



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2009148446/28, 28.12.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.12.2009

(45) Опубликовано: 20.12.2010 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: ГРЕШИЛОВ А.А., ТЕТЮХИН А.А.  
«АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ИСТОЧНИКОВ РАДИОАКТИВНЫХ  
БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ». ВЕСТНИК  
МГТУ ИМ. Н.Э.БАУМАНА. СЕРИЯ  
«ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ», 2003, №2, с.3-  
19. RU 2068571 C1, 27.10.1996. US 6567498 B,  
20.05.2003. RU 2377597 C2, 27.12.2009.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, директору, для  
А.А. Грешилова, ФН-1

(72) Автор(ы):

Грешилов Анатолий Антонович (RU),  
Лебедев Алексей Леонидович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

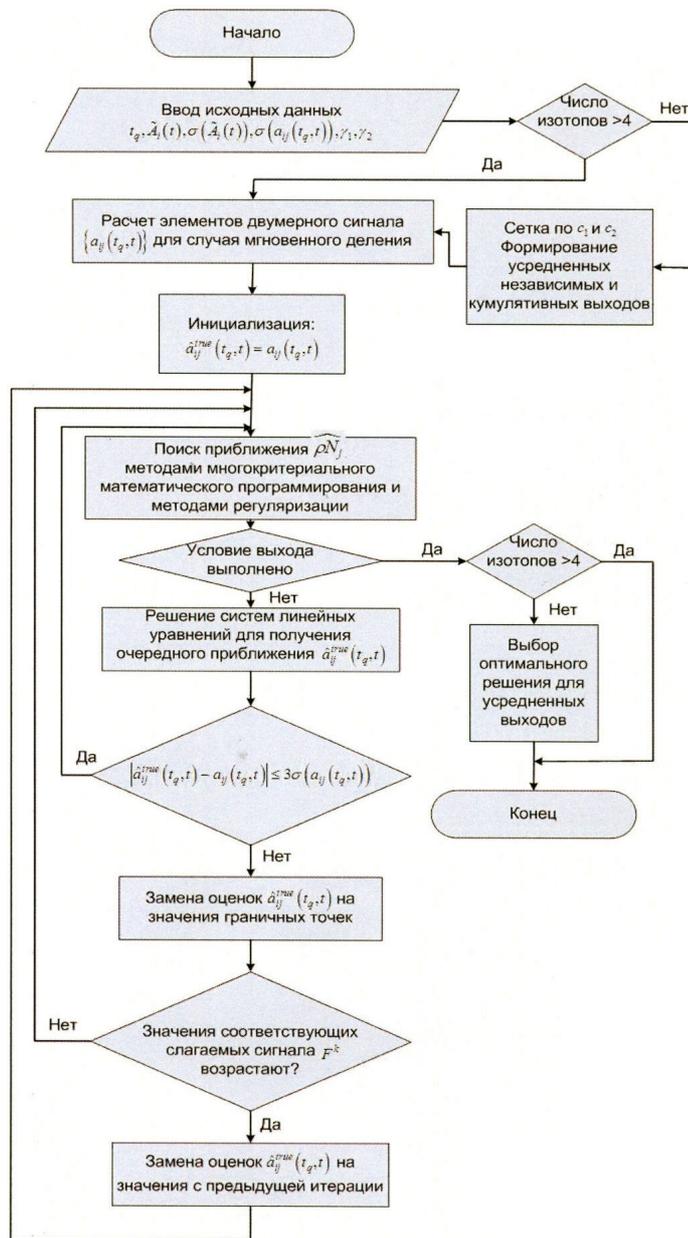
Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана" (RU)

## (54) СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА ПО ИЗОТОПАМ КРИПТОНА И КСЕНОНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к ядерной физике и может быть использовано в системах идентификации ядерных взрывов по измеренным активностям имеющихся в атмосфере РБГ. Технический результат - повышение эффективности определения и достоверности точечных оценок вкладов различных видов деления в суммарную активность для каждого изотопа криптона и ксенона. Определение вкладов разных видов деления в суммарную активность изотопов криптона и ксенона осуществляется путем формирования для заданного момента сепарации  $t_q$  и времени измерения  $t$  сигнала  $F_1$ , получения при фиксированных значениях  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  на каждой итерации из сигнала  $F_1$  путем дифференцирования его по элементам  $\rho N_j$  СЛАУ, решением СЛАУ посредством формирования нескольких целевых функций и

использованием 4-х методов многокритериального математического программирования, сведением многокритериальной задачи к однокритериальной задаче с ограничениями, получением итерационными вычислительными процедурами решения указанной однокритериальной задачи с ограничениями при заданном  $t_q$  при уточняемых на каждой итерации оценках элементов двумерного сигнала  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ , определением точечных сигналов вкладов видов деления в суммарную активность изотопов. Для определения момента сепарации  $t_q$  вклады  $\rho N_j$  рассчитывают при разных  $t_q$  и выбирают  $t_q$ , при котором отношение 
$$\sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m \hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 / \sum_{j=1}^m (\rho N_j)^2$$
 минимально. 1 з.п. ф-лы, 4 ил., 1 табл.



Фиг. 3



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
*G01T 1/167* (2006.01)  
*G01T 1/30* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2009148446/28, 28.12.2009**

(24) Effective date for property rights:  
**28.12.2009**

(45) Date of publication: **20.12.2010 Bull. 35**

Mail address:  
**105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, MGTU  
im. N.Eh. Baumana, TsZIS, direktoru, dlja A.A.  
Greshilova, FN-1**

(72) Inventor(s):

**Greshilov Anatolij Antonovich (RU),  
Lebedev Aleksej Leonidovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovanija  
"Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij  
universitet imeni N.Eh. Baumana" (RU)**

(54) **METHOD OF DETECTING NUCLEAR EXPLOSION FROM KRYPTON AND XENON ISOTOPES**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: components of different types of fissions in the overall activity of krypton and xenon isotopes is determined by generating a signal  $F_1$  for the given moment of separation  $t_q$  and measurement time  $t$ , obtaining a system of linear algebraic equations at fixed values  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  for each

iteration from the signal  $F_1$  by differentiating said system on elements  $pN_j$ , solving the system of linear algebraic equations by forming several target functions and using 4 methods for multi-criteria mathematical programming by reducing the multi-criteria problem to a single-criterion problem with limitations, using iterative calculation procedures to solve the said single-criterion problem with limitations for given  $t_q$  with estimates of elements of a two-dimensional signal  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  specified on

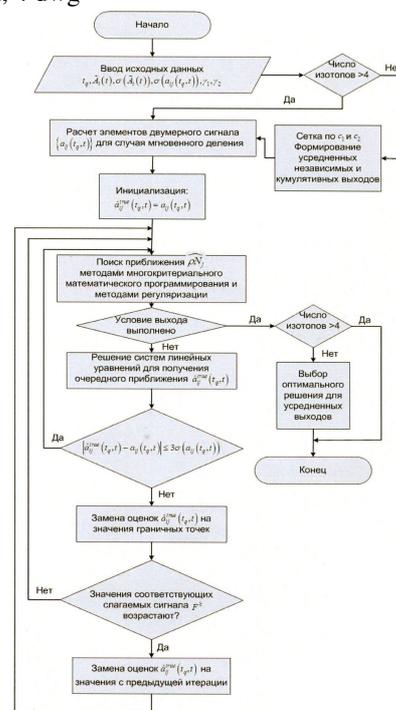
each iteration, determination of point signals of components of types of fissions into the overall activity of isotopes. To determine the moment of separation  $t_q$ , components  $pN_j$  are calculated at equal  $t_q$  and  $t_q$  for which the relationship

$$\sum_{i=1}^n \left( \hat{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 / \sum_{j=1}^m (\rho N_j)^2$$

is minimal is selected.

