

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.501

Совместная трансмутация стабильных изотопов Cs и Sr в микробиологических системах и перспективы ускоренной деактивации жидких радиоактивных отходов

¹Корнилова А.А., ²Высоцкий В.И., ¹Гайдамака С.Н., ¹Гладченко М.А.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, <http://msu.ru/>
Москва 119991, Российская Федерация

²Киевский национальный университет им. Т.Шевченко, <http://www.univ.kiev.ua/>
Киев 01033, Украина

E-mail: prfnart@mail.ru, vivyotskii@gmail.com, s.gaidamaka@gmail.com, gladmarina@yandex.ru

Поступила 04.12.2021, рецензирована 10.12.2021, принята 14.12.2021

Аннотация. В ходе исследований было установлено, что в экспериментальных и контрольном биореакторах, которые в начале экспериментов содержали только цезий и стронций, к концу экспериментов были обнаружены иттрий и барий. Эти изотопы образуются в результате низкоэнергетических ядерных реакций с участием протонов. Кроме того, в экспериментальных биореакторах с оптимальным составом зафиксировано двух-трехкратное увеличение концентрации иттрия по сравнению с контрольными неоптимальными экспериментами. Зафиксировано накопление стронция и цезия в биомассе, что объясняется процессом биосорбции. Известно, что биосорбция является первым шагом для ядерного превращения (биотрансмутации). При этом одним из главных условий ядерного превращения элементов в биомассе является её максимально эффективный рост. Неожиданным фактом, обнаруженным в процессе эксперимента, является то, что в контрольном биореакторе, куда до начала эксперимента не добавлялась биомасса, а только деионизованная вода, глюкоза, а также исходные соли стабильного цезия и стронция, были обнаружены иттрий и барий. Важно отметить, что при анализе исходных солей, субстратов и деионизованной воды, данные элементы не были обнаружены. Вероятнее всего наличие иттрия и бария связано с обсеменением жидкости контрольного биореактора (куда не добавлялись гранулы биомассы) микроорганизмами из экспериментальных биореакторов при их периодическом вскрытии для взятия текущих рН проб и добавления глюкозы. Также в работе зафиксировано снижение содержания цезия и стронция в жидкости на 20% и 55%, соответственно, что выходит за рамки статистической погрешности.

Ключевые слова: биореактор, биосорбция, трансмутация изотопов при малой энергии, когерентные коррелированные состояния, обсеменение микроорганизмами

PACS: 25.60.PJ; 25.70.-Z; 28.41.KW; 28.52.-S; 28.60.+S; 82.90.+J; 87.17.-D; 87.17.EE; 87.80.-Y; 89.60.-K

Для цитирования: Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Гайдамака С.Н., Гладченко М.А. Совместная трансмутация стабильных изотопов Cs и Sr в микробиологических системах и перспективы ускоренной деактивации жидких радиоактивных отходов. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2021, 13(4):501-508. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.501.

Joint transmutation of stable Cs and Sr isotopes in microbiological systems and prospects for accelerated deactivation of liquid radioactive waste

Alla A. Kornilova, Sergey N. Gaydamaka, Marina A. Gladchenko

Lomonosov Moscow State University, <http://msu.ru/>

Moscow 119991, Russian Federation

E-mail: prfnart@mail.ru, s.gaidamaka@gmail.com, gladmarina@yandex.ru

Vladimir I. Vysotskii

Shevchenko Kiev National University, <http://www.univ.kiev.ua/>

Kiev 01033, Ukraine

E-mail: vivysotskii@gmail.com

Received December 04, 2021, peer-reviewed December 10, 2021, accepted December 14, 2021

