезвычайно высоким уровням и дозам ионизирующих излучений, позволяет надеяться на возможность решения этих вопросов с помощью использования биологических систем.

В отличие от классических химических процессов, растущие микробиологические системы могут обеспечить чрезвычайно высокую селективность и полноту извлечения из различных сред различных химических элементов (в том числе и радиоизотопов), а явление низкотемпературной трансмутации — превращение поглощенных бактериальной культурой радиоактивных изотопов в стабильные изотопы других химических элементов. Естественно, речь не идет (и не может идти по вполне понятным причинам) о полномасштабном применении микробиологических систем на первых стадиях переработки ОЯТ и переработки высокоактивных отходов.

Перспективными направлениями использования бактериальных культур представляются, в первую очередь, несколько:

- 1) Тонкая очистка регенерированного урана на завершающих стадиях его очистки от осколков деления до уровня, обеспечивающего возможность применения его при рефабрикации ТВЭЛов без использования тяжелых камер и дистанционного управления.
- 2) Очистка газовых выбросов АЭС и заводов по переработке ОЯТ от изотопов благородных газов и продуктов их распада (главным образом, иода).
- 3) Очистка низкоактивных отходов до уровня, обеспечивающего возможность их захоронения как нерадиоактивных отходов, т. е. до уровня естественного радиоактивного фона (8–40 мкр/ч).
- 4) Очистка сточных и сбросных вод АЭС и предприятий по переработке ОЯТ до уровня естественного фона.

Помимо применения процессов трансмутации (и микробиологических систем вообще) в процессах очистки различных веществ и материалов от радиоактивных отходов, представляется весьма перс-

перспективным их применением для производства или селективного выделения отдельных радиоизотопов с чрезвычайно высокой степенью радиохимической (и химической) чистоты, например, в медицине используются изотопы технеция, галлия, иода и др., производство которых в настоящее время связано с довольно высокими удельными затратами на получение радиоизотопных препаратов нужной степени радиохимической чистоты. Представляется, что с использованием биологических систем затраты на получение радиофармпрепаратов требуемой радиохимической чистоты могли бы быть заметно снижены.

Не менее перспективной представляется возможность использования биологических систем для решения такой специфической проблемы, как очистка контуров охлаждения реакторов. В процессе работы реактора вследствие выщелачивания конструкционных материалов в водной среде в условиях жестких нейтронных полей образуется значительные количества (радиохимическая оценка) активного кобальта. Этот элемент имеет свойства образовывать компактные отложения вне зоны биологической защиты реактора. В результате этого для предотвращения дополнительного облучения обслуживающего персонала требуется увеличение зоны биологической защиты реактора до второго контура включительно. В свое время (в 80-х годах XX века) эта проблема была в целом удовлетворительно решена путем добавления в состав циркулирующей в контурах охлаждения воды соединений цинка. В присутствии цинка кобальт компактных отложений не образовывал, а оставался в охлаждающей жидкости в виде коллоидного раствора. Однако один из изотопов цинка (Zn^{64} , естественное содержание которого в природном цинке составляет около 50%) в результате облучения нейтронами создает еще более высокую активность, чем радиоизотопы кобальта. Поэтому в состав охлаждающей жидкости приходится добавлять не природный цинк, а так называемый «обедненный цинк», не содержащий изотопа Zn^{64} . Как все разделенные стабильные изотопы, это достаточно дорогой продукт. Помимо этого, добавление цинка создает, в свою очередь, ряд других проблем, связанных с очисткой контуров реактора. Учитывая относительно невысокий уровень ионизирующих излучений в первом контуре охлаждения вне активной зоны реактора и еще меньший — во втором, возможность применения биологических систем вообще и процессов низкотемпературной трансмутации в частности для очистки контуров от активного кобальта (или, по крайней мере, предотвращения образования его компактных отложений) выглядит многообещающей.

Рассмотрим более подробно возможные пути использования явления трансмутации радиоактивных изотопов в микробиологических системах.

В процессе ядерной реакции деления изотопов урана U^{235} (время жизни $7 \cdot 10^8$ лет) в атомных реакторах образуется большое количество радиоактивных изотопов (высокоактивных отходов) с большим и средним временем жизни:

Sr^{90} (время жизни 28,5 лет, относительная активность отходов по Pu^{239} сразу после извлечения из реактора $Q=230$,

Zr^{95} (время жизни 8,8 лет, $Q=5800$),

Nb^{95} (время жизни 35 лет, $Q=5700$),

Mo^{99} (время жизни 66 ч, $Q=6100$),

Ru^{103} (время жизни 39 сут, $Q=3800$),

Ru^{106} (время жизни 368 сут, $Q=860$),

Sb^{125} (время жизни 2,8 лет, $Q=150$),

I^{131} (время жизни 8 сут, $Q=3100$),

Cs^{134} (время жизни 2 года, $Q=170$),

Cs^{137} (время жизни 30,2 года, $Q=260$),

Ce^{144} (время жизни 285 сут, $Q=3900$)

Eu^{154} (время жизни 8,8 лет, $Q=14$),

Pu^{238} (время жизни 87,7 лет, $Q=1,3$),

Pu^{239} (время жизни 24 000 лет, $Q=1$),

Pu^{240} (время жизни 6550 лет, $Q=1,5$),

Pu^{241} (время жизни 14,4 года, $Q=180$),

Am^{241} (время жизни 432 года, $Q=0,16$)

Средние данные о накоплении основных долго- и среднеживущих осколков деления и трансурановых элементов в облученном топливе энергетических реакторов при среднем выгорании 11 МВт в сутки на 1 кг урана представлены в табл. 7.1.

Набор продуктов деления и их содержание приведены для реакторов на тепловых нейтронах при среднем выгорании топлива; для реакторов на быстрых нейтронах набор осколков деления несколько изменяется, смещаясь в сторону увеличения доли более долгоживущих радионуклидов и трансуранов. В табл. 7.1 приведены только основные осколочные элементы, составляющие более 99,9 % остаточной суммарной активности облученного топлива после 2–3 лет выдержки в бассейнах-охладителях, а так же указаны стереохимические аналоги радиоактивных ядер, которые в любой комбинации могут заменять их (или заменяются ими).

Один из самых эффективных методов утилизации радиоактивных отходов состоит в выделении из этих отходов неотработанного ядерного топлива для целей последующего использования.

Таблица 7.1

Радио- нуклид	Активность, Бк	Заряд и радиус иона	Стереохимические аналоги радионуклида
Sr ⁹⁰	2–4 • 10 ¹⁷	Z=+2, R=1,2±0,07 Å	Ca ²⁺ Eu ²⁺ Hg ²⁺ Sm ²⁺
Zr ⁹⁵	5–9 • 10 ¹⁸	Z=+4, R=0,8±0,03 Å	Hf ⁴⁺ La ⁴⁺ Nb ⁴⁺
Nb ⁹⁵	5–9 • 10 ¹⁸	Z=+4, R=0,72±0,05 Å Z=+5, R=0,68±0,02 Å	Mo ⁴⁺ Os ⁴⁺ Se ⁴⁺ Sn ⁴⁺ W ⁴⁺ Sb ⁵⁺ Bi ⁵⁺ Ta ⁵⁺
Mo ⁹⁹	5–9 • 10 ¹⁸	Z=+4, R=0,67±0,01 Å Z=+6, R=0,66±0,03 Å	Ir ⁴⁺ Nb ⁴⁺ Pd ⁴⁺ Pt ⁴⁺ W ⁶⁺
Ru ¹⁰³	4–8 • 10 ¹⁸	Z=+3, R=0,77 Å Z=+4, R=0,63±0,02 Å	Ir ³⁺ Mn ³⁺ Rh ³⁺ Ir ⁴⁺ Mo ⁴⁺ Nb ⁴⁺ Os ⁴⁺ Tl ⁴⁺ W ⁴⁺
Ru ¹⁰⁶	1–2 • 10 ¹⁸	Z=+3, R=0,77 Å Z=+4, R=0,63±0,02 Å	Ir ³⁺ Mn ³⁺ Rh ³⁺ Ir ⁴⁺ Mo ⁴⁺ Nb ⁴⁺ Os ⁴⁺ Tl ⁴⁺ W ⁴⁺
Sb ¹²⁵	1–3 • 10 ¹⁶	Z=+3, R=0,9 Å Z=+5, R=0,62 Å	Au ³⁺ In ³⁺ Lu ³⁺ Ta ⁵⁺
I ¹³¹	3–5 • 10 ¹⁸	Z=+5, R=0,94 Å Z=–1, R=2,2±0,02 Å	Pa ⁵⁺ U ⁵⁺ SH ^{–1} MSO ₄ ^{–1}
Cs ¹³⁴	1–4 • 10 ¹⁷	Z=+1, R=1,65±0,02 Å	Fr ¹⁺ K ¹⁺ NH ₄ ¹⁺ Rb ¹⁺
Cs ¹³⁷	3–5 • 10 ¹⁷	Z=+1, R=1,65±0,02 Å	Fr ¹⁺ K ¹⁺ NH ₄ ¹⁺ Rb ¹⁺
Ce ¹⁴⁴	3–6 • 10 ¹⁸	Z=+3, R=1,1±0,08 Å Z=+4, R=0,95±0,07 Å	Bi ³⁺ Gd ³⁺ La ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Pr ³⁺ Th ³⁺ La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺
Eu ¹⁵⁴	1–3 • 10 ¹⁶	Z=+2, R=1,19 Å Z=+3, R=1,07±0,1 Å	Hg ²⁺ Pb ²⁺ Yb ²⁺ Bi ³⁺ Ce ³⁺ Dy ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Sm ³⁺ Tb ³⁺ Th ³⁺ Tm ³⁺ Tl ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺
Pu ²³⁸	1–2 • 10 ¹⁵	Z=+3, R=1,02±0,01 Å Z=+4, R=0,88±0,02 Å Z=+5, R=0,87 Å	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺ La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺ Pa ⁵⁺
Pu ²³⁹	1–2 • 10 ¹⁵	Z=+3, R=1,02±0,01 Å Z=+4, R=0,88±0,02 Å Z=+5, R=0,87 Å	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺ La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺ La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺ Pa ⁵⁺

Pu ²⁴⁰	1–2 • 10 ¹⁵	Z=+3, R=1,02±0,01A	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺
		Z=+4, R=0,88±0,02A	La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺
		Z=+5, R=0,87A	Pa ⁵⁺
Pu ²⁴¹	1–2 • 10 ¹⁷	Z=+3, R=1,02±0,01A	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺
		Z=+4, R=0,88±0,02A	La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺
		Z=+5, R=0,87A	Pa ⁵⁺
Am ²⁴¹	1–2 • 10 ¹⁴	Z=+3, R=1,0±0,01A	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺
		Z=+4, R=0,87±0,02A	La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺
Am ²⁴⁴	2–4 • 10 ¹⁴	Z=+3, R=1,0±0,01A	Dy ³⁺ Ho ³⁺ Nd ³⁺ Pa ³⁺ Tb ³⁺ Tm ³⁺ U ³⁺ Y ³⁺ Yb ³⁺
		Z=+4, R=0,87±0,02A	La ⁴⁺ Pa ⁴⁺ Te ⁴⁺ Zr ⁴⁺

Основные проблемы при утилизации высокоактивных отходов и их последующем использовании связаны с наличием в них высокоактивных изотопов Zr⁹⁵, Nb⁹⁵, Ru¹⁰³, Ru¹⁰⁶ со сравнительно небольшим временем жизни (по сравнению к основными «топливным» изотопами U²³⁵, Pu²⁴⁰, Pu²³⁹, которые после процесса регенерации снова могут быть использованы в качестве тепловыделяющих элементов для АЭС). Эти изотопы составляют сравнительно небольшую массовую долю в отработанном топливе, но дают существенный вклад в его активность. Радиационное облучение, создаваемое ими, является фактором, препятствующим восстановлению отработанного топлива и выделение из него «нормальных топливных изотопов» (U²³⁵ и всех изотопов плутония), пригодных к повторному использованию в реакторах.

Процесс выделения определенных типов высокоактивных изотопов низкой концентрации из многокомпонентного состава радиоактивных отходов при росте как на предельно радиационно-устойчивых микробиологических культурах типа *Deinococcus Radiodurans* (способных к нормальному метаболизму при дозовой нагрузке более 1–10 Мрад), так и на культурах, способных выдержать дозовую нагрузку, хотя и существенно меньшую, но достигающую 30 Крад и более) основывается на том, что химические характеристики разных изотопов одного и того же элемента и их возможность участвовать в процессах жизнедеятельности практически неотличимы. Вследствие этого растущая культура способна использовать радиоактивные изотопы, имеющиеся в пита-

тельной среде, для формирования процесса своей жизнедеятельности (процесса метаболизма).

Более того, есть сведения о важном значении радиоактивных элементов в метаболизме живых организмов. Впервые такие предположения были высказаны еще Вернадским, а затем подтверждены современными исследованиями. Так, в работе (Соботович, 1994) продемонстрирована способность микромицетов использовать, казалось бы, такой инертный субстрат, как высокорadioактивный реакторный графит, в конструктивном метаболизме. Экспериментально доказано использование культурой *Thiobacillus ferrooxidans* урана в качестве донора электронов в энергетическом метаболизме (Soljanto, 1980). Это, кроме прочего, еще раз доказывает важность подбора индивидуального микроэлементного состава среды для процесса нормальной жизнедеятельности биологических систем.

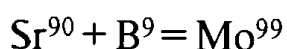
Рассмотрим возможные схемы извлечения высокоактивных примесей в процессе селективной трансмутации их в стабильные изотопы в растущих радиационно-устойчивых биологических культурах.

Поскольку все рассмотренные высокоактивные отходы являются средними (по массовому числу) изотопами, то процесс их трансмутации (синтез) может протекать только по такой схеме ядерных преобразований, для которой синтезируемый элемент, сразу вовлекаемый растущей культурой в процесс метаболизма, будет более тяжелым, чем утилизируемый изотоп.

На основе этих элементов можно предложить следующие реакции трансмутации радиоактивных отходов.

7.3.1. Реакции утилизации долгоживущего изотопа Sr^{90}

Обогащение стандартной питательной среды, необходимой для роста микробиологической культуры, борсодержащими солями приводит к возможности протекания энергвыгодной реакции трансмутации стронция, приводящей к образованию и усвоению растущей культурой нестабильного короткоживущего изотопа молибдена



После вовлечения в процесс метаболизма растущей микробиологической культуры этот изотоп распадается в течении 66 ч. В данной схеме утилизации радиационно-устойчивая культура выполняет фактически задачу ускоренной дезактивации конкретного долгоживущего изотопа путем преобразования его в короткоживущий изотоп.

7.3.2. Реакция утилизации радиоизотопа Zr^{95}

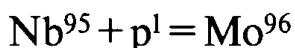
Эта реакция может протекать при присутствии гелия в питательной среде (например, при принудительном его продувании) и приводит к энергетически выгодной реакции:



с образованием нестабильного короткоживущего изотопа молибдена и его усвоения растущей культурой. Этот изотоп имеет время жизни 66 ч и после усвоения культурой распадается.

7.3.3. Реакция утилизации Nb^{95}

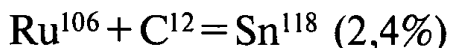
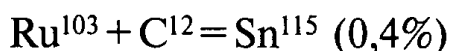
Для протекания реакции утилизации высокоактивного изотопа Nb^{95}



достаточно наличия в питательной среде (наряду с другими необходимыми компонентами) атомов водорода, что всегда имеет место, поскольку водород принадлежит к числу жизненно необходимых химических элементов. Результатом реакции является стабильный изотоп Mo^{96} , вовлекаемый в процесс метаболизма микробиологической культуры.

7.3.4. Реакции утилизации высокоактивных изотопов Ru^{103} и Ru^{106}

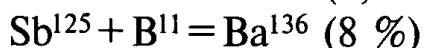
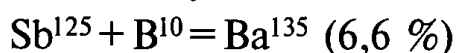
Реакции утилизации изотопов Ru^{103} и Ru^{106} могут протекать с образованием очень редких изотопов олова Sn^{115} и Sn^{117} (природное содержание которых 0,4 и 2,4%)



и требуют присутствия в составе питательной среды углерода, что всегда выполняется, поскольку углерод принадлежит к числу элементов, жизненно необходимых для роста культуры и, вследствие этого, обязательно входит в состав питательной среды. Схема утилизация этого радиоизотопа аналогична схеме утилизации Sr^{90} .

7.3.5. Реакции утилизации высокоактивных ядер Sb^{125}

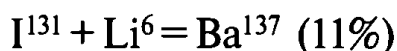
Реакции утилизации этого изотопа



могут протекать при росте радиоустойчивой культуры (например, культуры *Deinococcus Radiodurans*) и при наличии в питательной среде солей бора и отсутствия в ней солей бария.

7.3.6. Реакции утилизации высокоактивного изотопа I^{131}

Реакции для утилизации этого изотопа



могут протекать в радиоустойчивой культуре типа *Deinococcus Radiodurans* на основе питательной среды, содержащей, кроме обычных компонентов также подлежащий утилизации изотоп I^{131} и соль лития.

Кроме утилизации радиоизотопов, содержащихся в отработанном ядерном топливе, этот способ позволяет также производить утилизацию отработанных высокоактивных изотопных источников, используемых в метрологии и технологии радиационной стерилизации.

В промышленности (для целей метрологии, дефектоскопии, при геологических исследованиях) широко используются высокоактивные источника жесткого γ -излучения. После отработки регламентного срока (из-за снижения активности, из-за ухудшения характеристик систем их защиты) эти источники становятся непригодными для дальнейшего использования по прямому назначению. Из-за очень больших затрат эти источники также невыгодно реанимировать путем отделения изотопов от системы защиты и последующей радиохимической очистки и обогащения. Захоронение таких высокоактивных источников также связано с большими затратами и опасными экологическими последствиями. Такие же проблемы возникают после завершения регламентного срока высокоактивных источников, используемых в технологии стерилизации.

Рассмотрим некоторые реакции, позволяющие проводить утилизацию таких изотопов с помощью метода трансмутации в растущих микробиологических культурах с последующим преобразованием радиоактивных изотопов в стабильные (в том числе, редкие) изотопы.

Процесс трансмутации должен приводить к итоговому, более тяжелому, чем взаимодействующие изотопы, ядру. Вследствие этого максимальный атомный номер трансмутируемого изотопа определяется (при одновременном выполнении закона сохранения энергии, что выражается в форме увеличения дефекта масс взаимодействующих ядер) теми химическими элементами, которые необходимы для роста культуры и

имеют наибольший номер и атомную массу. Из числа таких элементов наиболее важными являются Cs и Rb (биохимические аналоги калия) и Sr, который по своим химическим характеристикам является аналогом кальция. Кроме того, при выборе наиболее перспективной реакции можно исходить из того пожелания, чтобы получающийся в реакции изотоп был стабильным или имел наименьшую цепочку последующих реакций, ведущих к итоговому стабильному ядру.

Исходя из этих требований, ниже приведен перечень наиболее важных высокоактивных изотопных источников, которые можно утилизировать с помощью явления трансмутации изотопов в микробиологических культурах:

Co ⁶⁰ (время жизни 5,2 года)	Ag ³⁹ (время жизни 270 лет)
Sc ⁴⁶ (время жизни 18,7 лет)	Kr ⁸⁵ (время жизни 10,7 лет)
Mn ⁵⁴ (время жизни 312 сут)	S ³⁵ (время жизни 87 сут)

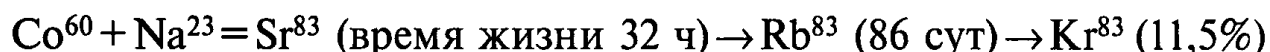
7.3.7. Реакции утилизации высокоактивного изотопа Co⁶⁰, используемого в метрологии и дефектоскопии

Время жизни Co⁶⁰ равно 5,2 года; он является основным источником жесткого γ -излучения, используемым в системах стерилизации, радиографии и метрологии. Реакции трансмутации этого изотопа, соответствующие его утилизации, могут протекать по разным схемам.