EFFECT: high efficiency of determination and accuracy of point estimates of components of different types of fissions into the overall activity for each krypton and xenon isotope.

2 cl, 4 dwg



Фиг. 3

RU 2 407 039 C1

RU 2 407 039 C1

Область техники

Изобретение относится к ядерной физике и может быть использовано в системах идентификации источников радиоактивности в атмосфере.

Уровень техники

5 Идентификация ядерных взрывов по изотопам радиоактивных благородных газов (РБГ) имеет место в процессе мониторинга радиоактивной обстановки для осуществления контроля по соблюдению Договора о Всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ).

10 Известны способы идентификации ядерных взрывов по радиоактивным изотопам криптона и ксенона:

I. Метод, разработанный в СССР в конце 60-х гг. Схема измерения активности РБГ заключается в следующем [1]: в атмосфере отбирается проба (после события), которая исследуется в течение некоторого времени. На протяжении всего этого времени  
15 проводится измерение активности изотопов криптона и ксенона однокристалльным сцинтилляционным  $\gamma$ -спектрометром NaJ(Tl).

Измеренные активности изотопов криптона и ксенона служат для формирования системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных вкладов источников РБГ в суммарную активность изотопов криптона и ксенона. Система уравнений решалась с помощью метода наименьших квадратов (МНК).  
20

II. Это усовершенствованный подход [2] изложенного методе I, который позволяет устранить некоторые его недостатки - учесть погрешности элементов матрицы решаемой системы уравнений и обеспечить получение устойчивого решения путем  
25 применения метода регуляризации А.Н.Тихонова (2003 г).

Ближайшим аналогом предлагаемого способа является метод, описанный в п. II, при котором:

1. Измеряют в атмосфере активности  $\tilde{A}_i(t)$  отдельных изотопов криптона и  
30 ксенона ( $t$  - момент измерения), где  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  - число измеряемых изотопов.

2. Для различных видов делящегося материала (под видом деления понимается один из вариантов деления тяжелых ядер урана 235, урана 238, плутония 239 нейтронами спектра деления или нейтронами с энергией 14 МэВ) по отношениям активностей  
35 изотопов криптона и ксенона, построенных с учетом и без учета сепарации, определяют интервал времени  $[t_H, t_K]$ , на котором произошла сепарация.

3. На интервале  $[t_H, t_K]$  задают сетку времени с шагом  $\Delta t$ .

4. Для каждого узла сетки  $t_q$  формируют и запоминают двумерный сигнал  
40  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  удельных активностей изотопов криптона и ксенона, в котором строки соответствуют конкретному изотопу, а столбцы - конкретному виду деления;  $n$  - число рассматриваемых изотопов;  $m$  - число рассматриваемых видов деления;  $t$  - момент измерения пробы;  $t_q$  - предполагаемый момент сепарации.

5. Считая измеренные значения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  и элементы двумерного сигнала  
45  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  статистически независимыми величинами, распределенными по нормальному закону со среднеквадратическими отклонениями  $\sigma(\tilde{A}_i(t))$  и  $\sigma(a_{ij}(t_q, t))$  соответственно, при заданном времени  $t_q$  формируют одномерный сигнал:  
50

$$F_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\left( \tilde{A}_1(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2}{\sigma^2(\tilde{A}_1(t))} + \sum_{j=1}^m \frac{(a_{ij}(t_q, t) - a_{ij}^{true}(t_q, t))^2}{\sigma^2(a_{ij}(t_q, t))} \right),$$

где  $(\rho N_j)$ ,  $j = \overline{1, m}$  - подлежащие определению вклады источников радиоактивности в суммарную активность;  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$  - неизвестные истинные значения удельных активностей,  $a_{ij}(t_q, t)$  - удельные активности, рассчитанные по имеющим погрешности независимым и кумулятивным выходам элементов изобарных цепочек радиоактивных превращений (ИЦРП);  $l$  - номер итерации поиска оценок  $\widehat{\rho N_j}$  и  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ .

6. Задают числа  $\gamma_1, \gamma_2$ , характеризующие точность оценок  $\widehat{\rho N_j}$  и  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ .

7. Итеративно находят минимум сигнала  $F_1$  по  $\rho N_j$  и  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$ , используя регуляризацию А.Н.Тихонова и соблюдая выполнение ограничений

$$|a_{ij}(t_q, t) - \hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)| \leq 3\sigma(a_{ij}(t_q, t)), \quad i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m, \text{ до выполнения условий:}$$

$$\left\| \frac{(\widehat{\rho N_j})_l - (\widehat{\rho N_j})_{l-1}}{(\widehat{\rho N_j})_l} \right\| < \gamma_1$$

$$\left| \frac{F_l - F_{l-1}}{F_l} \right| < \gamma_2,$$

где индекс  $(l-1)$  обозначает значение, полученное на предыдущей итерации.

8. Ковариационная матрица оценок определяется соотношением

$$D_{ij} = \left( \frac{\partial^2 F_1}{\partial (\widehat{\rho N_j}) \partial (\widehat{\rho N_j})} \right)^{-1}, \quad i, j=1, 2, \dots, m.$$

Недостатки аналога следующие:

1) используется только регуляризация Тихонова, что требует дополнительного определения параметра регуляризации, однозначного метода определения которого не существует; причем регуляризация Тихонова «сглаживает» решение, что может привести к большим ошибкам в идентификации;

2) рассматриваемая система уравнений переопределенная, т.е. число строк двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  больше числа столбцов - число уравнений больше числа неизвестных. Возможность применения данного подхода в реальных ситуациях, когда измерение радиоактивности изотопов криптона и ксенона проводится через несколько дней после события и когда число неизвестных  $\rho N_j$  (вкладов различных источников) больше числа измеряемых изотопов, т.е. количества величин  $\tilde{A}_1(t)$ , не исследовалась.

Тем самым, аналог не обеспечивает идентификацию ядерного взрыва в наиболее вероятном случае, когда измеряется активность от 2-х до 4-х изотопов, а отбор проб проводится через 5-6 суток после события. Указанные недостатки, очевидно, не позволяют применять способ в реальных условиях из-за его низкой практической

эффективности.

#### Раскрытие изобретения

Техническим результатом предлагаемого способа является повышение достоверности определения факта проведенного ядерного взрыва при измеряемом числе изотопов, меньшем, чем рассматриваемое число неизвестных (видов деления). Эффективность предлагаемого способа обеспечивается за счет:

1) одновременного рассмотрения разных предполагаемых комбинаций источников активности изотопов криптона и ксенона и о различных механизмах ядерного взрыва;

2) разработки и включения в способ идентификации ядерного взрыва аппарата многокритериального математического программирования, позволяющего учесть всевозможные виды дополнительных условий (неотрицательность решения, ограниченность решения), которым должна удовлетворять оценка решения, и не требующие определения параметра регуляризации (по А.Н.Тихонову), четко формализованных процедур определения которого не существует;

3) объединения двух видов деления урана 235 нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ в один вид деления, а также двух видов деления плутония 239 нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ в один вид деления путем усреднения независимых и кумулятивных выходов элементов ИЦРП.