Abstract: It was found during the research that in the experimental and control bioreactors, which at the beginning of the experiments contained only cesium and strontium, by the end of the experiments, yttrium and barium were found. These isotopes are formed as a result of low-energy nuclear reactions involving protons. In addition, in experimental bioreactors with an optimal composition, a two to threefold increase in the concentration of yttrium was recorded in comparison with the control non-optimal experiments. Accumulation of strontium and cesium in biomass was registered, which is explained by the process of biosorption. It is known that biosorption is the first step towards nuclear transformation (biotransmutation). At the same time, one of the main conditions for the nuclear transformation of biomass elements is its maximum efficient growth. An unexpected fact discovered during the experiment is that yttrium and barium were also found in the control bioreactor, where no biomass was added before the experiment, but only deionized water, glucose, and the initial stable cesium and strontium salts. It is important to note that these elements were not detected in the analysis of the initial salts, substrates, and deionized water. Most likely, the presence of yttrium and barium is due to inoculation of the control fluid of the bioreactor (where no biomass pellets were added) with microorganisms from the experimental bioreactors during their periodic opening for taking current pH samples and adding glucose. Also, the work recorded a decrease in the content of cesium and strontium in the liquid by 20% and 55%, respectively, which goes beyond the statistical error.

Keywords: bioreactor, biosorption, low energy isotope transmutation, coherent correlated states, seeding with microorganisms

PACS: 25.60.PJ; 25.70.-Z; 28.41.KW; 28.52.-S; 28.60.+S; 82.90.+J; 87.17.-D; 87.17.EE; 87.80.-Y; 89.60.-K

For citation: Alla A. Kornilova, Vladimir I. Vysotskii, Sergey N. Gaydamaka, Marina A. Gladchenko. Joint transmutation of stable Cs and Sr isotopes in microbiological systems and prospects for accelerated deactivation of liquid radioactive waste. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):501-508. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.501.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (502)
 2. СОВМЕСТНАЯ ТРАНСМУТАЦИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ Cs и Sr ПРИ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРИСУТСТВИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СУБСТАНЦИЙ (504)
 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (507)
- ЛИТЕРАТУРА (507)

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что одной из наиболее актуальных проблем современной энергетики и экологии является деактивация

радиоактивных отходов (РАО), образующихся в большом количестве при штатной работе ядерных реакторов. Образование жидких радиоактивных отходов (ЖРО) связано, в частности, с технологией выдерживания ТВЭЛ (тепловыделяющих элементов) после их извлечения из активной зоны реакторов в течение нескольких лет для распада наиболее короткоживущих радиоактивных изотопов. Еще больший масштаб образования ЖРО связан с авариями на АЭС. Характерным примером является авария на АЭС Фокусима-2,

на территории которой за 10 лет после разрушения реактора накоплено более 600000 тонн радиоактивной воды, образующейся при непрерывном охлаждении аварийного реактора.

Аналогичной является проблема долговременного хранения и утилизации твердотельных радиоактивных отходов. Хорошо известно также, что наиболее опасными для человека из всех долгоживущих изотопов, содержащихся в таких отходах, являются гамма-активный цезий Cs^{137} и бета-активный стронций Sr^{90} , период полураспада которых около 30 лет, а необходимое время выдержки для достижения приемлемого условно безопасного радиационного уровня составляет сотни лет.

Координируемая ИАЕА (Международным агентством по атомной энергии, МАГАТЭ) методика утилизации высокоактивных отходов за счет их интенсивного облучения нейтронами с возможностью преобразования долгоживущих изотопов в быстро распадающиеся более короткоживущие изотопы требует создания большого количества очень дорогостоящих сильноточных ускорителей протонов большой энергии с последующим преобразованием их в нейтроны. Простые оценки показывают, что для реализации такого решения и утилизации 300-500 тысяч тонн высокоактивных РАО необходимо создание в таких системах очень большого количества (тысячи тонн (!)) очень быстрых нейтронов, что очень дорого и сложно. Эта проблема активно обсуждалась 15-20 лет назад и было показано, что только на предварительную работу до 2050 года для реализации таких мегапроектов во всех странах, где развиты системы ядерной энергетики, необходимы общие расходы, превышающие 200-300 млрд долларов [1-4]. Сейчас эта идея фактически забыта.