При наличии в питательной среде никеля, газообразного неона в зоне роста культуры и отсутствии солей калия энергвыгодная реакция синтеза может протекать по схемам:



При наличии в питательной среде натрия и отсутствии солей кальция энергвыгодная реакция синтеза может протекать по схеме



В этой реакции происходит синтез ядер стронция, которые по биохимическим характеристикам аналогичны кальцию и замещают его при росте культуры.

7.3.8. Утилизация высокоактивного изотопа Kr⁸⁵

Этот изотоп наиболее близок к рубидию и стронцию и может быть преобразован в растущей культуре в процессе следующих реакций.

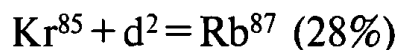
В случае, когда питательная среда не содержит кальций, реакция трансмутации может протекать, если присутствует в области роста гелий:



Если использовать питательную среду, обедненную по калию, то одна из возможных реакций трансмутации с участием протонов воды имеет вид:



Другой вариант этой реакции требует присутствия в составе питательной среды дейтерия или, что лучше, приготовления жидкой питательной среды на основе тяжелой воды:

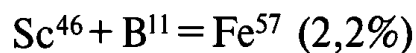
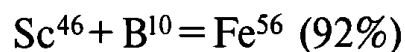


При этом реакция является безизлучательной и не сопровождается сопутствующей ионизирующей радиацией.

7.3.9. Утилизация высокоактивного изотопа Sc^{46}

Этот изотоп имеет сравнительно небольшой заряд и массовое число, поэтому он может быть трансмутирован с использованием нескольких альтернативных реакций.

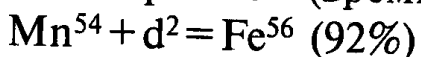
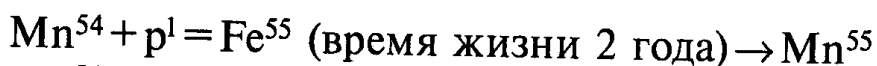
В случае, когда питательная среда не содержит железа, реакции трансмутации могут протекать в присутствии солей бора, который в природном виде состоит из двух изотопов B^{10} и B^{11} :



Вторая из этих реакций очень важна, поскольку в результате ее протекания, кроме решения основной задачи утилизации высокоактивного изотопа Sc^{46} , образуется редкий мессбауэровский изотоп Fe^{57} , очень широко используемый во многих отраслях науки и технологии.

7.3.10. Утилизация высокоактивного изотопа Mn^{54}

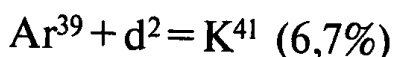
Mn^{54} — ближайший сосед железа, которое входит в число жизненно необходимых элементов и поэтому наиболее эффективно может быть преобразован в реакциях:



в питательной среде на легкой или тяжелой воде, дефицитной по железу.

7.3.11. Утилизация высокоактивного изотопа Ar^{39}

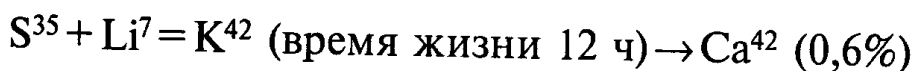
Наиболее эффективна реакция утилизации этого изотопа в реакции трансмутации:



в жидкой питательной среде на основе тяжелой воды, дефицитной по калию. Результатом этой реакции является редкий изотоп K^{41} , природное содержание которого в природном калии мало и равно 6,7%.

7.3.12. Утилизация высокоактивного изотопа S^{35}

Реакция утилизации



может быть осуществлена в питательной среде, обедненной по калию, но с добавлением солей лития. Результатом этой реакции является очень редкий стабильный изотоп Ca^{42} .

В дополнение к рассмотренным процессам утилизации следует отметить еще одно обстоятельство.

В ряде проведенных экспериментов по изучению явления преобразования изотопов в растущих микробиологических культурах нами было обнаружено, что введение в питательную среду с растущей биологической культурой одного из катионов Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , Tl^+ приводит к значительному ускорению (примерно в 1,8–2 раза) реакции трансмутации других элементов и изотопов, не связанных схемой ядерных реакций с этими элементами. Этот результат был отмечен в гл. 4. При нынешнем состоянии наших знаний невозможно дать исчерпывающее объяснение наблюдаемого феномена. Предположительно, перечисленные одновалентные катионы оказывают каталитическое действие наподобие действия ионизирующей радиации («волновой катализ»). Очевидно, что этот эффект может быть также использован для оптимизации процесса утилизации радиоактивных изотопов.

7.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше примеры показывают, что эффект низкотемпературной трансмутации изотопов может быть использован при решении очень широкого круга задач — многие вопросы жизнеобеспечения и формирование нового взгляда на патогенез человека, вплоть до проблемы утилизации отработанного ядерного топлива.

Последовательное применение самой идеологии трансмутации изотопов и химических элементов в живых организмах может привести к пересмотру большого круга задач функционирования живых организмов (в том числе в экстремальных условиях отсутствия в окружающей среде ряда необходимых макро- и микроэлементов). Возможно, что именно при таком рассмотрении станут понятны некоторые особенности гомеопатии и ее необъяснимая эффективность. По-другому могут быть рассмотрены особенности возникновения и патологии многих возрастных и профессиональных заболеваний, причина возникновения которых ранее связывалась с функциональными нарушениями (например, с деятельностью нервной системы), а на самом деле может быть также связана с понижением эффективности (или излишней эффективностью) процессов синтеза определенных изотопов и элементов, что сразу приводит к соответствующим патологиям.

Проблема взаимного распознавания биомолекул на основе учета их зарядовых и частотно-дисперсионных характеристик и непосредственно следующая из нее глобальная задача иммунного отклика и распознавания в онкологии также может найти свое решение при совместном рассмотрении с проблемой трансмутации изотопов и элементов. Это обусловлено тем, что параметры энергии взаимодействия, являющейся силовой основой проблемы распознавания, в пространственной области, где действуют механизмы распознавания, в решающей степени зависят от элементного состава поверхности взаимодействующих объектов. Подобный подход продемонстрировал свою эффективность при анализе и развитии неферментативных методов саморепарации радиационных и нерадиационных парных разрывов ДНК, основанных на дальнедействующем взаимном распознавании отдельных фрагментов биологических макромолекул (Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, Pinchuk, 1996–2001).

Очень важное значение имеет рассмотренная выше проблема синтеза редких и сверхредких изотопов, многие из которых пока не могут использоваться из-за очень ограниченного количества и крайне высокой стоимости. В связи с возможностью локального синтеза необходимых изотопов в необходимом месте по-другому могут решаться многие за-

дачи современной технологии (например, современной интегральной микроэлектроники и молекулярной нанотехнологии), что также может привести к неожиданным результатам.

Применение процессов низкотемпературной трансмутации изотопов в биологических системах принципиально позволяет устранить наиболее узкие места существующих технологий переработки отработанного ядерного топлива и по-новому решать вопросы, неразрешимые традиционными методами химических технологий. Это обеспечит возможность дальнейшего развития ядерной энергетики на основе как уже действующих АЭС в различных регионах мира, так и вновь создаваемых. При этом возможно существенно увеличить потенциальные запасы ядерного топлива вследствие вовлечения в оборот обогащенного урана, содержащегося в накопленных в настоящее время запасах экологически опасных непереработанных отходов ядерного производства.

ЛИТЕРАТУРА

- Aickin R. M., Dean A. C. R., Cheetham A. K. et al. Electron microscope studies on the uptake of lead by a *Citrobacter species* // *Microbios Lett.*, 1979. v. 9, N 33, pp. 7—15.
- Ainsworth M. A., Tompsett C. P., Dean A. C. R. Cobalt and nickel sensitivity and tolerance in *Klebsiella pneumoniae* // *Microbios.*, 1980, v. 27, N 109—110, pp. 175 — 184.
- Alvarez L. et al. // *Physical Review*, 1957, v. 105, p. 1127.
- Anderman G. // in Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, 1990, p. 295.
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 11—16
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 95—102.
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // *Fusion Technology*, 1992, v. 22, pp. 287—295.
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // *Proc. Japan Acad.*, 1994, v. 70, ser. B, pp. 106—111.
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // *Proc. Japan Acad.*, 1996, v. 72, ser. B, N 9, pp. 179—184.
- Arata Y., Zhang Y. Ch. // *Proc. Japan Acad.*, 1997, v. 73, ser. B, N 1, pp. 1—6.
- Azbel M. Ya. // *Solid State Commun.*, 1990, v. 76, p. 127.
- Babich H., Stotzky G. Abiotic factors affecting the toxicity of lead to fungi // *Appl. and Environ. Microbiol.*, 1979, v. 38, N 3, pp. 506—513.
- Babich H., Stotzky G. Compounds of water hardness, which reduce the toxicity of nickel to fungi // *Microbios. Lett.*, 1981, v. 18, N 69, pp. 17—24.
- Bahcall J. N., Ulrich R. K. // *Rev. Mod. Phys.*, 1988, v. 60, p. 297.
- Baldry M. G. C., Dean A. C. R. Copper accumulation by *Escherichia coli* strain FE 12/5.2. Uptake by resting organisms // *Microbios. Lett.*, 1980, v. 15, N 59/60, pp. 105—111.
- Baldo M., Pucci R., Bortignon P. F. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 347—350.
- Balian R., Blaizot J.-P., Bouche P. // *Journ. de Physique*, 1989, v. 50, pp. 2307—2311.
- Bannister J. V., Desideri A., Rotilio G. Replacement of Mn(III) with Cu(II) in *Bacillus stearothermophilus* superoxide dismutase. Similarity of the active site to the zinc site of copper/zinc superoxide dismutase // *FEBS Lett.*, 1985, v. 188, N 1, pp. 91—95.
- Barut A. O. // *Int. J. of Hydrogen Energy*, 1990, v. 15, p. 907.
- Bauminger E. R., Cohen S. G., De Kanter F. Iron storage in *Mycoplasma capricolum* // *J. Bacteriol.*, 1980, v. 141, N 1, pp. 378—381.
- Baxi M. D., Modi V. V. Studies on some factors affecting molybdenum transport in cowpea *Rhizobium* // *Indian. J. Exp. Biol.*, 1988, v. 26, N 7, pp 543—545.
- Becker E. W. // *Naturwissenschaften*, 1989, v. 76, p. 214.
- Beveridge T. J. Chemical modification of the bacterial wall to determine sites of metal deposition // *Electron Microsc. «9th Int. Congr. Electron Microsc.»* (Toronto, 1978) —Toronto, 1978, v. 2, pp. 350—351.