Способ идентификации ядерного взрыва по изотопам криптона и ксенона характеризуется измерением в атмосфере активности  $\tilde{A}_i(t)$  отдельных изотопов криптона и ксенона ( $Kr^{83m}$ ,  $Kr^{85m}$ ,  $Kr^{85}$ ,  $Kr^{88}$ ,  $Xe^{131m}$ ,  $Xe^{133m}$ ,  $Xe^{133}$ ,  $Xe^{135}$ ), где  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  - число измеряемых изотопов; построением для различных видов делящегося материала зависимостей отношения активностей изотопов (например,  $Kr^{85m}/Xe^{135}$ ) от времени без сепарации в интервале от момента возникновения события (ядерного взрыва) до момента измерения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  изотопов криптона и ксенона; расчетом из измеренных экспериментальных точек в «обратном времени» отношения изотопов до совпадения их значений со значениями относительной активности без учета сепарации; определением по совпадению «экспериментальных» значений с «теоретическими» интервала времени  $[t_H, t_K]$ , на котором, возможно, произошла сепарация изотопов криптона и ксенона от их предшественников по ИЦРП; формированием на интервале  $[t_H, t_K]$  сетки времени с шагом  $\Delta t$ , формированием и запоминанием для каждого узла сетки  $t_q$  двумерного сигнала удельных активностей изотопов криптона и ксенона  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ; формированием при условии, что измеренные значения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  и элементы двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$

являются статистически независимыми величинами, распределенными по нормальному закону с математическими ожиданиями  $\tilde{A}_i^{true}(t)$  и  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$  и среднеквадратическими отклонениями  $\sigma(\tilde{A}_i(t))$  и  $\sigma(a_{ij}(t_q, t))$  соответственно, для определенного момента сепарации  $t_q$  одномерного сигнала  $F_j$ ; указанием малых чисел  $\gamma_1, \gamma_2$  - допускаемых величин ошибок; формированием двумерного сигнала удельных активностей  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  одновременно для разных комбинаций источников радиоактивности и различных механизмов ядерного взрыва. Определение оценки вкладов активностей отдельных источников  $\widehat{\rho N}_j$  осуществляют посредством формирования нескольких целевых функций и использованием методов многокритериального математического программирования, сведением многокритериальной задачи к однокритериальной задаче с ограничениями,

получением итерационными вычислительными процедурами решения указанной однокритериальной задачи с ограничениями, определением по значениям  $\widehat{\rho N_j}$  (числа делений j-го вида) вклада каждого источника в суммарную активность, т.е.

5 идентификация параметров ядерного взрыва. В процессе решения за истинную принимается комбинация источников изотопов РБГ, дающая минимальное значение сигнала  $F_1$ .

Для определения факта ядерного взрыва по малому числу измеренных изотопов, два вида деления урана 235 (деление нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ) объединяются в один вид деления и два вида деления плутония 239 (деление нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ) объединяются в один вид деления посредством усреднения соответствующих указанным видам деления независимых и кумулятивных выходов элементов ИЦРП.

15 Перечень фигур.

Фиг.1 - изменение относительной активности изотопов  $A(\text{Xe}133\text{m})/A(\text{Xe}133)$  в случае деления  $U_{235}^f$  и  $Pu_{239}^f$  без сепарации (сплошная и штриховая линии, соответственно) и с учетом сепарации от предшествующих изотопов (линия с маркерами), точка 1 - это отношение измеренных активностей изотопов в момент времени  $t=12$  часов.

Фиг.2 - общая блок-схема алгоритма получения оценок момента сепарации  $\hat{t}_q$  и решения  $\widehat{\rho N_j}$ .

25 Фиг.3 - блок-схема алгоритма решения плохо обусловленной системы линейных алгебраических уравнений с помощью конфлюэнтного анализа (соответствует блоку 1 Фиг.2 общей блок-схемы).

Фиг.4 - график зависимости кумулятивных выходов изотопов  $\text{Xe}^{133}$  и  $\text{Xe}^{135}$  от относительного вклада нейтронов спектра деления и нейтронов энергии 14 МэВ.

Осуществление изобретения

Необходимо определить следующие параметры источников ядерного взрыва по РБГ в атмосфере: вклады каждого вида деления (делящегося материала и энергии нейтронов  $\widehat{\rho N_j}$ ,  $j = \overline{1, m}$ ) в суммарную активность РБГ, измеренную в атмосфере.

35 В качестве практически оправданного допущения для предлагаемого способа регистрируемые сигналы (активности изотопов) рассматривают как детерминированные, подверженные аддитивной помехе, оценки параметров которых подлежат определению.

40 При мгновенном делении i-й изотоп появляется в результате различных видов деления, и его измеренная активность  $\tilde{A}_i(t)$  выражается следующим образом [3]:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}(\theta, \eta, \lambda, t, t_q) \rho N_j = \tilde{A}_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

45 где  $a_{ij}(\theta, \eta, \lambda, t, t_q)$  - активность i-го изотопа при j-м виде деления для одного акта распада, вычисленная с учетом сепарации на момент времени  $t > t_q$ , т.е. удельная активность;  $\theta$  - вектор параметров, характеризующих сепарацию измеряемых изотопов от предшествующих им;  $\eta$  - вектор независимых выходов изотопов (при j-м виде деления);  $\lambda$  - вектор постоянных распада;  $t$  - время наблюдения;  $t_q$  - предполагаемый момент сепарации изотопов криптона и ксенона от предшествующих им изотопов по цепочкам радиоактивных превращений;  $\rho$  - доля i-го изотопа в образце (значение  $\rho$  обычно неизвестно);  $N_j$  - число делений j-го вида.

До момента сепарации  $t_q$  удельная активность  $a_{nj}^{t_q}(\theta, \eta, \lambda, t_q)$  определяется формулой:

$$a_{nj}^{t_q}(\theta, \eta, \lambda, t_q) = \left\{ \eta_n \lambda_n \exp(-\lambda_n t_q) + \sum_{p=1}^{r_{\max}} \sum_{i_p=1}^{n_p-1} \eta_{i_p} \lambda_{i_p} \prod_{r=i_p}^{n_p-1} \gamma_r \lambda_r \sum_{s_p=i_p}^{n_p} \frac{\exp(-\lambda_{s_p} t_q)}{\prod_{\substack{q_p=i_p \\ q_p \neq s_p}} (\lambda_{q_p} - \lambda_{s_p})} \right\}, \quad (2)$$

где

$\eta_i$  - независимый выход  $i$ -го изотопа;

$n_p$  - номер исследуемого изотопа по  $r$ -й ветви;

$n$  - максимальный член из  $\{n_p\}$ ;

$r_{\max}$  - число ветвей цепочки;

$(n_p-1)$  - число изотопов, предшествующих исследуемому по  $r$ -й ветви распада;

$\gamma_r$  - доля  $r$ -го члена цепочки, получающегося из  $(r-1)$ -го по  $r$ -й ветви;

$\lambda_{i_p}, \lambda_{r_p}, \lambda_{s_p}, \lambda_{q_p}$  - постоянные распада изотопов, имеющих соответственно номера  $i_p, r_p,$

$s_p, q_p$  по  $r$ -й ветви, причем  $i_p \leq r_p \leq n_p-1; i_p \leq s_p \leq n_p; i_p \leq q_p \leq n_p$  и  $q_p \neq s_p$ ;

$t_q$  - время, когда произошло мгновенное отделение исследуемого изотопа от предшественников, после чего распад изотопа идет по экспоненте с постоянной распада  $\lambda_n$ .

После момента сепарации изотопы распадаются по своим постоянным распада  $\lambda_i$ :

$$a_{ij}(\theta, \eta, \lambda, t, t_q) = a_{ij}^{t_q}(\theta, \eta, \lambda, t_q) \exp(-\lambda_i (t - t_q)), \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,m, \quad (3)$$

где  $a_{ij}^{t_q}(\theta, \eta, \lambda, t_q)$  - удельная активность, рассчитанная по формуле (2) на момент времени  $t_q$ .