В настоящее время единственным реальным методом утилизации РАО является «отложенное решение» – складирование и долговременное хранение РАО в специальных хранилищах с целью снижения удельной активности РАО за счет радиоактивного распада содержащихся в РАО изотопов с последующим окончательным захоронением РАО в глубинные геологические формации (на глубину порядка 500 м и более). Такое контролируемое хранение требует очень

больших текущих затрат на их обслуживание и обеспечение безопасности и экологически потенциально опасно из-за возможных аварий, которые неоднократно происходили в разных странах мира при нарушении условий обслуживания хранилищ (наиболее крупная – авария на химкомбинате «Маяк» в 1957 г. с выбросом большого количества радиоактивных отходов и образованием «Кыштымского радиоактивного следа»). Необходимо также отметить, что глубинное геологическое захоронение РАО приемлемо лишь для стран с большими территориями, так как выбор места создания могильника РАО должен быть обоснован долгосрочными прогнозами безопасности и к характеристикам геологических массивов, пригодных для захоронения РАО, предъявляются определенные специфические требования.

Нами в течение последних 25 лет исследуется принципиально другой, экологически безопасный и управляемый метод преобразования изотопов при малой энергии, включающий механизм утилизации долгоживущих РАО за счет преобразования радиоактивных изотопов в стабильные изотопы других элементов в процессе ядерной трансмутации, стимулированной внутренними топологическими структурными процессами, протекающими в нано-масштабе (на уровне биомолекул) в растущих микробиологических системах. В работах [5,6] было показано, что для атомных и ядерных частиц, находящихся в нестационарных потенциальных ямах наноразмера, в процессе деформации этих наноям (их быстрого расширения или сжатия) могут возникать такие квантовомеханические когерентные коррелированные состояния (ККС), которые сопровождаются очень резким увеличением вероятности прохождения одного из взаимодействующих ядер сквозь кулоновский барьер другого ядра. Наличие этого барьера является основным препятствием для ядерных процессов при малой (тепловой) энергии окружающей среды. Такие динамические системы с быстро изменяющейся внутренней структурой могут быть созданы искусственно, но гораздо эффективнее использовать быстрорастущие радиационно устойчивые микробиологические

культуры, в которых аналогичные процессы протекают естественным образом за счет, например, деления клеток, репликации ДНК, процессов ионного транспорта на входе неоднородных каналов в мембранах клеток и т.д.

Физической иллюстрацией таких процессов является соотношение неопределенностей Шредингера-Робертсона для разных пар динамических переменных A и B

$$\sigma_A \sigma_B \geq \left| \langle [\widehat{A}\widehat{B}] \rangle \right|^2 / 4(1-r^2), \quad (1)$$

которое было получено еще в 1930 году и отличается от «стандартного» соотношения неопределенностей Гейзенберга-Робертсона

$$\sigma_A \sigma_B \geq \left| \langle [\widehat{A}\widehat{B}] \rangle \right|^2 / 4 \quad (2)$$

наличием коэффициента корреляции $|r| \leq 1$. Этот коэффициент характеризует динамическую связь этих переменных и определяется соотношением

$$r = \sigma_{AB} / \sqrt{\sigma_A \sigma_B},$$

$$\sigma_{AB} = (\langle \widehat{A}\widehat{B} + \widehat{B}\widehat{A} \rangle) / 2 - \langle A \rangle \langle B \rangle, \quad (3)$$

$$\sigma_C = \langle (\widehat{C} - \langle C \rangle)^2 \rangle, \quad C = A, B.$$

В частном случае

$$A = x, B = p, \langle x - \langle x \rangle \rangle = 0, \langle p - \langle p \rangle \rangle = 0 \quad (4)$$

это соотношение сводится к модифицированному виду хорошо известного соотношения неопределенностей Гейзенберга с переопределенной (увеличенной в $G = 1/\sqrt{1-r^2}$ раз) постоянной Планка [7]

$$\sigma_p \sigma_x \geq \hbar^2 / 4(1-r^2) \equiv (\hbar^*)^2 / 4,$$

$$\delta p \delta x \geq \hbar / 2\sqrt{1-r^2} \equiv \hbar^* / 2, \quad (5)$$

$$\hbar^* = G\hbar, \quad \delta C \equiv \sqrt{\sigma_C}.$$

Из этих соотношений, в частности, следует, что при нахождении частицы с массой m в пределах нестационарной наноямы с размером $\delta x = \sqrt{\sigma_x}$, флуктуация ее кинетической энергии превышает минимальное значение

$$\Delta E \approx \sigma_p / 2m \geq \Delta E_{\min} = \hbar^2 G^2 / 8m\sigma_x. \quad (6)$$