- Beveridge T. J., Forsberg C. W., Doyle R. J. Major sites of metal binding in *Bacillus licheniformis* walls // *J. Bacteriol.*, 1982, v. 150, N 3, pp. 1438—1448.
- Bhattacharjee J. K., Satpathy L. and Waghmare Y. R., *Pramana* // *J. Phys.*, 1989, v. 32, N 6, pp. L841—L844.
- Bockris J. O'M., Lin G. H., Packham N. J. C. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 11—31.
- Borst-Pauwels G.W.F.H., Boxman A.W., Theuvenet A.P.R. // *Biochem. et biophys. acta: Biomembranes*, 1986, v. 861—(M-142), N 3, pp. 413—419.
- Bossemeyer D., Schlösser A., Bakker E. P. Specific cesium transport by the *Escherichia coli* Kup (formerly TkKD) potassium — uptake system // *Forum Mikrobiol.*, 1989, N 12, p. 48.
- Bostian K.A., Betts G.F., Man W.K., Hughes M.N. Multiple binding of thallium and rubidium to potassium-activated yeast aldehyde dehydrogenase. Influences on tertiary structure, stability and catalytic activity // *Biochem. J.*, 1982, v. 207, N 1, pp 73— 80.
- Bowen H. J. M. Trace elements in biochemistry. — London; New York: Acad. press. 1966, p. 241.
- Brahmaprakash G. P., Devasia P., Jagadish K. S. Development of *Thiobacillus ferrooxidans* ATCC 19859 strains tolerant to copper and zinc // *Bull. Mater. Sci.*, 1988, v. 10, N 5, pp. 461—465.
- Bressani T., Del Giudice E., Preparata G. // *Nuovo Cimento Soc. Ital. Fis. A*, 1989, v. 101, N 5, pp. 845—849.
- Brown R. E., Jarne N. // *Phys. Rev. C*, 1990, v. 41, N 4, pp. 1391—1400.
- Buijs K., Choppin G. R. // *J. Chem. Phys.*, 1963, v. 39, N 8, p. 2035.
- Burke B. E., Pfister R. M. Cadmium transport by a Cd²⁺-sensitive and Cd²⁺-resistant strain of *Bacillus subtilis* // *Can. J. Microbiol.*, 1986, v. 32, N 7, pp. 539—542.
- Bush R. T. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 431—441.
- Bush R. T. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, p. 313.
- Bussard R.W. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 231—236.
- Callander I. J., Barford J. P. Precipitation, chelation, and the availability of metals as nutrients in anaerobic digestion. 1. Methodology // *Biotechnol. and Bioeng.*, 1983, v. 25, N 8, pp. 1947—1957.
- Callander I. J., Barford J. P. Precipitation, chelation, and the availability of metals as nutrients in anaerobic digestion. 2. Applications // *Biotechnol. and Bioeng.*, 1983, v. 25, N 8, pp. 1959—1972.
- Cassandro M., Galvanoffi G., Jona-Lasserino G., preprint N. 672, Department of Physics, University of Rome, 1989.
- Cassity T. R., Kolodziej B. J. Role of the capsule produced by *Bacillus megaterium* ATCC 19213 in the accumulation of metallic cations // *Microbios.*, 1984, v. 41, N 160, pp. 117—125.
- Cerofolini G. F., Re N. // A.I.P. Conference Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 668.
- Chatterjee L. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 683—685.

- Chatterjee L. // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, N 3, pp. 358—360.
- Chechin V. A., Tsarev V. A., Rabinowitz M. and Kim Y. E. // *Int. J. Theor. Phys.*, 1994, v. 33, N 3, pp. 617—670.
- Chechin V. A., Tsarev V. A. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 469—474.
- Christensen O. B., Ditlevsen P. D., Jacobsen K. W. et al. // *Phys. Rev. B*, 1989, v.40, N 3, pp. 1993—1996.
- Christos G. A. // Univ. of Western Australia preprint, 1989.
- Chubb S. R., Chubb T. A. // *Fusion Technology*, 1990, v. 17, p. 710.
- Chubb S. R., Chubb T. A. // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, pp. 93—99.
- Chubb S. R., Chubb T. A. // *Fusion Technology*, 1993, v. 24, pp. 403—416.
- Close F., Too Hot to Handle: The Race for Cold Fusion, W.H. Allen Publ., London, 1990.
- Cohen J. S., Davies J. D. // *Nature*, 1989, v. 342, pp. 487—488.
- Crawford O. H. // *Fusion Technology*, 1992, v. 21, N 2, pp. 161—162.
- Danos M., Belyaev V. B. // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, p. 354.
- Danos M. // *Fusion Technology*, 1990, v. 17, p. 484.
- Diels L., Mergeay M., Remacle J. et al. Possibilities of *Alcaligenes eutrophus* CH34 highly resistant to heavy metals in biotechnology // Proc. 1th. Eur. Congr. Biotechnol. (Amsterdam, June 14—19, 1987). —Amsterdam etc., 1987, pp. 383—386.
- Dienes J. K. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 543—546.
- Diermayr P., Kroll S., Klostermeyer H. Influence of EDTA and metal ions on a metalloproteinase from *Pseudomonas fluorescens* biotype I // *Biol. Chem. Hoppe-Seyler*, 1987, v. 368, N 1, pp. 57—61.
- Dou D., Inagaki K., Sugio T. et al. // Shigen-to-Sozai -J. Mining and Mater. Process. Inst. Jap., 1989, v.105, N 7, pp. 559 (49)—563 (53).
- Drapeau A. J., Laurence R. A., Harbec P. S. et al. Bio-accumulation de metaux lourds chez certains microorganismes // *Sci. Et techn.*, 1983, v. 16, N 4, pp. 359—363.
- Dufour J. J., Foos J. H., Dufour X. J. C., in Proceedings of ICCF-7, Vancouver, 1998, pp. 113—118.
- Eastman D. E., Cashion J. K., Switendick A. C. // *Phys. Rev. Lett.*, 1971, v. 27, N 1, pp. 35—38.
- Errata // *J. Electroanalyt. Chem.*, 1989, v. 263, p. 187.
- Fedorovich G. V. // *Phys. Scripta*, 1991, v. 44, p. 555.
- Fedorovich G. V. // *Phys. Lett. A*, 1992, v. 164, p. 149.
- Fedorovich G. V. // *Fusion Technology*, 1993, v. 23, N 4, p. 442.
- Fedorovich G. V. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, N 1, pp. 120—123.
- Feng S. // *Solid State Communications*, 1989, v. 72, N 2, pp. 205—209.
- Fisher J. C. // *Fusion Technology*, 1992, v. 22, N 4, pp. 511—517.
- Fleischmann M., Pons S. // *Phys. Lett. A*, 1993, v. 176, p. 118.

- Fleischmann M., Pons S. // J. Electroanalyt. Chem.*, 1989, v. 261, pp. 301—308.
- Frank F. C. // Nature*, 1947, v. 160, p. 525.
- Frank H. S. // Proc. Roy. Soc. A*, 1958, v. 247, N 1251, p. 481.
- Frank H. S., Wen W. Y. // Disc. Faraday Soc.*, 1957, v. 24, p. 133.
- Frodl P., Rossler O. E., Hoffmann M., Wahl F. // Z. Naturforschung*, 1990, v. 45a, pp. 757—758.
- Fujita S. // Phys. Stat. Sol. (b)*, 1989, v. 156, pp. K17-K21.
- Fukui M., Takii S.* Reduction of tetrazolium salts by sulfate-reducing bacteria // *FEMS Microbiol. Lett.*, 1989, v. 62, N 1, pp. 13—19.
- Gac K. et al.* Preprint Kaliski Inst. of Plasma Physics. — Warsaw, 1989.
- Gadd G. M., Mowll J. L.* Cadmium and fungi // Heavy Metals Environ. Int. Conf. Heidelberg, Sept., 1983, Edinburgh, 1983, v. 1, pp. 326—329.
- Glombitza F., Iske U., Richter K. // Mikroben als Silberwascher // Spectrum.*, 1988, v. 19, N 12, pp. 10—11.
- Goldanskii V. I., Dalidchik F. I. // Nature*, 1989, v. 342, p. 231.
- Goldanskii V. I., Dalidchik F. I. // Phys. Lett. B*, 1990, v. 234, pp. 465—468.
- González-Martin A., Bhardwaj R. C., Bockris J. O'M. // J. Applied. Electrochemistry*, 1993, v. 23, N 6, p. 531.
- Greenland P. T. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1990, v. 23, pp. 1679—1690.
- Gryzinski M. // A.I.P. Conf. Proceedings (Provo, Utah)*, 1990, v. 228, p. 717.
- Hagelstein P. L. // A.I.P. Conf. Proceedings (Provo, Utah)*, 1990, v. 228, p. 734.
- Hagelstein P. L. // Italian Phys. Society Conf. Proceedings*, 1991, v. 33, p. 205.
- Hagelstein P. L. // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan*, 1992, p. 297.
- Hagelstein P. L. // Fusion Technology*, 1993, v. 23, p. 353.
- Hagelstein P. L. // Proceedings of ICCF-7, Vancouver, Canada*, 1998, pp. 140—146.
- Hagelstein P. L. // Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 461—473.
- Harrison E. R. // Proc. Phys. Soc.*, 1964, v. 84, N 2, p. 213—229.
- Hora H., Cicchitelli L., Miley G. H. et al. // Nuovo Cimento D*, 1990, v. 12, N 3, p. 393.
- Hora H., Kelly J. C., Patel J. U. et al. // Phys. Lett. A*, 1993, v. 175, N 2, p. 138.
- Hora H., Miley G. H., Kelly J. C., Narne Y. // Proceedings of ICCF-7, Vancouver*, 1998, pp. 147—151.
- Huizenga J. R.* Cold Fusion: the scientific fiasco of the century, 1993, New York: Oxford University Press.
- Ichimaru S., Nakano A., Ogata Sh. et al. // J. Phys. Soc. Jpn.*, 1990, v. 59, N 4, pp. 1333—1340.
- Ichimaru S., Ogata Sh., Nakano A. // J. Phys. Soc. Jpn.*, 1990, v. 59, N 11, pp. 3904—3915.
- Ichimaru S. // Rev. of Modern Physics*, 1993, v. 65, N 2, pp. 255—299.