Уравнения вида (1) составляются для каждого измеряемого изотопа криптона и ксенона, в результате формируется СЛАУ

$$\begin{bmatrix} a_{11}(t_{q,r}, t) & a_{12}(t_{q,r}, t) & \dots & a_{1m}(t_{q,r}, t) \\ a_{21}(t_{q,r}, t) & a_{22}(t_{q,r}, t) & \dots & a_{2m}(t_{q,r}, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(t_{q,r}, t) & a_{n2}(t_{q,r}, t) & \dots & a_{nm}(t_{q,r}, t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho N_1 \\ \rho N_2 \\ \vdots \\ \rho N_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1(t) \\ \tilde{A}_2(t) \\ \vdots \\ \tilde{A}_n(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в которой определению подлежат неизвестные вклады источников радиоактивности  $\rho N_j$  в суммарную активность изотопов криптона и ксенона.

Первый этап решения задачи идентификации источников РГБ - определение времени сепарации  $t_q$  изотопов криптона и ксенона. Временной отрезок, которому принадлежит момент сепарации, можно найти, «достроив» относительные активности изотопов в различных видах деления «в обратном времени» от момента измерения без учета влияния предшествующих им изотопов и определив точки пересечения линий, проведенных из экспериментальных точек, с относительными активностями, построенными с учетом влияния предшествующих изотопов по цепочке распада изотопов.

На Фиг.1 приведены графики относительной активности для двух изотопов ксенона ( $\text{Xe}^{133m}, \text{Xe}^{135}$ ), экспериментальная точка 1 соответствует моменту измерения активностей  $t=12$  часов после события. Чтобы не усложнять чертеж, изображены только «граничные» линии, соответствующие  $\text{U}_f^{235}$  и  $\text{Pu}_f^{239}$  (вместо 6 возможных видов

деления:  $U_f^{235}$ ,  $U_{14}^{235}$ ,  $U_f^{238}$ ,  $U_{14}^{238}$ ,  $Pu_f^{239}$  и  $Pu_{14}^{239}$ ). Как видно из Фиг.1, момент сепарации принадлежит интервалу от  $t_H=3$  до  $t_K=4$  часов после события.

5 Задавая сетку времени внутри отрезка  $[t_H, t_K]$  и решая систему (4) для моментов  $t_q$ , соответствующих узлам сетки, в качестве момента сепарации принимают время  $t_q^{min}$ , для которого сумма квадратов невязок системы (4) минимальна. Общая схема алгоритма, позволяющего найти оценки  $\hat{t}_q$ ,  $\widehat{\rho N_j}$ ,  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ , приведена на Фиг.2.

10 Второй этап решения задачи идентификации ядерного взрыва - определение для каждого фиксированного момента сепарации  $t_q$  оценок решения  $\widehat{\rho N_j}$ . При заданном  $t_q$  система (4) является линейной относительно неизвестных  $\widehat{\rho N_j}$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ . Поскольку элементы двумерного сигнала  $A = \{a_{ij}(t_q, t)\}$  не могут быть точно рассчитаны (независимые выходы известны с погрешностями) и активности изотопов  $\tilde{A}_i(t)$  также 15 измерятся с ошибками, будем считать, что элементы двумерного сигнала  $A$  и измеренные активности  $\tilde{A}_i(t)$  - независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с математическими ожиданиями, равными  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$  и  $\tilde{A}_i^{true}(t)$ , и дисперсиями, равными  $\sigma^2(a_{ij}(t_q, t))$  и  $\sigma^2(\tilde{A}_i(t))$ , соответственно:

$$a_{ij}(t_q, t) = a_{ij}^{true}(t_q, t) \pm \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

25  $\tilde{A}_i(t) = \tilde{A}_i^{true}(t) \pm \delta_i$ , где  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$ ,  $\tilde{A}_i^{true}(t)$  - истинные значения удельных и измеренных активностей изотопов (которые нам неизвестны);  $\varepsilon_{ij}$  - погрешности определения удельных активностей  $a_{ij}(t_q, t)$ ;  $\delta_i$  - ошибки измерения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  РБГ в атмосфере.

30 Для учета погрешностей как в измеренных активностях  $\tilde{A}_i(t)$ , так и в элементах двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  используется определение ортогональной регрессии [4] и в силу независимости случайных величин  $a_{ij}(t_q, t)$  и  $\tilde{A}_i(t)$  можно записать сигнал:

$$E_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2}{\sigma^2(\tilde{A}_i(t))} + \sum_{j=1}^m \frac{(a_{ij}(t_q, t) - a_{ij}^{true}(t_q, t))^2}{\sigma^2(a_{ij}(t_q, t))} \right], \quad (6)$$

45 где  $(\rho N_j)$ ,  $j = \overline{1, m}$  - подлежащие определению вклады источников радиоактивности в суммарную активность;  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$  - неизвестные точные значения удельных активностей, оценки которых определяются в процессе нахождения  $\rho N_j$ ,  $a_{ij}(t_q, t)$  - удельные активности, рассчитанные по формулам (2)-(3) по имеющим погрешности независимым и кумулятивным выходам элементов изобарных цепочек радиоактивных превращений;  $\tilde{A}_i(t)$  - измеренные в пробе активности РБГ.

50 В сигнале (6) наряду с неизвестным вектором вкладов источников радиоактивности  $\rho N_j$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , неизвестными также являются истинные значения вычисляемых активностей  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , для поиска оценок которых используется конфлюэнтный анализ [3, 4].

В точке минимума сигнала (6) должны выполняться условия:

$$\frac{\partial F_1}{\partial(\rho N_j)} \Big|_{\rho N_j = \widehat{\rho N_j}} = 0, \quad j=1,2,\dots,m; \quad (7)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial a_{ij}^{true}(t_q, t)} \Big|_{a_{ij}^{true}(t_q, t) = \widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)} = 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

Структурная схема поиска минимума сигнала (6) приведена на Фиг.3 - она соответствует блоку 1 структурной схемы Фиг.2.

Несмотря на линейность при фиксированном  $t_q$  систем уравнений (7)-(8), задача является вычислительно некорректной в силу плохой обусловленности системы (7). Отношение максимального и минимального собственных чисел матрицы системы (7) достигает порядка 10. Поэтому для ее решения необходимо применение специфических методов, в предлагаемом способе это методы многокритериального математического программирования, в которых не требуется определять значение параметра регуляризации, как в других методах решения некорректных задач.

На первом шаге при  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) = a_{ij}(t_q, t)$  решают СЛАУ (7) методами многокритериального математического программирования (метод сжатия области допустимых значений, целевой программирование) и находят первое приближение оценки  $(\widehat{\rho N_j})_1$ .