В частности, если протон будет находиться в пределах этой деформируемой потенциальной ямы размером $\delta x \approx 1$ нм, то в исходном некоррелированном состоянии, для которого $r = 0$, а $G = 1$, амплитуда флуктуации

кинетической энергии очень мала и составляет 10^{-4} эВ, что намного меньше тепловой энергии при комнатной температуре (0.025 эВ), а для реально достижимой величины $G \approx 10^4$ эта амплитуда превышает 10 КэВ, что достаточно для ядерного синтеза и преобразования изотопов в присутствии микробиологических культур.

Проведенные ранние [5,8-11], а также последующие оптимизированные эксперименты [12] подтвердили реальность и высокую эффективность такой трансмутации изотопов в присутствии растущих микробиологических культур. Эти эксперименты были проведены с участием легких ($Mn^{55} + d = Fe^{57}$), средних по массе ($Na^{23} + P^{31} = Fe^{54}$) и тяжелых ($Cs^{133} + p = Ba^{134}$) стабильных изотопов.

2. СОВМЕСТНАЯ ТРАНСМУТАЦИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ Cs И Sr ПРИ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРИСУТСТВИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СУБСТАНЦИЙ

Ниже представлены результаты впервые проведенных биостимулированных экспериментов по реализации реакции ядерной трансмутации стабильного стронция, являющегося аналогом еще одного крайне опасного долгоживущего реакторного радиоактивного изотопа Sr^{90} .

С учетом того, что основным компонентом (82.6%) стабильного стронция является изотоп Sr^{88} , а также принимая во внимание, что реакции, стимулированные рассмотренными выше гигантскими флуктуациями энергии, с наибольшей вероятностью реализуются в случае, когда дочерним продуктом таких реакций является стабильный изотоп [7], следует ожидать, что наиболее вероятной является реакция трансмутации



с образованием стабильного изотопа иттрия Y^{89} .

Принципиальное отличие и важная особенность исследуемых процессов состоит в том, что эти эксперименты впервые были проведены в контролируемых условиях при одновременном наличии стабильных изотопов обеих элементов – как стронция, так и цезия. Это обстоятельство является важной предпосылкой реализации процесса

утилизации с использованием биотехнологии для совместной деактивации обоих и наиболее опасных радиоактивных изотопов, которые всегда присутствуют в РАО АЭС.

Эксперименты проводились следующим образом.

Для проведения экспериментов в деионизованной воде были растворены соли, содержащие стабильные изотопы цезия и стронция в концентрации по 100 мг/л. В идентичные экспериментальные (базовые) биореакторы "1", "2" и "3" (а также в контрольный биореактор "0") было внесено по 75 мл приготовленного раствора.

После этого в биореакторы "1-3" были добавлены сухие гранулы, содержащие по 0.4 грамма высушенной синтрофной анаэробной микробиологической ассоциации, а в качестве необходимых микроэлементов были добавлены соли Na_2CO_3 и Na_2HPO_4 .

В биореактор "0" были внесены аналогичные компоненты за исключением самих гранул. После этого все биореакторы поместили в термостатируемую камеру, где они находились 33 суток при оптимальной для них температуре 55°C.

На внешней поверхности прозрачных биореакторов были зафиксированы уровни жидкости и при ее уменьшении объем восполнялся добавлением аналогичной деионизованной водой до соответствующего уровня во время манипуляций с биореакторами в течение всего эксперимента.

Через каждые 4 суток пребывания биореакторов в термостатируемой камере в них доливалась вода до исходного уровня, измерялся показатель *pH* жидкости в каждом биореакторе и добавлялась по 0.05-0.15 мл глюкозы. Эксперимент с периодическим повторением таких процедур длился 33 суток.