Ichimaru S. // Physics of plasmas, 1999, v. 6, N 7, pp. 2649—2671.

Iske U. Möglichkeiten Biotechnologischer Wirkprinzipien zur Werstofffruchgewinnung und Umweltentlastung // Leder, Schuhe, Lederwaren, 1989, v. 24, N 1, pp. 27—31.

Iwamura Y. et al. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 141—146.

Jack T. R., Mistry G. Accumulation of manganese by log phase cells of *Bacillus brevis* // *Microbios Lett.*, 1979, v. 11, pp. 19—25.

Jändel M. // *Fusion Technology*, 1990, v. 17, pp. 493—499.

Jonas R. B. Acute copper and cupric ion toxicity in an estuarine microbial community // *Appl. and Environ. Microbiol.*, 1989, v. 55, N 1, pp. 43—49.

Jones H. E., Trudinger P. A., Chambers L. A. et al. Metal accumulation by bacteria with particular reference to dissimilatory sulphate-reducing bacteria // *Z. allg. Mikrobiol.*, 1976, v. 16, N 6, pp. 425—435.

Jones S. E., Palmer E. P., Czirr J. B. et al. // *Nature*, 1989, v. 338, pp. 737—740.

Jorne J. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 519—522.

Joyce C. // *NewScientist*, 1989, N 1671, p. 34.

Julien J. // *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon*, 2a Serie Zoologie fasc. 13—1959.

Karabut A. B., Kuchеров Ya. R., Savvatimova I. B. // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, pp. 165—168.

Karabut A. B., Kuchеров Ya. R., Savvatimova I. B. // *Phys. Lett. A*, 1992, v. 170, p. 265.

Kasan H. C. Detection of zinc in bacteria by light microscopy // *Microbios. Lett.*, 1988, v. 37, N 147/148, pp. 137—140.

Kenny J. P. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 547—551.

Kervran C. L. Transmutations Biologiques: Métabolismes Aberrants de l'Azote, le Potassium et le Magnésium, Librairie Maloine S.A., Paris, 1963.

Kervran C. L. *A la Découverte des Transmutations Biologiques*, Librairie Maloine S.A., Paris, 1966.

Kervran C. L. Preuves Relatives à l'Existence de Transmutations Biologiques, Librairie Maloine S.A., Paris, 1968.

Kervran C. L. Biological Transmutations, Happiness Press, USA, Magalia, California, 1998.

Kihn J. C., Dassargues Ch. M., Mestdagh M. M. Preliminary ESR study of Mn(II) retention by the yeast *Saccharomyces* // *Can. J. Microbiol.*, 1988, v. 34, N 11, pp. 1230—1234.

Kim Y. E., Zubarev A. L. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 375—384.

Kim Y. E. // *Fusion Technology*, 1990, v. 17, p. 507.

Kim Y. E. // Proceedings of IEEE 13 Symp. on Fusion Eng., Knoxville, TN, USA, 1989, v. 1, pp. 116—119.

Kim Y. E., Yoon J. H., Zubarev A. L., Rabinowitz M. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 408—413.

- Kim Y. E., Zubarev A. L. // *Mod. Phys. Lett. B*, 1993, v. 7, N 24–25, p. 1627.
- Kim Y. E. // A.I.P. Conference Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 807.
- Kim Y. E. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 558–566.
- Kim Y. E., Rice R. A., Chulick G. S. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 174–177.
- Kim Y. E., Zubarev A. L. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 475–477.
- Kinoshita S., Kakizono T., Kadota K. et al. Purification of two alcohol dehydrogenases from *Zymomonas mobilis* and their properties // *Appl. Microbiol. and Biotechnol.*, 1985, v. 22, N 4, pp. 249–254.
- Komaki H. Augmentât, du potass. en milieu sodique par des micro-organ., Rev. Pathol. Comparée, Paris, avril 1967.
- Komaki H. // *Frontiers of Cold Fusion*, Proc. Third International Conference on Cold Fusion, 1992, pp. 555–558.
- Komaki H. Sur la formation de sels de potassium par les levures et moisissures, Rev. de Pathol. Comparée, Paris, sept. 1965.
- Komarov V. V., Melsheimer O., Popova A. M. // *Z. Naturforschung*, 1990, v. 45a, N 2, pp. 759–761.
- Koonin S. E., Nauenberg M. // *Nature*, 1989, v. 339, pp. 690–691.
- Kozima H. // *Nuovo Cimento*, 1994, v. 107 A, N 9, pp. 1781–1783.
- Kropf D. L., Harold F. Selective transport of nutrients via the rhizoids of the water mold *Blastocladiella emersonii* // *J. Bacteriol.*, 1982, v. 151, N 1, pp. 429–437.
- Kühne R. W. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 198–202.
- Kurek E. Effect of bacterial biomass on cadmium concentration in liquid medium and its toxicity towards bacteria // *Zbl. Microbiol.*, 1989, v. 144, N 1, pp. 47–52.
- Laddaga R. A., Bessen R., Silver S. Cadmium-resistant mutant of *Bacillus subtilis* 168 with reduced cadmium transport // *J. Bacteriol.*, 1985, v. 162, N 3, pp. 1106–1110.
- Laddaga R. A., Silver S. Cadmium uptake in *Escherichia coli* K-12 // *J. Bacteriol.*, 1985, v. 162, N 3, pp. 1100–1105.
- Laube V. M., McKenzie C. N., Kushner D. J. Strategies of response to copper, cadmium, and lead by a blue-green and a green alga // *Can. J. Microbiol.*, 1980, v. 26, N 11, pp. 1300–1311.
- Leggett A. J., Baym G. // *Phys. Rev. Lett.*, 1989, v. 63, N 2, p. 191.
- Leggett A. J., Baym G. // *Nature*, 1989b, v. 340, pp. 45–46.
- Levi B. // *Phys. Today*, 1989, v. 42, N 6, p. 19.
- Li X. Z. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 480–485.
- Lieberman E., Reddy P., Gazdar C., Peterkofsky A. The *Escherichia coli* adenylate cyclase complex. Stimulation by potassium and phosphate // *J. Biol. Chem.*, 1985, v. 260, N 7, pp. 4075–4081.
- Lin G. H., Kainthla R. C., Packham N. J. C. et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*, 1990, v. 15, N 8, pp. 537–550.

- Lin G. H., Kainthla R. C., Packham N. J. C., Bockris J. O'M. // *J. Electroanal. Chem.*, 1990, v. 280, N 1, pp. 207—211.
- Liu F. S. // *Mod. Phys. Lett. B*, 1996, v. 10, N 23, pp. 1129—1132.
- Liu F., Rao B. K., Khanna S. N., Jena P. // *Solid State Communications*, 1989, v. 72, N 9, pp. 891 — 894.
- Lundie L.L. (Jr), Yang H., Heinonen J. K. et al. Energy-dependent, high-affinity transport of nickel by the acetogen *Clostridium thermoaceticum* // *J. Bacteriol.*, 1988, v. 170, N 12, pp. 5705—5708.
- Macaskie L. E., Dean A. C. R., Cheetham A. K. Cadmium accumulation by a *Citrobacter* sp.: the chemical nature of the accumulated metal precipitate and its location on the bacterial cells // *J. Gen. Microbiol.*, 1987, v. 133, N 3, pp. 539—544.
- Magos L., Tuffery A. A., Clarkson T. W. Volatilization of Mercury by bacteria // *British Journal of Industrial Medicine*, October 1964, pp. 294—298.
- Maly J. A., Vávra J. // *Fusion Technology*, 1993, v. 24, p. 307.
- Markwell S. P., Anderson R. L. Pathway of galactitol catabolism in *Klebsiella pneumoniae*: oxidation of L-galactitol-1-phosphate by a NAD-specific dehydrogenase // *Arch. Biochem. and Biophys.*, 1981, v. 209, N 2, pp. 592—597.
- Matsumoto T. // *Fusion Technology*, 1989, v. 16, pp. 532—534.
- Matsumoto T. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 647—651.
- Matsumoto T. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 2125—2130.
- Mayer F. J., Reitz J. R. // *Fusion Technology*, 1991a, v. 19, pp. 552—557.
- Mayer F. J., Reitz J. R. // *Fusion Technology*, 1991b, v. 20, pp. 367—372.
- McCready R. G. L., Din G. A., Krouse H. R. The effect of pantothenate on sulfate metabolism and sulfur isotope fractionation by *Saccharomyces cerevisiae* // *Can. J. Microbiol.*, 1979, v. 25, N 10, pp. 1139—1144.
- McKubre M. et al. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 3—10.
- McKubre M., Bush B., Crouch-Baker S. et al. // Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994a, p. 5.
- McKubre M., Crouch-Baker S., Hauser A. K. et al. // in Proceedings of ICCF-5, Monte-Carlo, Monaco, 1995, p. 17.
- McKubre M., Crouch-Baker S., Riley A. M. et al. // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, "Frontiers of Cold Fusion", (H. Ikegami, ed.), p. 5.
- McKubre M., Crouch-Baker S., Rocha-Filho R. C. et al. // *J. Electroanal. Chem.*, 1994 b, v. 368, p. 55.
- McKubre M., Crouch-Baker S., Tanzella F. // 3-я Российская конф. по холодному синтезу и трансмутации ядер, Сочи, 1995, М.; 1996. С. 123—147.
- McKubre M., Rocha-Filho R., Smedley S. I. et al. // Proceedings of Second Annual Conference on Cold Fusion, Como, Italy, 1991, "The Science of Cold Fusion", v. 33, (T. Bressani, E. Del Giudice, G. Preparata, eds), p. 419.