Для получения оценок истинных значений  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  при заданном значении  $t_q$  на каждом шаге получения оценок  $\widehat{\rho N_j}$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , используется условие (8) [3], что приводит к решению дополнительно  $n$  систем линейных уравнений с  $m$  неизвестными следующего вида:

$$\sum_{r=1}^m \frac{(\widehat{\rho N_r})(\widehat{\rho N_v})}{\sigma^2(\widetilde{A}_i(t))} \widehat{a}_{ir}^{true}(t_q, t) + \frac{\widehat{a}_{iv}^{true}(t_q, t)}{\sigma^2(a_{iv})} = \frac{a_{iv}(t_q, t)}{\sigma^2(a_{iv}(t_q, t))} + \frac{(\widehat{\rho N_v})\widetilde{A}_i(t)}{\sigma^2(\widetilde{A}_i(t))},$$

$$i=1, 2, \dots, n, v=1, 2, \dots, m.$$

Полученные оценки значений  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  должны удовлетворять естественному условию, то есть принадлежать области неопределенности измеренных значений  $a_{ij}(t_q, t)$  :

$$|a_{ij}(t_q, t) - \widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)| \leq 3\sigma(a_{ij}(t_q, t)) \quad , i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m,$$

Если это условие не выполняется, то  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , которые не удовлетворяют этому неравенству, следует заменить на значения ближайших граничных точек. Из-за этого может происходить увеличение значений функционала  $F_1$  на новых точных значениях переменных по сравнению с предыдущим шагом итерационного процесса, что приводит к снижению скорости сходимости итерационного процесса или к возникновению колебаний. Чтобы значения функционала не увеличивались после пересчета оценок  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ ,  $j=1,2 \dots, m$ , те наборы оценок  $\widehat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ , для которых произошло увеличение соответствующих слагаемых функционала  $F_1$  по сравнению с их значениями на предыдущей итерации, следует заменить на соответствующие значения для

предыдущего шага.

После определения оценок истинных значений  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  находят очередное приближение  $\widehat{\rho N_j}$  к решению  $\rho N_j, j=1, 2, \dots, m$  методами многокритериального математического программирования вместо регуляризации А.Н.Тихонова, как это делается в аналоге.

Критерием останова алгоритма является несущественное различие значений функционала  $F_1$  и компонентов вектора  $\rho N_j$  на соседних итерациях, т.е. выполнение

$$\left\| \frac{\left( \widehat{\rho N_j} \right)_l - \left( \widehat{\rho N_j} \right)_{l-1}}{\left( \widehat{\rho N_j} \right)_l} \right\| < \gamma_1, \quad (9)$$

$$\left| \frac{F_1 - F_{1-1}}{F_1} \right| < \gamma_2,$$

где  $\left( \widehat{\rho N_j} \right)_l$  - очередное приближение к решению на l-й итерации;  $\gamma_1, \gamma_2$  - некоторые числа (малые десятичные дроби, например, 0,001), определяющие точность вычисления значений оценок  $\widehat{\rho N_j}$ .

При решении методами многокритериального математического программирования:

1) Формируют двухкритериальную задачу математического программирования:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 \rightarrow \min_{\rho N_j} \quad (10)$$

$$J_2 = \sum_{j=1}^m \rho N_j \rightarrow \min_{\rho N_j}$$

при ограничениях  $\rho N_j \geq 0, j = \overline{1, m}$ .

2) Используя метод пороговой оптимизации или целевое программирование, от двухкритериальной задачи математического программирования (10) переходят к однокритериальной задаче посредством перевода всех, кроме одного, из вышеуказанных функционалов в условия ограничений.

Метод пороговой оптимизации (или метод е-ограничений) приводит к различным возможным комбинациям целевых функций и ограничений. В алгоритме используют следующие их виды:

$$\min_{\rho N_j} \sum_{i=1}^n \left( \bar{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 \text{ при } \sum_{j=1}^m \rho N_j \leq \delta; \rho N_j \geq 0, j = \overline{1, m}; \quad (11)$$

$$\min_{\rho N_j} \sum_{j=1}^m \rho N_j \text{ при } \sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 \leq \beta; \rho N_j \geq 0, j = \overline{1, m}; \quad (12)$$

Задача (11) является задачей квадратичного программирования, задача (12) - задачей нелинейного программирования.

Оценки правых частей ограничений  $\delta$  и  $\beta$  могут быть получены при независимой минимизации функционалов  $J_1$  и  $J_2$  при ограничениях  $\rho N_j \geq 0, j = \overline{1, m}$ . При этом может использоваться любой из методов математического программирования.

В целевом программировании существует две модели решения - архимедова и модель с приоритетами.

При использовании архимедовой модели все целевые функции переводят в ограничения и осуществляют минимизацию взвешенной суммы меры их отклонений от ограничений:

$$\min_{d_1, d_2} \{w_1 d_1 + w_2 d_2\} \text{ при } J_1(\rho N_j) + d_1 \leq \beta, J_2(\rho N_j) + d_2 \leq \delta, \quad (13)$$

где  $w_i$  - весовые коэффициенты.  $\sum_{i=1}^2 w_i = 1$ ;  $d_i$  - отклонения от ограничений.

В модели с приоритетами осуществляют последовательный перевод целевых функций в ограничения и минимизацию отклонения значений целевых функций от ограничений. При этом найденное на данном шаге значение отклонения  $d_i$  используют как оптимальное отклонение на следующем  $i+1$  шаге:

$$\text{шаг 1: } \min_{d_1} (-d_1) \text{ при } J_1(\rho N_j) + d_1 \leq \beta;$$

$$\text{шаг 2: } \min_{d_2} (-d_2) \text{ при } J_1(\rho N_j) + d_{1\text{опт}} |_{d_{1\text{опт}}=d_1} \leq \beta, J_2(\rho N_j) + d_2 \leq \delta. \quad (14)$$

При идентификации ядерного взрыва по малому числу изотопов ксенона используется тот факт, что выход этих изотопов слабо зависит от энергии нейтронов. Это иллюстрирует Фиг.4, на которой представлены графики усредненных кумулятивных выходов изотопов  $\text{Xe}^{133}$  и  $\text{Xe}^{135}$  в зависимости от долей кумулятивных выходов, соответствующих нейтронам спектра деления и нейтронам с энергией 14 МэВ. Кумулятивные выходы известны с погрешностями до 5%. Из Фиг.4 видно, что усредненные значения выходов (для примера приведены значения, соответствующие равным долям нейтронам спектра деления и нейтронам с энергией 14 МэВ) укладываются в эти погрешности.

Для идентификации по 2...4 измеренным изотопам применяют объединения двух видов деления урана 235 (нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ) в один вид деления и двух видов деления плутония 239 (нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ) в один вид деления, что приводит к сокращению числа идентифицируемых видов деления (вместо четырех рассматривается два).

При этом удельную активность рассчитывают

1) для делящегося материала урана 235 по формуле (2) с вектором независимых выходов  $\eta^{U^{235}} = c_1 \eta^{U_i^{235}} + (1 - c_1) \eta^{U_{14}^{235}}$ , где  $\eta^{U_i^{235}}$  и  $\eta^{U_{14}^{235}}$  - независимые выходы элементов изобарных цепочек при делении урана 235 нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ, соответственно;  $c_1$  - параметр, учитывающий доли независимых выходов  $\eta^{U_i^{235}}$  и  $\eta^{U_{14}^{235}}$  в их сумме,  $c_1 \in [0, 1]$ ;

2) для делящегося материала плутония 239 по формуле (2) с вектором независимых выходов  $\eta^{Pu^{239}} = c_2 \eta^{Pu_i^{239}} + (1 - c_2) \eta^{Pu_{14}^{239}}$ , где  $\eta^{Pu_i^{239}}$  и  $\eta^{Pu_{14}^{239}}$  - независимые выходы элементов изобарных цепочек при делении плутония 239 нейтронами спектра деления и нейтронами с энергией 14 МэВ, соответственно;  $c_2$  - параметр, учитывающий доли независимых выходов  $\eta^{Pu_i^{239}}$  и  $\eta^{Pu_{14}^{239}}$  в их сумме,  $c_2 \in [0, 1]$ .

Задавая по  $c_1$  и  $c_2$  двумерную сетку с шагом  $\Delta c_1$  и  $\Delta c_2$ , соответственно, и находя минимум сигнала (6) для разных  $c_1$  и  $c_2$ , за истинные вклады источников  $\rho N^{U^{235}}$  и  $\rho N^{Pu^{239}}$  в суммарную активность изотопов криптона и ксенона принимают те, при

которых сумма квадратов невязок системы (2) минимальна.