В процессе эксперимента также был проведен анализ аналогичных проб глюкозы, солей питательной среды, супернатантов и биомасс методом РФА с целью определения концентрации всех химических элементов. Результаты химического анализа жидкой фазы, отобранной после центрифугирования жидкости из биореакторов и отделения присутствующего в пробах осадка, приведены в **Таблице 1**.

Таблица 1

Результаты химического анализа жидкой фазы после завершения эксперимента и отделения из нее осадка

Наименование пробы	Концентрация, мг/л			
	Cs	Sr	Ba	Y
Биореактор "0"	107.5	93.1	0.42	0.16
Средние значения для биореакторов "1", "2" и "3"	89.2	45.2	0.23	0.23

Из этих результатов следует, что во всех биореакторах, в том числе и в биореакторе "0", не содержащим гранул синтрофной ассоциации, обнаружено присутствие ионов *Ba* и *Y*. Видно, что содержание *Cs* и *Sr* в жидкой фазе в объеме биореакторов "1-3" с оптимальным составом оказывается существенно меньше, чем в биореакторе "0", в котором формально отсутствовали микрокультуры. Этот логический вывод хорошо согласуется с начальным предположением о возможности протекания в них ускоренных реакций биотрансмутации.

С другой стороны наличие ионов *Ba* и *Y* в биореакторе, не содержащем гранул синтрофной ассоциации, требует соответствующих объяснений.

Это интересное обстоятельство связано, скорее всего, с неконтролируемым попаданием очень небольших количеств спор микроорганизмов из рабочих емкостей биореакторов "1"- "3" в соседнюю (находящуюся рядом) емкость с биореактором "0" при кратковременной, но многократно повторяемой разгерметизации этих биореакторов во время выделения биогаза, производимого анаэробными микроорганизмами. Очень малое количество таких микроорганизмов, попавших из воздуха в биореактор "0", могло быстро увеличиться, с учетом оптимальных условий длительного эксперимента, до количества, обеспечивающего реализацию процесса достаточно эффективной трансмутации изотопов. Такой механизм самозаселения биореактора "0" является вполне обоснованным, учитывая, что в оптимальных условиях, при наличии всех жизненно необходимых компонент, отсутствии конкурентов и наличии комфортной для этих микроорганизмов температуры за полное время эксперимента происходит 8-10 циклов расширенного репродуцирования этих микроорганизмов.

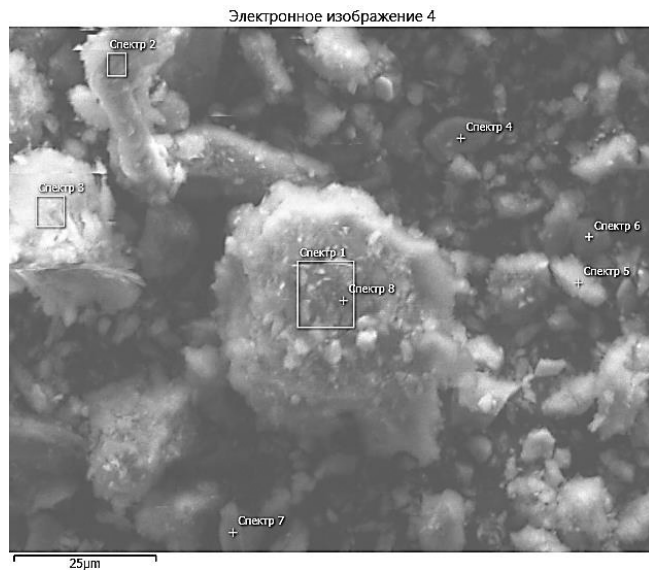


Рис. 1. Электронное изображение и точки отбора проб в осадке биореактора "1".