- McKubre M. C. H., Rocha-Filho R. C., Smedley S. I. et al. // Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, 1990, p. 20.
- McNally J. R. // *Fusion Technology*, 1989, v. 16, pp. 237—239.
- Miles M. H. et al. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 105—119.
- Miles M. H., Bush B. F., Johnson K. B. // *Infinite Energy*, 1997, v. 15—16, pp. 35—59.
- Miles M. H., Bush B. F., Lagowski J. J. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 478—486.
- Miles M. H., Bush B. F., Stilwell D. E. // *J. Phys. Chem.*, 1994, v. 98, pp. 1948—1952.
- Miles M. H., Bush B. F. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 156—159.
- Miles M. H., Hollins R. A., Bush B. F., Lagowski J. J. // *J. Electroanal. Chem.*, 1993, v. 346, pp. 99—117.
- Miles M. H., Park K. H., Stilwell D. E. // *J. Electroanal. Chem.*, 1990, v. 296, pp. 241—254.
- Mills R. L., Kneizys S. P. // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, p. 65.
- Mills R. L., Farrell J. J. *The Grand Unified Theory* (Science press, Ephrata, Pennsylvania, USA), 1990.
- Mintmire J. W., Dunlap B. I., Brenner D. W. et al. // *Phys. Lett. A*, 1989, v. 138, pp. 51—54.
- Morrison D. R. O. // *Phys. Lett. A*, 1994, v. 185, pp. 498—502.
- Morrison D. R. O. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 48—54.
- Naidu C. K., Ramachandra R. T. K. Protection of cadmium toxicity to *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* and *Aspergillus niger* // *Zbl. Mikrobiol.*, 1988, v. 143, N 5, pp. 383—387.
- Nedospasov A. V., Mudretskaya E. V. // *Fusion Technology*, 1997, v. 31, pp. 121—122.
- Némethy G., Scheraga H. A. // *J. Chem. Phys.*, 1962, v. 36, N 12, p. 3382.
- Nordlander P., Nørskov J. K., Besenbacher F., Myers S. M. // *Phys. Rev. B*, 1989, v. 40, N 3, pp. 1990—1992.
- Norris P. R., Kelly D. P. Accumulation of cadmium and cobalt by *Saccharomyces cerevisiae* // *J. Gen. Microbiol.*, 1977, v. 99, N 2, pp. 317—324.
- Ohtake H., Silver S. The mechanism for plasmid-determined chromate resistance in *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa* // Abstrs Annu. Meet. Amer. Soc. Microbiol, 1987, 87th Annu. Meet. (Atlanta, Ga, 1—6 March, 1987).—Washington D. C., 1987, p. 292.
- Oppenheimer R., Phillips M. // *Phys. Rev.*, 1935, v. 48, p. 500.
- Paneth F. // *Nature*, 1927, v. 119, p. 706.
- Paneth F., Peters K. // *Nature*, 1926, v. 118, p. 526.
- Paneth F., Peters K. // *Naturwissenschaften*, 1926, v. 14, p. 956.
- Pan-Hou Hidemitsu S., Imura N. Involvement of mercury methylation in microbial mercury detoxication // *Arch. Microbiol.*, 1982, v. 131, N 2, pp. 176—177.
- Paolo P. // *Nature*, 1989, v. 338, p. 711.

- Park M. H., Wong B. B., Lusk J. E. Mutants of *Escherichia coli* altered in transport of manganous ions // Abstrs. Annu. Meet. Amer. Soc. Microbiol. (Atlantic City, N. Y., 1976), —Washington D. C., 1976, p. 154.
- Patterson J. A., US Patent 5,318,675, June 7, 1994.
- Patterson J. A., US Patent 5,372,688, Dec. 13, 1994.
- Patterson J. A., US Patent 5,672,259, Sep. 30, 1997.
- Petrillo C., Sacchetti F. // *Europhys. Lett.*, 1989, v. 10, N 1, pp. 15—18.
- Pinchuk A. O., Vysotskii V. I., Zhmudskii A. A. The method of quick restoration of dielectric permeability spectra on the base of the analysis of their absorption spectra, *Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions*, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 403—404.
- Pinchuk A. O., Vysotskii V. I. Long-range intermolecular interaction between broken DNA fragments // *Physical Rev. E*, 2001, v. 63, N 3, pp. 31904—31910.
- Pons S., Fleischmann M. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, p. 87.
- Pool R. // *Science*, 1990, v. 250, N 4987, pp. 1507—1508.
- Preparata G. *QED Coherence in Matter*, (World Scientific Publ. Co., Singapore, New Jersey, London, Hong Kong), 1995.
- Preparata G. // *A.I.P. Conf. Proceedings* (Provo, Utah), 1990a, v. 228, p. 840.
- Preparata G. // *Fusion Technology*, 1991a, v. 20, p. 82.
- Preparata G. // *Proc. Cold Fusion Conf.*, Salt Lake City, Utah, 1990b, p. 91.
- Preparata G. // *Proceedings of ICCF-6*, 1996, p. 136.
- Preparata G. // *Italian Phys. Society Conf. Proceedings*, 1991b, v. 33, p. 453.
- Preparata G. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 397—407.
- Rabinowitz M., Kim Y. E., Chechin V. A., Tsarev V. A. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 3—12.
- Rabinowitz M. // *Modern Phys. Lett. B*, 1990, v. 4, N 10, p. 665.
- Rabinowitz M. // *Modern Phys. Lett. B*, 1990, v. 4, N 4, pp. 233—247.
- Rabinowitz M., Worledge D. H. // *Fusion Technology*, 1990, v. 17, pp. 344—349.
- Rafelski J., Sawicki M., Gajda M., Harley D. // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 136—142.
- Ragheb M., Miley G. H. // *Fusion Technology*, 1989, v. 16, pp. 243—247.
- Rambaut M. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 486—492.
- Rao K. R., Chaplot S. L. // *Fusion Technology*, 1996, v. 30, pp. 355—362.
- Reed R. H., Rowell P., Stewart W. D. P. Uptake of potassium and rubidium ions by the cyanobacterium *Anabaena variabilis* // *FEMS Microbiol. Lett.*, 1981, v. 11, N 4, pp. 233—236.
- Rodriguez-Navarro A., Ramos J. Dual system for potassium transport in *Saccharomyces cerevisiae* // *J. Bacteriol.*, 1984, v. 159, N 3, pp. 940—945.
- Rohde G. Die biologische Verwitterung // *Z. ges. Hyg.*, 1963, v. 9, N 2, pp. 94—99.

- Romodanov V. A. et al. // Proc. ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994, v. 3, p. 22-1.
- Russell J. // *Annals of Nuclear Energy*, 1990, v. 17, p. 545.
- Russell J. // *Annals of Nuclear Energy*, 1991a, v. 18, p. 75.
- Russell J. // *Annals of Nuclear Energy*, 1991b, v. 18, p. 305.
- Sakaguchi T., Sakaguchi S. Interactions between Cd and Zn uptaken into *Escherichia coli* // *Kitasato Arch. Exp. Med.*, 1981, v. 54, N 1/2, pp. 25—34.
- Sakaguchi T., Tsuji T., Nakajima A., Horikoshi T. Accumulation of cadmium by green microalgae // *Eur. J. Appl. Microbiol. and Biotechnol.*, 1979, v. 8, N 3, pp. 207—215.
- Samsonenko N. V. et al. // *Phys. Letters A*, 1996, v. 220, p. 297.
- Samsonenko N. V. et al. // *Phys. Letters A*, 1997, v. 229, p. 133.
- Sapogin L. G. // Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994, v. 4, p. 17-1.
- Sapogin L. G. // *Infinite Energy*, 1996, v. 1, N 5/6, p. 75.
- Savvatimova I. B., Karabut A. B., Kucherov Ya. R. // Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, Hawaii, 1993, p. 16-1.
- Savvatimova I. B. // Proc. ICCF-7, Vancouver, Canada, 1998, pp. 342—350.
- Schwinger J. // Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 1990a.
- Schwinger J. // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. xiii-xxi.
- Schwinger J. // *Zeitschrift für Naturforschung*, 1990c, v. 45a, p. 756.
- Schwinger J. // *Zeitschrift für Physik D*, 1990b, v. 15, pp. 221—225.
- Scott J. A., Sage G. K., Palmer S. J. Metal immobilization by microbial capsular coatings // *Biorecovery*, 1988, v. 1, N 1, pp. 51—58.
- Searle P. G. E., Hughes J. D. Effects of microbial population and culture phosphate composition on the activity of pyrophosphatases from soil microorganisms // *Soil Biol. And Biochem.*, 1977, v. 9, N 3, pp. 157 — 160.
- Seeliger D., Meister A. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 2114—2118.
- Segre S. E., Atzeni S., Briguglio S., Romanelli F. // *Europhys. Lett.*, 1990, v. 11, N 3, pp. 201—206.
- Senesi N., Sposito G., Martin J. P. Copper (II) and iron (III) complexation by humic acid-like polymers (melanins) from soil fungi // *Sci. total. Environ.*, 1987, v. 62, pp. 241—252.
- Shaw G. L., Shin M., Bland R. W. et al. // *Nuovo Cimento*, 1989, v. 102 A, N 5, pp. 1441—1447.
- Shihab-Eldin A. A., Rasmussen J. O., Justice M., Stoyer M. A., Preprint LBL-27086, University of California, California, USA, 1989.
- Shimamura I. // *Progress of Theoretical Physics*, 1989, v. 82, N 2, pp. 304—314.
- Shu Zhen, Davies G. J. // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1983, v. 78, N 2, pp. 595—605.