Таким образом, предлагаемый способ идентификации параметров ядерного взрыва осуществляют следующим образом:

1. Измеряют в атмосфере активности  $\tilde{A}_i(t)$  отдельных изотопов криптона и ксенона ( $Kr^{83m}$ ,  $Kr^{85m}$ ,  $Kr^{85}$ ,  $Kr^{88}$ ,  $Xe^{131m}$ ,  $Xe^{133m}$ ,  $Xe^{133}$ ,  $Xe^{135}$ ) ( $t$  - момент измерения), где  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  - число измеряемых изотопов.

2. Для различных видов делящегося материала ( $U_F^{235}$ ,  $U_{14}^{235}$ ,  $Pu_F^{239}$ ,  $Pu_{14}^{239}$ ) строят зависимости отношения активностей изотопов (например,  $Kr^{85m}/Xe^{135}$ ) от времени без учета сепарации в интервале от момента возникновения события (ядерного взрыва) до момента измерения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  изотопов криптона и ксенона.

3. Из измеренных экспериментальных точек определяют в «обратном времени» отношения изотопов (например,  $Kr^{85m}/Xe^{135}$ ) до их совпадения со значениями относительной активности этих же изотопов без учета сепарации.

4. По совпадению значений определяют интервал времени  $[t_H, t_K]$  на котором произошла сепарация изотопов криптона и ксенона от их предшественников по изобарным цепочкам радиоактивных превращений.

5. На интервале  $[t_H, t_K]$  задают сетку по времени с шагом  $\Delta t$ .

6. Для каждого узла сетки  $t_q$  формируют и запоминают двумерный сигнал удельных активностей изотопов криптона и ксенона

$$a_{ij}(t_q, t) = \begin{cases} a_{ij}(t) & \text{при } t < t_q, \\ a_{ij}^{t_q}(t_q, t) & \text{при } t > t_q, \end{cases} \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

в котором строки соответствуют конкретному изотопу, а столбцы - конкретному виду деления;  $m$  - число рассматриваемых видов деления. При этом  $a_{ij}(t)$  соответствует значению удельной активности  $i$ -го изотопа для  $j$ -го вида деления, рассчитанной до момента сепарации  $t_q$  по формуле (2), а  $a_{ij}^{t_q}(t_q, t)$  - рассчитанной на момент времени  $t$ , превышающий момент сепарации  $t_q$  по формуле (3).

7. Считая, что измеренные значения активностей  $\tilde{A}_i(t)$  и элементы двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  являются статистически независимыми величинами, распределенными по нормальному закону с математическими ожиданиями  $\tilde{A}_i^{true}(t)$  и  $a_{ij}^{true}(t_q, t)$  и среднеквадратическими отклонениями  $\sigma(\tilde{A}_i(t))$  и  $\sigma(a_{ij}(t_q, t))$  соответственно, формируют по формуле (6) одномерный сигнал  $F_j$ .

8. Задают числа  $\gamma_1, \gamma_2$ , характеризующие точность оценивания  $\widehat{\rho N_j}$  и  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ .

9. На первой итерации, принимая  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) = a_{ij}(t_q, t)$  (а на последующих итерациях  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) = \hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ ), формируют двухкритериальную задачу математического программирования.

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m a_{ij}^{true}(t_q, t) \cdot (\rho N_j) \right)^2 \rightarrow \min_{\rho N_j}$$

$$J_2 = \sum_{j=1}^m \rho N_j \rightarrow \min_{\rho N_j}$$

при ограничениях  $\rho N_j \geq 0, j = \overline{1, m}$ .

10. Используя метод сжатия области допустимых значений или целевое

программирование, от двухкритериальной задачи математического программирования по формулам (11)-(14) переходят к однокритериальной задаче посредством перевода всех, кроме одного, из вышеуказанных функционалов в условия ограничения.

5 11. Методами квадратичного программирования, нелинейного программирования, целевого программирования (архимедова модель и модель с приоритетами) находят первое приближение оценки вкладов активностей отдельных источников  $(\widehat{\rho N_j})_1$  в

10 суммарную активность.

12. Получив первое приближение  $(\widehat{\rho N_j})_1$ , уточняют элементы двумерного сигнала

$\{a_{ij}(t_q, t)\}$ . Для этого дополнительно решают n систем линейных уравнений с m

15 неизвестными вида:

$$\sum_{r=1}^m \frac{(\rho N_r)(\rho N_v) \hat{a}_{ir}^{true}(t_q, t) + \hat{a}_{iv}^{true}(t_q, t)}{\sigma^2(\tilde{A}_i(t))} = \frac{a_{iv}(t_q, t)}{\sigma^2(a_{iv}(t_q, t))} + \frac{(\rho N_v) \tilde{A}_i(t)}{\sigma^2(\tilde{A}_i(t))},$$

куда вместо  $i=1, 2, \dots, n, v=1, 2, \dots, m,$

20  $(\rho N_j)$  подставляют приближение оценки  $(\widehat{\rho N_j})_1$ , найденное на первой итерации.

13. Проверяют, удовлетворяют ли новые значения  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  естественной области неопределенности элементов  $a_{ij}(t_q, t)$ :

$$25 \quad |a_{ij}(t_q, t) - \hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)| \leq 3\sigma(a_{ij}(t_q, t)) \quad , i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m.$$

Если это условие не выполняется, то  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t), j=1, 2, \dots, m,$  которые не

30 удовлетворяют этому неравенству, заменяют на значения ближайших граничных точек. Из-за этого может происходить увеличение значений сигнала  $F_1$  на новых

значениях переменных  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  по сравнению с предыдущим шагом итерационного

процесса, что приводит к снижению скорости сходимости итерационного процесса и

возникновению колебаний. Чтобы значения сигнала  $F_1$  не увеличивались после

35 пересчета оценок  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t), j=1, 2, \dots, m,$  те наборы оценок  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t), j=1, 2, \dots, m,$

для которых происходит увеличение соответствующих слагаемых сигнала  $F_1$  по

сравнению с их значениями на предыдущей итерации, заменяются на соответствующие значения для предыдущего шага.

40 14. Операции, перечисленные в пп.9-13, повторяются до тех пор, пока не будут выполнены условия:

$$45 \quad \left\| \frac{(\widehat{\rho N_j})_1 - (\widehat{\rho N_j})_{1-1}}{(\widehat{\rho N_j})_1} \right\| < \gamma_1,$$

$$\left| \frac{F_1 - F_{1-1}}{F_1} \right| < \gamma_2.$$

50 15. Для идентификации ядерного взрыва по малому числу изотопов (2...4 изотопа) задают двумерную сетку по  $s_1$  и  $s_2$  с шагом  $\Delta s_1$  и  $\Delta s_2$ , соответственно, где  $s_1$  и  $s_2$  веса для суммирования независимых и кумулятивных выходов элементов ИЦРП.

16. Для каждого значения  $s_1$  и  $s_2$  вычисляют векторы независимых выходов

$$\eta^{U^{235}} = c_1 \eta^{U_i^{235}} + (1 - c_1) \eta^{U_i^{235}} \quad \text{и} \quad \eta^{Pu^{239}} = c_2 \eta^{Pu_i^{239}} + (1 - c_2) \eta^{Pu_i^{239}}.$$

17. Для каждой пары векторов  $\eta^{U^{235}}$  и  $\eta^{Pu^{239}}$  рассчитывают и запоминают двумерный сигнал удельной активности  $\{a_{ij}(t_q, t)\}_{c_1 c_2}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, 2}$ .