Для максимально полного понимания и объяснения полученного эффекта, был проведен рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) осадков, находящихся в биореакторах после завершения экспериментов. Результаты анализа, предварительно отмытого от маточного раствора и высушенного при температуре 100°C

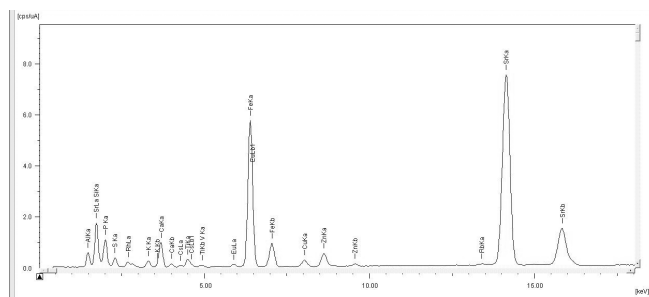


Рис. 2. Рентгенограмма осадка в биореакторе "1".

Из этих данных следует, что почти во всех исследуемых точках образца осадка присутствуют соли Cs и Sr, попавшие туда в результате сорбции в объем микрокультур. Формальное отсутствие

осадка в биореакторе "1", представлены на **Рис. 1** и **Рис. 2**, а также в **Таблице 2**.

Ba в спектрах 2, 6 и 7 связано, вероятнее всего, с очень малой его концентрацией из-за селективности его сорбции или из-за малой концентрацией Cs в этих точках.

Аналогичные результаты были получены при исследовании осадков в биореакторах "2" и "3".

Кроме исследования жидкой фазы рабочего раствора и осадка, был проведен РФА использовавшихся при проведении экспериментов реактивов, с целью «оценки чистоты» эксперимента (отсутствие в реактивах соединений Cs, Sr, Y, и Ba).

Данные этих измерений подтвердили полное отсутствие (с точностью, гарантируемой

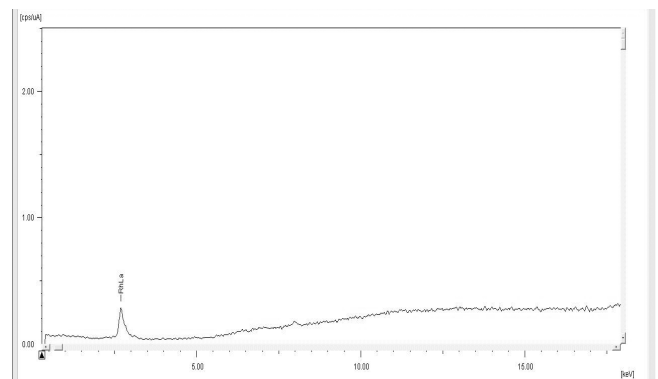


Рис. 3. Рентгенограмма глюкозы.

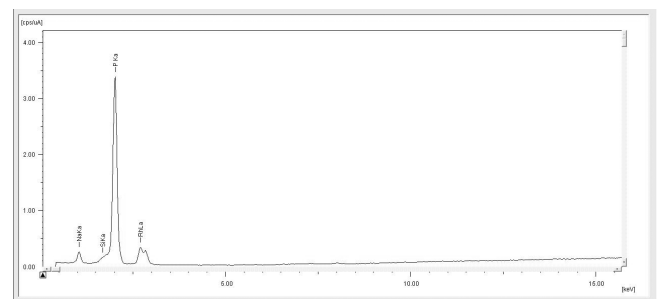


Рис. 4. Рентгенограмма Na₂HPO₄.

Таблица 2

Элементный (массовые %) химический состав осадка в биореакторе "1".

Метка спектра	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Sr	Y	Cs	Ba	Всего
Спектр 1	0.95	0.91	19.04	31.06	21.81	4.64	3.34	5.08	1.26	6.48	3.70	0.56	0.83	0.34	100.00
Спектр 2	1.76	0.98	17.23	31.11	19.11	5.47	3.39	6.89	1.13	7.50	3.49	0.73	1.23	0.00	100.00
Спектр 3	1.61	0.82	19.68	23.91	20.97	11.04	1.89	6.36	1.61	6.82	2.70	1.01	1.09	0.49	100.00
Спектр 4	0.33	1.06	25.11	40.05	1.44	0.29	20.62	0.48	2.01	7.00	1.09	0.26	0.16	0.11	100.00
Спектр 5	1.11	1.20	21.03	35.52	20.14	3.18	2.07	3.30	1.43	4.64	3.60	1.57	1.08	0.12	100.00
Спектр 6	0.27	0.15	2.37	86.55	4.07	0.50	0.56	0.76	0.04	1.54	1.16	1.96	0.06	0.00	100.00
Спектр 7	0.26	0.21	1.77	83.24	7.02	1.00	0.00	1.36	0.44	2.69	1.61	0/41	0.00	0.00	100.00
Спектр 8	0.54	0.89	16.07	33.26	19.33	6.95	2.85	5.87	1.24	6.92	4.55	0.12	0.96	0.45	100.00