- Silver S.* Bacterial transformations of metals and resistance to heavy metals // *Changing Metal Cycles and Human Health. Rept. Dahlem Workshop* (Berlin, March, 20—25, 1983). — Berlin etc., 1984, pp. 199—223.
- Soljanto P., Tuovinen O. H.* A microcalorimetric study of U(IV)-oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* and ferric-iron // *Biogeochem. Ancient and Modern Environ.* — Berlin etc., 1980, pp. 469—475.
- Springborg M.* // *Europhys. Lett.*, 1990, v. 11, N 4, pp. 325—330.
- Srinivasan M.* // *Current Science*, 1991, v. 60, N 7, p. 417.
- Steinman H. M.* Bacteriocuprein superoxide dismutases in pseudomonads // *J. Bacteriol.*, 1985, v.162, N 3, pp. 1255—1260.
- Storms E.* // *Proceedings of ICCF-8, Lerici*, 2000, p. 55—61.
- Storms E.* // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, pp. 433—470.
- Storms E.* // *J. Sci. Expl.*, 1996, v. 10, pp. 185—216.
- Sun Z., Tománek D.* // *Phys. Rev. Lett.*, 1989, v. 63, pp. 59—61.
- Sutherland G. B. B. M., Tsuboi M.* // *Proc. Roy. Soc. A*, 1957, v. 239, p. 446.
- Swartz M. R.* // *Fusion Technology*, 1997, v. 31, pp. 228—236.
- Tabet E., Tenenbaum A.* // *Phys. Lett. A*, 1990, v. 144, N 6–7, pp. 301—305.
- Tabet E., Tenenbaum A.* // *Fusion Technology*, 1990, v. 18, pp. 143—146.
- Takahashi A.* // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, p. 380.
- Takahashi A.* // *Proceedings of ICCF-7, Vancouver, Canada*, 1998, pp. 378—382.
- Takahashi A.* // *J. of Nuclear Science and Technology*, 1989, v. 26, N 5, pp. 558—560.
- Takahashi A., Mega A., Takeuchi T. et al.* // *Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan*, 1992, “Frontiers of Cold Fusion”, (H. Ikegami, ed.), p. 79.
- Takeda T., Takizuka T.* // *J. Phys. Soc. Jpn*, 1989, v. 58, p. 3073.
- Taubes G.* *Bad Science: the short life and weird times of cold fusion.* (Random House) 1993.
- Taylor B. F., Oremland R. S.* Depletion of adenosine triphosphate in *Desulfovibrio* by oxyanions of group VI elements // *Curr. Microbiol.*, 1979, v. 3, N 2, pp. 101—103.
- Tezuka T., Tonomura K.* Purification and properties of an enzyme catalyzing the splitting of carbon-mercury linkages from mercury-resistant *Pseudomonas* K-62 strain. I. Splitting enzyme 1 // *J. Biochem.*, 1976, v. 80, N 1, pp. 79—87.
- Tsarev V. A., Worledge D. H.* // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, N 4, pp. 484—508.
- Tsuchiya K., Ohashi K., Fukuchi M.* // *Transactions of Fusion Technology*, 1994, v.26, p. 493.
- Turner L. et al.* // *Physics Today*, 1989, v. 42, N 9, p. 140.
- Vaidya S. N.* // *Fusion Technology*, 1991, v. 20, N 4, pp. 481—483.
- Van Brunt J., Caldwell J. H., Harold F. M.* Circulation of potassium across the plasma membrane of *Blastocladiella emersonii*: K⁺ channel // *J. Bacteriol.*, 1982, v.150, N 3, pp. 1449—1461.

Van Siclen C. DeW., Jones S. E. // J. Phys. G: Nucl. Phys, 1986, v.12, N 3, pp. 213—221.

Vaselli M., Harith M. A., Palleschi V. et al. // Nuovo Cimento, 1989, v. 11D, N 6, pp. 927—932.

Violante V., De Ninno A. // Fusion Technology, 1997, v. 31, pp. 219—227.

Vysotskii V. I., Kuzmin R. N. Theory, mechanisms and dynamics of nonbarrier nuclear catalysis in solids // *Preprint of Institute of theoretical Physics ITP-90—82P*, Kiev, 1990.

Vysotskii V. I., Pinchuk A. O. Analysis of long-range interaction of end-pairs of nucleotides in the region of DNA's double-strand breaks // *Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions*, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 405—406.

Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Modeling and time-dependent dynamics of processes of stimulated depolymerization, auto-repairing, degradation and radiation curing of DNA macromolecules and biopolymers at separated and combined actions of ionizing irradiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2001, v. 185, pp. 108—115.

Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. The time-dependent dynamics and modeling of processes of depolymerization and autorepairing of DNA macromolecules at separate and combined action of ionizing radiation // *Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions*, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 401—402.

Vysotskii V. I. Conditions and mechanism of nonbarrier double-particle fusion in potential pit in crystal // *Proceedings: Fourth Intern. Conference on Cold Fusion (Lahaine, Hawaii, December 1993)*, 1994, v. 4, pp. 20.2 — 20.5.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Effect of viscosity properties of intermolecular and intercellular medium on the stability of DNA against radiation // *Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment"*, May 1996, Stockholm, *Proceedings*, v. 2, pp. 478—482.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Experimental discovery of phenomenon of low-energy nuclear transmutation of isotopes ($Mn^{55} \rightarrow Fe^{57}$) in growing biological cultures // *Proceedings of Sixth Intern. Conf. on Cold Fusion*, v. 2, 1996, pp. 687—693.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Experimental observation and study of controlled transmutation of intermediate mass isotopes in growing biological cultures // *Proceedings of the 8th International Conference on Cold Fusion* (edited by F. Scaramuzzi), Lerici (La Spezia), Italy, 21—26 May, 2000, pp. 135—140.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Observation and mass-spectroscopy study of controlled transmutation of intermediate mass isotopes in growing biological cultures // *Infinite Energy*, March/April 2001, v. 6, N 36, pp. 64—68.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. The molecular mechanisms of autorepairing of double damages of DNA // *Radiation Biology. Radioecology*, 1997, v. 37, pp. 494—507 (In Russian).

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. The problem of radiation damage to DNA. What kinds of double radiation breaks in DNAs are irreversible (quantum-mechanical and electrodynamic approaches)? // Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment", May 1996, Stockholm, Proceedings, v.2, pp. 489—494.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. The problem of radiation damage to DNA. Methods for control of antagonism and radioprotective effect in combined action of hard and soft ionising radiation on DNA. // Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment", May 1996, Stockholm, Proceedings, v.2, pp. 483—488.

Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. Experimental discovery and investigation of the phenomenon of nuclear transmutation of isotopes in growing biological cultures // *Infinite Energy*, v. 2, N 10, 1996, pp. 63—66.

Vysotskii V. I., Kuzmin R. N. On possibility of non-barrier dd-fusion in volume of boiling D₂O during electrolysis // Proceedings: Fourth Intern. Conference on Cold Fusion (Lahaina, Hawaii, December 1993), 1994, v. 4, pp. 6.1 — 6.3.

Vysotskii V. I., Kuzmin R. N. The theory of nonthreshold cold fusion in solids // Int. Progress Review "Anomalous nuclear effects in deuterium/solid systems". Editor by S.E. Jones, F.Scaramuzzi, A.I.P. Conf. Proceed, 1991, v. 228, pp. 894—910, N.Y.

Vysotskii V. I., Pinchuk A. O. Peculiarities of long-range interaction between the nucleotides after DNA damage // *Bioelectrochemistry and bioenergetics*, 1999, v. 48, N 2, pp. 329—331.

Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I. The dynamics of radiation-stimulated hormesis and processes of DNA self-reparation at the combined action of ionizing irradiation on biological systems // *Nuclear and Radiation Safety*, 1999, v. 2, N 2, pp. 66—80 (In Russian) 1999, т.2, в.2, с. 66—80.

Waber J. T. // In *Cold Nuclear Fusion*, Proceedings of 4 Russian Conf. on Cold Fusion and Nuclear Transmutation, Sochi, 1996, Moscow, 1997, pp. 192—220.

Waber J.T., Cromer D. T. // *Journ. Chem. Phys.*, 1965, v. 42, N 12, pp. 4116—4123.

Wakatsuki T., Imahara H., Kitamura T., Tanaka H. On the absorbtion of copper into yeast cells // *Agr. And Biol. Chem.*, 1979, v. 43, N 8, pp. 1687—1692.

Weege K.-H., Thriene B. Mechanismen und Bedeutung der bakteriellen Schwermetallresistenz // Mengen- und Spurenelem.: Arbeitstag. Agrawiss. und Chem Ges. (Jena, 19—20 Dez., 1989).—Leipzig, 1989, pp. 94—101.

Weiss A., Schotell J., Silver S. Plasmid-determined heavy metal resistance in *Staphylococcus aureus* // Abstracts of Annual Meet. Amer. Soc. Microbiol. (Atlantic City, N.Y., 1976). — Washington D. C., 1976, p. 101.

Wilkins S., Gorisch H. Austausch von Calcium durch Cadmium, Strontium oder Mangan ber auf Quinoproteinglucosedehydrogenase // *Forum Microbiol.*, 1989, v. 12, N 1/2, p. 82.

Wood J. M., Wang H. K. Microbial resistance to heavy metals. Some microorganisms have developed «strategies» for combating effects of toxic inorganics, and several may prove useful for their removal from wastewater // *Environ. Sci. Technol.*, 1983, v. 17, N 12, pp. 582A—590A.

Yang J., Chen D., Zhou G. et al. // *Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 203—206.

Yang J. // *Acta Scientiarum Naturalium*, 1991, v. 14, p. 126.

Yasui K. // *Fusion Technology*, 1992, v. 22, pp. 400—406.

Zakowicz W. // *Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 170—173.

Zhang W. X. // *Fusion Technology*, 1992, v. 21, pp. 82—85.

Ali L., Sloan D. Activation of hypoxanthine /guanine phosphoribosyltransferase from yeast by divalent zinc and nickel ions // *J. Inorg. Biochem.*, 1986, v. 28, N 4, pp. 407—415.

Бажутов Ю. Н., Верешков Г. М. В сб. Холодный ядерный синтез, ЦНИИМАШ, 1992. С. 22—28.

Бажутов Ю. Н., Верешков Г. М. В сб. Холодный ядерный синтез. Материалы 1-й Российской конф. по холодному ядерному синтезу. — М., 1994. С. 23—37.

Басоло Ф., Пирсон Р. Механизмы неорганических реакций. — М.: Мир, 1971. 592 с.

Белов А. П., Давидова Е. Г. Внутриклеточное распределение кобальта в дрожжах *Candida maltosa* // *Микробиология* — 1985 — 54, № 6. — С. 970—973.