18. Для каждого двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}_{c_1 c_2}$  производят операции пп.6-13 до выполнения условия п.14.

19. Из оценок сигналов  $(\widehat{\rho N_j})_{c_1 c_2}$ , найденных при решении задачи идентификации ядерного взрыва, при соответствующем двумерном сигнале  $\{a_{ij}(t_q, t)\}_{c_1 c_2}$  выбирают ту, при которой значение  $\sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m (a_{ij}^{true}(t_q, t))_{c_1 c_2} (\widehat{\rho N_j})_{c_1 c_2} \right)^2$  минимально.

20. В качестве момента сепарации принимают  $t_q$ , при котором отношение

$$\sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m \hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) (\widehat{\rho N_j}) \right)^2 / \sum_{j=1}^m (\widehat{\rho N_j})^2 \quad \text{минимально.}$$

На общей блок-схеме алгоритма (Фиг.2) блок «Ввод интервала сепарации  $[t_H, t_K]$ , шага внутри интервала  $\Delta t$ » соответствует пп.4, 5; блок «Минимизация сигнала  $F_1(t_q, \widehat{\rho N_j}, \hat{a}_{ij}^{true})$  по  $t_q$ » - п.20. Основная часть алгоритма вынесена в Блок 1 «поиск оценок  $\widehat{\rho N_j}, \hat{a}_{ij}^{true}$ », схема которого приводится на Фиг.3. Блок «Ввод исходных данных  $t_q, \tilde{A}_i(t), \sigma(\tilde{A}_i(t)), \sigma(a_{ij}(t_q, t)), \gamma_1, \gamma_2$ » соответствует пп.1, 7, 8 способа; блок «Расчет элементов двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  для случая мгновенного деления» - пп.6, 17 способа; блок «Сетка по  $c_1$  и  $c_2$ . Формирование усредненных независимых и кумулятивных выходов» - пп.15, 16 способа; блок «Инициализация  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) = a_{ij}(t_q, t)$ » - п.9 способа. В блоке «Поиск приближения  $\widehat{\rho N_j}$  методами многокритериального математического программирования» выполняются операции пп.9-11 способа; блок «Решение систем линейных уравнений для получения очередного приближения  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$ » реализует п.12, а блоки « $|\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t) - a_{ij}(t_q, t)| \leq 3\sigma(a_{ij}(t_q, t))$ , «Замена оценок  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  на значения граничных точек», «Замена оценок  $\hat{a}_{ij}^{true}(t_q, t)$  на значения с предыдущей итерации» и связывающие их условия соответствуют п.13 способа. В блоке «Условие выхода выполнено» реализуется п.14 способа, а в блоке «Выбор оптимального решения для усредненных выходов» - п.19.

Проведено имитационное моделирование реализации предлагаемого способа на персональном компьютере с процессором Intel Celeron 2,40 ГГц с объемом оперативной памяти 768 Мбайт в математическом пакете Matlab 7.0.

Имитировались ситуация отбора пробы через 6 дней после взрыва и измерения активностей 5 изотопов ( $Kr^{85m}, Xe^{131m}, Xe^{133m}, Xe^{133}, Xe^{135}$ ). Результаты рассчитаны при условии, что момент сепарации предполагается известным и равен 3 часам после события. Значения измеряемых активностей были аддитивно «зашумлены» гауссовым шумом со среднеквадратическим отклонением, равным 5% от их «точного» значения.

Рассматривались следующие комбинации видов деления (возможные наборы

переменных  $\rho N_j$ :

1)  $U_{th}^{235}$  +фон по  $Xe^{133}$  (два неизвестных источника);

2)  $U_{th}^{235} + U_f^{235} + U_{14}^{235}$  (три неизвестных источника);

5 3)  $U_{th}^{235} + Pu_f^{239} + Pu_{14}^{239}$  (три неизвестных источника);

4)  $U_f^{235} + U_{14}^{235}$  (два неизвестных источника);

5)  $U_f^{235} + U_{14}^{235}$  +фон по  $Xe^{133}$  (три неизвестных источника);

6)  $Pu_f^{239} + Pu_{14}^{239}$  (два неизвестных источника);

10 7)  $Pu_f^{239} + Pu_{14}^{239}$  +фон по  $Xe^{133}$  (три неизвестных источника);

8)  $U_f^{235} + U_{14}^{235} + Pu_f^{239} + Pu_{14}^{239}$  (четыре неизвестных источника);

9)  $U_f^{235} + U_{14}^{235} + Pu_f^{239} + Pu_{14}^{239}$  +фон по  $Xe^{133}$  (пять неизвестных источников), где  $U_{th}^{235}$  -

15 реакторный выброс (данные по реакторам взяты из справочной литературы).

Истинным решением является комбинация 4, относительный вклад  $U_f^{235}$  равен 100,

относительный вклад  $U_{14}^{235}$  равен 100. Результаты моделирования сведены в таблицу 1.

20 В строке «Метод решения» указаны 4 метода решения задачи идентификации ядерного взрыва (Квадратичное программирование, Нелинейное программирование, Архимедова модель. Модель с приоритетами), предлагаемые в данном способе, которые сравнивались с методом решения, используемым в аналоге (Регуляризация Тихонова).

25 В строке «Номер комбинации видов деления» указан номер комбинации видов деления, обеспечившей для соответствующего метода решения (регуляризации Тихонова, методов многокритериального математического программирования) из всех 9 комбинаций наименьшую сумму квадратов невязок системы уравнений (4).

30 В строке «Порядок числа обусловленности матрицы системы» указаны порядки чисел обусловленности матрицы системы (4), соответствующей приведенной во второй строке таблицы комбинации видов деления.

35 В строке «Оценка решения» приведены оценки вкладов видов деления, присутствующих в указанных во второй строке таблицы комбинациях видов деления. Например, для регуляризации Тихонова наилучшей с точки зрения суммы квадратов невязок является комбинация 2. Этой комбинации соответствуют три вида деления:  $U_{th}^{235}$ , рассчитанный относительный вклад которого 35,99;  $U_f^{235}$ , рассчитанный относительный вклад которого 42,97 и  $U_{14}^{235}$ , рассчитанный относительный вклад которого 110,27. Аналогично для остальных методов решения.

40 В строке «Сумма квадратов невязок» приведены значения суммы квадратов невязок системы уравнений (4), рассчитанных для указанных в таблице комбинаций видов деления и оценок их вкладов в суммарную активность изотопов криптона и ксенона.

45 В строке «Время работы алгоритма, мин» указано в минутах время получения оценки вкладов соответствующим методом.

Таблица 1

Результаты решения задачи идентификации разными методами (источником радиоактивности является  $U_f^{235}$  и  $U_{14}^{235}$ , точное решение 100 и 100)

Метод решения	Регуляризация Тихонова	Квадратичное программирование	Нелинейное программирование	Архимедова модель	Модель с приоритетами
Номер комбинации видов деления	2	9	9	9	9

Порядок числа обусловленности матрицы системы	$10^6$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$
5 Оценка решения	35,99	84,94	43,53	84,94	84,94
	42,97	108,18	120,76	108,18	108,18
	110,27	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,00	0,00	0,00	0,00
		10,99	0,00	10,98	10,99
		0,00	0,00	0,00	0,00
10 Сумма квадратов невязок	751,39	74,97	5096,43	74,97	74,97
Время работы алгоритма, мин	1,46	9,28	11,95	13,40	19,78

Из таблицы 1 видно, что метод регуляризации Тихонова дал отрицательный результат - в решении присутствует значительный относительный вклад атомного реактора (которого нет в истинном решении). В методах многокритериального программирования (квадратичное, нелинейное, целевое программирование (архимедова модель и модель с приоритетами)) при использовании дополнительного условия на неотрицательность переменных получено положительное решение. Оптимальный результат соответствует девятой комбинации видов деления. Это не противоречит истинному решению, так как вклады тех видов деления, которых не было в истинном решении, незначительны (большинство равны нулю).