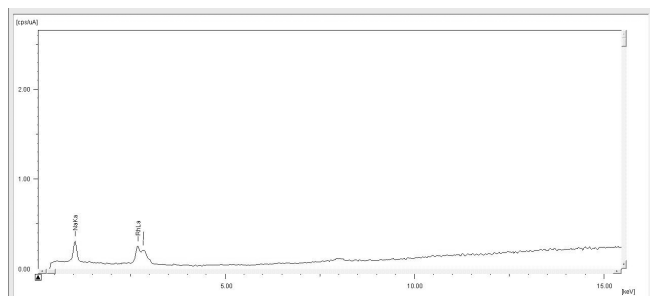


Рис. 5. Рентгенограмма Na_2CO_3 .

Таблица 3

Результаты элементного химического состава
 Na_2HPO_4 , мас. %

1	Elem.	P	66.302%	(0.087)	Quant.-FP	P Ka	11.2593
1	Elem.	Na	29.599%	(0.176)	Quant.-FP	NaKa	0.5928
1	Elem.	Si	4.099%	(0.031)	Quant.-FP	SiKa	0.6122

Таблица 4

Результаты элементного химического состава
 Na_2CO_3 , мас. %

1	Elem.	Na	97.887%	(0.398)	Quant.-FP	NaKa	0.7087
1	Elem.	Ca	0.864%	(0.045)	Quant.-FP	CaKa	0.0208
1	Elem.	Al	0.461%	(0.025)	Quant.-FP	AlKa	0.0100
1	Elem.	Mg	0.278	(0.063)	Quant.-FP	MgKa	0.0038
1	Elem.	S	0.266	(0.010)	Quant.-FP	S Ka	0.0294
1	Elem.	Si	0.245	(0.011)	Quant.-FP	SiKa	0.0127

технологией измерений на основе РФА) этих химических элементов (Рис. 3-5, Табл. 3, 4).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа концентрации и состава (перераспределения) химических элементов, участвующих в процессе естественного метаболизма микробиологических культур в разных растворах, позволяют сделать следующие выводы.

1. В маточных растворах и в присутствующих в биореакторах осадках обнаружены ионы Ва и Y, полностью отсутствующие в исходных компонентах. Наиболее вероятным и обоснованным механизмом образования этих элементов являются ядерные реакции их синтеза.
2. Показано, что в маточных растворах наблюдается существенное (как минимум на 20%) снижение концентрации Cs при сравнении результатов исследования образцов жидкости из оптимальных биореакторов "1-3" и образца из контрольного биореактора "0". Это снижение непосредственно связано с ядерным преобразованием изотопа Cs^{133} в

изотоп Ba^{134} .

3. Обнаружено очень существенное (как минимум на 50%) уменьшение концентрации Sr в оптимальных биореакторах "1-3" по сравнению с неоптимальной системой биореактора "0", что может быть связано как с его трансмутацией в Y, так и с сорбцией в осадки, содержащие основную часть биокультур.
4. В связи с обнаруженным присутствием в осадках ионов Sr, Ва и Y для составления материального баланса необходимо разработать методику растворения находящихся в биореакторах осадков.
5. Для более доказательного подтверждения всех рассматриваемых процессов желательно дополнительное проведение масс-спектрометрических измерений всех продуктов ядерных преобразований.
6. Мы полагаем, что одновременная трансмутация стабильных изотопов Cs и Sr в одном объеме в присутствии микробиологических ассоциаций позволяет с большой вероятностью прогнозировать аналогичные процессы трансмутации радиоактивных изотопов Cs^{137} и Sr^{90} и проводить эффективную деактивацию ЖРО.
7. Предложенная и логически обоснованная гипотеза о возможности перекрестного обсеменения оптимальными микробиологическими ассоциациями изначально биологически нейтральных емкостей с радиоактивной жидкостью с последующей оптимальной трансмутацией радиоактивных изотопов позволяет прогнозировать аналогичную технологию для деактивации больших объемов ЖРО без излишней биологической нагрузки в промышленных масштабах.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам АО ВНИИНМ В.А. Кащееву и Е.А. Мусатову, а также сотруднику АО ТВЭЛ А.И. Ермакову за полезное обсуждение и осуществление объективного контроля при проведении этих экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Minato K, Ikegami T, Inoue T. Recent research