Бом Д. Квантовая теория. Ч. V, Гл. 21, пп. 36.

Вавилова Н. М. Гомеопатическая фармакодинамика. Ч. 1, Ростов-на-Дону, 1992.

Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. — М.: Наука, 1987. — 339 с.

Виноградов А. П. Труды биогеохимической лаборатории, изд. Академии Наук, М.-Л., 1935 (Vinogradov A. P. Travaux du laboratoire biogeochemique de L'Academie des sciences de L'URSS, 1935).

Высоцкий В. И., Корнилова А. А., Самойленко И. И. Обнаружение феномена низкоэнергетической ядерной трансмутации изотопов в биологической культуре и его исследование с помощью эффекта Мессбауэра // *Вестник новых медицинских технологий*. Т. 3, № 1, 1996. С. 28—32.

Высоцкий В. И., Воронцов В. И. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. Т. 66, № 5, 1974. С. 1528—1536.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. // Гамма-лазеры. Изд. МГУ, 1989.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. Механизм безбарьерного взаимодействия при ХЯС на основе явления неравновесного Ферми-конденсата для малочастичного ансамбля и импульсной двухдейтонной локализации в микрополостях оптимальной формы и размера // *Intern. Symposium «Cold fusion and advanced energy sources»*. Minsk, 1994 (a), pp. 288—295.

Высоцкий В. И., Корнилова А. А., Самойленко И. И. Способ получения стабильных изотопов за счет ядерной трансмутации типа низкотемпературного ядерного синтеза элементов в микробиологических культурах. Патент (Россия) № 2052223 от 18 января 1995.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. // *Письма в ЖТФ*, Т. 7, В. 16. 1981. С. 981—985.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. Температурно-временная динамика ХЯС в кристаллах на основ. квантового безбарьер. и микрокумулят. механизмов // В кн. «Холодный ядерный синтез». Изд. ЦНИИМАШ, М., 1992, С. 6—13.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. Условия реализации DD-ХЯС в объеме D_2O при кипении и электролизе // В кн.: Материалы 1 Российской конф. по холодному ядерному синтезу. Абрау-Дюрсо, сентябрь-октябрь 1994 (б). Изд. ВЕНТ, М., С. 58—60.

Высоцкий В. И., Кузьмин Р. Н. // *ЖТФ*, 1994. Т. 64, Вып. 7. С. 56—63.

Галимов Э. М. Природа биологического фракционирования изотопов. М.: Наука, 1981.

Голубничий П. И., Царев В. А., Чечин В. А. // *Препринт ФИАН СССР*, 1989. № 149.

Голубничий П. И., Кузьминов В. В., Мерзон Г. И. и др. // *Письма в ЖЭТФ*, 1991. Т. 53. Вып. 2. С. 115—118.

Голубничий П. И., Куракин В. А., Филоненко А. Д. и др. // *Доклады АН СССР*.

Горджян И. Х., Кац Л. Н. Локализация дегидрогеназной активности в клетках облигатно анаэробных бактерий // *Докл. АН СССР*. — 1970 — 195, № 4. — С. 969—971.

Давыдов А. С. Квантовая механика. — М.: Физматгиз, 1963. С. 447.

Давыдов А. С. // *Укр. физ. журн.*, 1989. Т. 34. № 9. С. 1295—1297.

Демиденко В. С., Симаков В. И. // *Известия ВУЗов. Физика*. 1993. № 10. С. 20—30.

Дерягин Б. В., Ключев В. А., Липсон А. Г., Топоров Ю. П. // *Коллоидный журнал*. 1986. Т. 48 (1). С. 12—14.

Зеленский В. Ф., Рыбалко В. Ф. // *Вопросы атомной науки и техники*. 1991. Т. 2. С. 46.

Зельдович Я. В., Герштейн С. С. // *Успехи физ. наук*. 1960. Т. 71. Вып. 4. С. 581—630.

Илялетдинов А. Н. Иммобилизация металлов микроорганизмами и продуктами их жизнедеятельности // I Всесоюз. конф. «Микробиология очистки воды»: Тез. докл. — Киев: Наук. думка, 1982. — С. 27—29.

- Истомин Ю. А., Калиев К. А.* // В сб. Холодный ядерный синтез. Материалы 2-й Российской конф. по холодному синтезу и трансмутации ядер, Сочи.
- Казачковский О. Д.* // *Атомная энергия*. 1996. Т. 81. Вып. 4. С. 309.
- Калинин Ф. Л., Лобов В. П., Жидков В. А.* // Справочник по биохимии. — Киев: Наук. думка, 1971. — 1013 с.
- Карабут А. Б., Кучеров Я. Р., Савватимова И. Б.* // В сб. Холодный ядерный синтез. Материалы 1-й Российской конф. по холодному ядерному синтезу, М., 1994. С. 124.
- Карабут А. Б., Кучеров Я. Р., Савватимова И. Б.* // *Письма в ЖТФ*. 1990. Т. 16. Вып. 12. С. 53—57.
- Карасевский А. И., Матюшов Д. В., Городынский А. В.* // *Укр. хим. журн.* 1989. Т. 55. N 210. С. 1036—1039.
- Каспарова С. Г., Давидова Е. Г.* Сорбция и транспорт ионов кобальта в клетки дрожжей // Всесоюз. конф.: Регуляция микробного метаболизма (Пушино, 12—14 июня 1989 г.). — Пушино, 1989. — С. 98.
- Киркинский В. А., Новиков Ю. А.* // Теоретическое моделирование холодного ядерного синтеза. Препринт. Новосибирск, 1998.
- Клюев В. А., Липсон А. Г., Топоров Ю. П., Дерягин Б. В.* // *Письма в ЖТФ*. 1986. Т. 12. Вып. 21. С. 1333—1337.
- Краснощеков Ю. И., Ларионов Л. В., Маковей В. А., Мурышев Е. Ю., Сыренков Г. И.* // *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 320. № 6. С. 1358—1360.
- Липсон А. Г., Саков Д. М., Саунин Е. И.* // *ЖЭТФ*. 1993. Т. 103. № 6. С. 2142—2153.
- Липсон А. Г., Саков Д. М.* В сб. Холодный ядерный синтез. Материалы 2-й Российской конф. по холодному синтезу и трансмутации ядер. Сочи, 1994 г., М., 1995. С. 193—199.
- Лурье Ю. Ю.* Справочник по аналитической химии. — М.: Химия, 1979. — 480 с.
- Мазитов Р. К.* // *Доклады АН СССР*. 1989. Т. 307. № 5. С. 1158—1160.
- Мойжес Б. Я.* // *Письма в ЖТФ*. 1991. Т. 17, Вып. 15. С. 15—17.
- Моррисон Д. Р.* // *Успехи физ. наук*. 1991. Т. 161. № 12. С. 129—140.
- Нефедов В. И.* // *Вестник АН СССР*. 1991. Т. 1. С. 49—60.
- Покропивный В. В., Огородников В. В.* // *Письма в ЖТФ*. 1990. Т. 16. Вып. 21. С. 31—34.
- Ромоданов В. А., Савин В. И., Шахурин М. В.* // *ЖТФ*. 1991. Т. 61. Вып. 5. С. 122—125.
- Савватимова И. Б., Карабут А. Б., Кучеров Я. Р.* Сб. Холодный ядерный синтез. Материалы I Российской конф. по холодному ядерному синтезу. Новороссийск. 1993. М., 1994. С. 132—147.

Сапогин Л. Г. // Сб. Холодный ядерный синтез и новые источники энергии. Минск, 1994. С. 132—143.

Сапогин Л. Г. // Сб. Холодный ядерный синтез. Материалы 4-й Российской конф. по холодному ядерному синтезу, 1996. М.: НИЦ Эрзион, 1997. С. 142—145.

Сахаров А. Д. // Отчет ФИАН СССР. 1948. 130 с.

Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н., Жданова Н. Н. и др. Мобилизация радиоуглерода реакторного графита в почвенных биоготехнических системах в зоне влияния ЧАЭС // Сб. тезисов «Чернобыль-92». — Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. «Итоги 8 лет работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС». — Зеленый мыс, 1994. — С. 68.

Сыроешкин А. В., Матвеева И. С., Плетенева Т. В. и др. Элементные профили металлов как векторная характеристика вида и физиологического состояния // 2002.

Таширев А. Б. Теоретические аспекты взаимодействия микроорганизмов с металлами. Восстановительная трансформация металлов // *Микробиол. журн.* — 1994 — 56. № 6. — С. 76—89.

Таширев А. Б. Теоретические аспекты взаимодействия микроорганизмов с металлами. Микробная аккумуляция металлов, обусловленная их стереохимической аналогией с макроэлементами // *Микробиол. журн.* — 1994 — 56. № 6. — С. 89—100.

Таширев А. Б. Взаимодействие микроорганизмов с металлами // *Микробиол. журн.* — 1995 — 57. № 2. — С. 95—104.

Тисенко Ю. А. // *Известия ВУЗов. Физика.* 1993. № 8. С. 66—76.

Федорович Г. В. // *ЖТФ.* 1993. Т. 63. Вып. 10. С. 64.

Фимин Н. Н. // *Письма в ЖТФ.* 1996. Т. 22. Вып. 5. С. 17—19.

Хьюз М. Неорганическая химия биологических процессов. М.: Мир, 1983. 414 с.

Царев В. А. // *Успехи физ. наук.* 1990. Т. 160. № 11. С. 1—53.

Царев В. А. // *Успехи физ. наук.* 1991. Т. 161. № 4. С. 152—177.

Царев В. А. // *Успехи физ. наук.* 1992. Т. 162. № 10. С. 63—91.

Ярославский М. А. // Доклад на X Всесоюзном юбилейном симпозиуме по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ростов-на-Дону, 1986.

Ярославский М. А. // *Доклады АН СССР.* 1989. Т. 307. № 2. С. 393—370.

Ярославский М. А. // *Доклады АН СССР.* 1989. Т. 307. № 3. С. 600—601.

Ярославский М. А. // *Доклады АН СССР.* 1989. Т. 308. № 1. С. 95—97.