- and development activities on partitioning and transmutation of radioactive nuclides in Japan. *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Eight Information Exchange Meeting*. USA, Las-Vegas, November 2004, p.29-47.
2. Ponomarev LI. Overview of Russia P&T Programme. *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Eight Information Exchange Meeting*. USA, Las-Vegas, November 2004, p. 79-90.
 3. Stanculescu A. IAEA Activities in the area of partitioning and transmutation. *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Eight Information Exchange Meeting*. USA, Las-Vegas, November 2004, p.101-108.
 4. Savage B. Overview of United States P&T Programme. *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Eight Information Exchange Meeting*. USA, Las-Vegas, November 2004, p. 49-56.
 5. Vysotskii VI, Kornilova AA. Transmutation of stable isotopes and deactivation of radioactive waste in growing biological systems. *Annals of Nuclear energy*, 2013, 62:626-633.
 6. Vysotskii VI, Kornilova AA. Microbial Transmutation of Cs¹³⁷ and LENR in growing biological systems. *Current Science*, 2015, 108(4):142-146.
 7. Vysotskii VI, Vysotsky MV. Features of correlated states and a mechanism of self-similar selection of nuclear reaction channels involving low-energy charged particles. *J. of Experim. and Theor. Phys.*, 2019, 128:856-864.
 8. Vysotskii VI, Kornilova AA. *Nuclear fusion and transmutation of isotopes in biological systems*. Moscow, MIR Publ., 2003, 302 p. (in English).
 9. Kornilova AA, Vysotskii VI, Gaydamaka SN, Gladchenko MA. Nuclear Reactions in Living Nature: The Possibility of Biological Processing and Deactivation of Liquid Radioactive Waste. *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences)*. Springer, Book series (SPEES), 25 March 2019, pp 213-230.
 10. Vysotskii VI, Kornilova AA, Gaydamaka SN, Novakova AA, Novikov DS, Vysotskiy VV, Avdonin VV. Creation of Fe isotopes in natural geology crusts as the result of self-controlled global biostimulated LENR in oceans and seas. *Journal Condensed Matter Nucl. Science*, 2020, 33:323-332.
 11. Vysotskii VI, Kornilova AA. Effective LENR and transmutation of stable and radioactive isotopes in growing biological systems. *Cold Fusion. Advances in Condensed Matter Nuclear Science*, Edited by Jean-Paul Biberian, Elsevier, 2020, Chapter 12., pp. 205-232.
 12. Kyu-Jin Yum et al. An Experiment in Reducing the Radioactivity of Radionuclide (Cs¹³⁷) with Multi-component Microorganisms of 10 Strains. *J. Condensed Matter Nucl. Sci.*, 2019, 28:1-6.

Корнилова Алла Александровна

к.ф.-м.н., с.н.с., действительный член РАЕН

МГУ им. М.В. Ломоносова

Москва 119991, Россия

prfnart@mail.ru

Высоцкий Владимир Иванович

д.ф.-м.н., проф., член-корреспондент РАЕН

Киевский национальный университет им. Т.Шевченко

Киев 01033, Украина

vivysotskii@gmail.com

Гайдамака Сергей Николаевич

с.н.с.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Москва 119991, Россия

s.gaidamaka@gmail.com

Гладченко Марина Анатольевна

с.н.с.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Москва 119991, Россия

gladmarina@yandex.ru.