Таким образом, преимуществами предлагаемого способа являются:

Повышение эффективности и достоверности идентификации параметров ядерного взрыва за счет: одновременной проверки разных комбинаций видов деления методами многокритериального математического программирования, не требующих вычисления параметра регуляризации, использования дополнительных ограничений, налагаемых на решение и соответствующих физической постановке задачи (неотрицательность, ограниченность решения), применения одновременно разных целевых функций и объединения двух видов деления одного материала нейтронами двух энергетических групп в один вид деления, т.е. сокращения числа неизвестных в системах уравнений.

Источники информации

1. А.с. СССР №366771. Способ определения концентрации изотопов инертных газов в смеси продуктов деления. Авторы: Грешилов А.А., Колобашкин В.М.

2. Грешилов А.А., Тетюхин А.А. Алгоритм идентификации источников радиоактивных благородных газов. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Естественные науки», 2003. №2, с.3-19.

3. Грешилов А.А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов / А.А.Грешилов - Изд. 2-е доп., М.: Университетская книга; Логос, 2009. - 360 с.: ил.

4. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: Учеб. пособие для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. - 584 с.

#### Формула изобретения

1. Способ идентификации ядерного взрыва по радиоактивным изотопам криптона и ксенона, характеризующийся измерением на момент времени  $t$  после события сигналов  $\tilde{A}_i(t)$ , описывающих изменение суммарной активности каждого изотопа в атмосфере близ измеряющей станции, построением отношений активностей изотопов от времени без учета сепарации и отношений активностей изотопов, проведенных из измеренных

точек в обратном времени для всех рассматриваемых видов деления, определением интервала сепарации  $[t_H, t_K]$ , заданием сетки времени внутри интервала сепарации  $[t_H, t_K]$ , формированием комбинаций видов деления, вычислением для каждого узла сетки  $t_q$  внутри интервала сепарации и каждой комбинации двумерного сигнала  $A$ ,  
 описывающего значения «удельных» активностей каждого изотопа в зависимости от  
 момента сепарации  $t_q$  и времени измерения  $t$  и потенциального источника (делящегося  
 материала и энергии нейтронов), заданием среднеквадратических значений  $\sigma(\tilde{A}_i(t))$

погрешностей измеренных сигналов  $\tilde{A}_i(t)$  и погрешностей  $\sigma(a_{ij}(t_q, t))$   
 элементов двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$ , заданием величин  $\gamma_1, \gamma_2$ ,

определяющих точность вычисления оценки сигналов  $\widehat{\rho N_j}$ , осуществлением

идентификации ядерного взрыва с помощью формирования сигнала  $J_1$ ,  
 определяющего точность решения, получаемого из суммы квадратов разности между  
 сигналами  $\tilde{A}_i(t)$  и произведения строк двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  на значения  
 сигналов  $\rho N_j$ , и сигнала  $J_2$ , определяющего вид сигнала  $\rho N_j$ , формированием сигналов-  
 ограничений и сигнала-цели (целевой функции) из сигналов  $J_1$  и  $J_2$  в заданных  
 комбинациях и нахождением с помощью итерационного процесса при уточнении на  
 каждой итерации значений двумерного сигнала  $\{a_{ij}(t_q, t)\}$  элементов сигнала  $\rho N_j$ ,  
 определением по элементам сигнала  $\rho N_j$  точечных оценок вкладов активности от  
 каждого возможного вида деления в суммарную активность, выбором оптимальной  
 комбинации видов деления по сумме квадратов невязок.

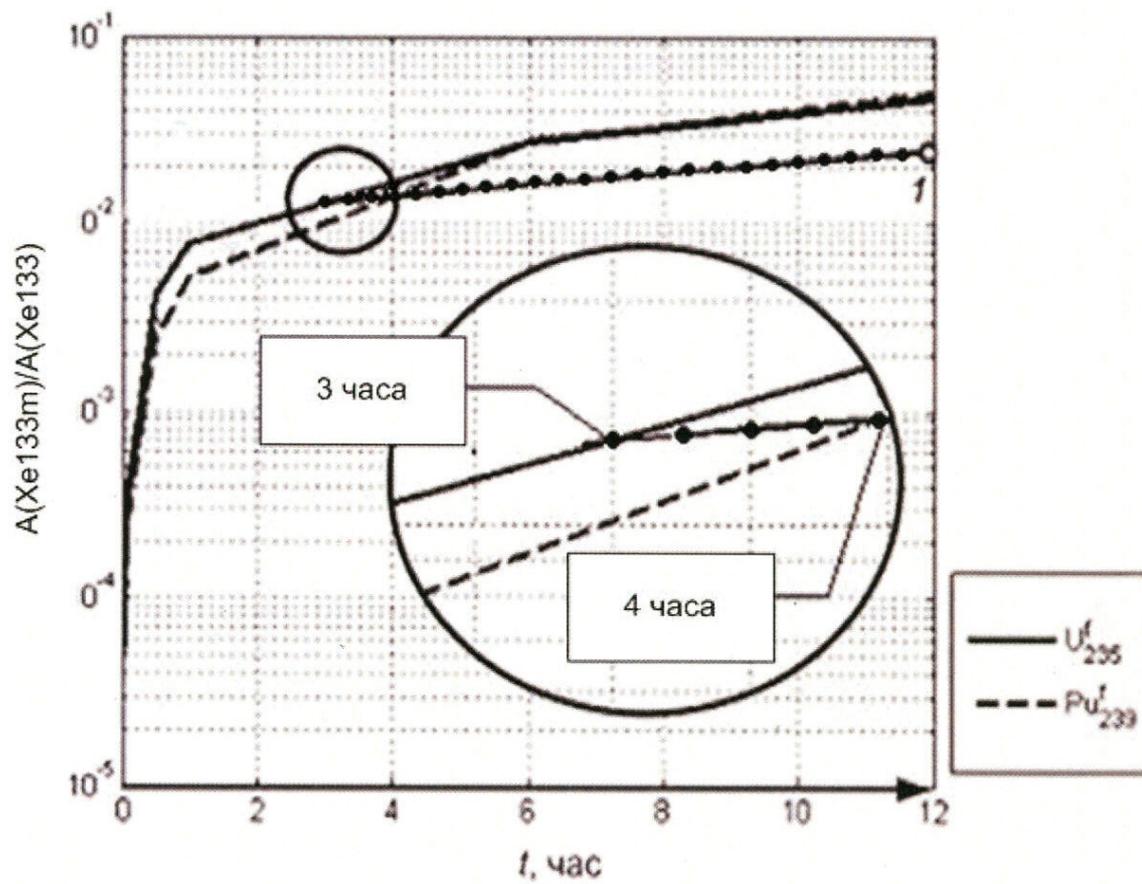
2. Способ по п.1, характеризующийся объединением двух видов деления урана 235 и  
 плутония 239 нейтронами разных энергетических групп в один вид деления  $\eta^{U^{235}}$  и

$\eta^{Pu^{239}}$  соответственно, путем суммирования с весами независимых и кумулятивных  
 выходов элементов изобарных цепочек, соответствующих разным видам деления,  
 формированием двумерной сетки по весам  $c_1$  и  $c_2$ , вычислением для каждой пары

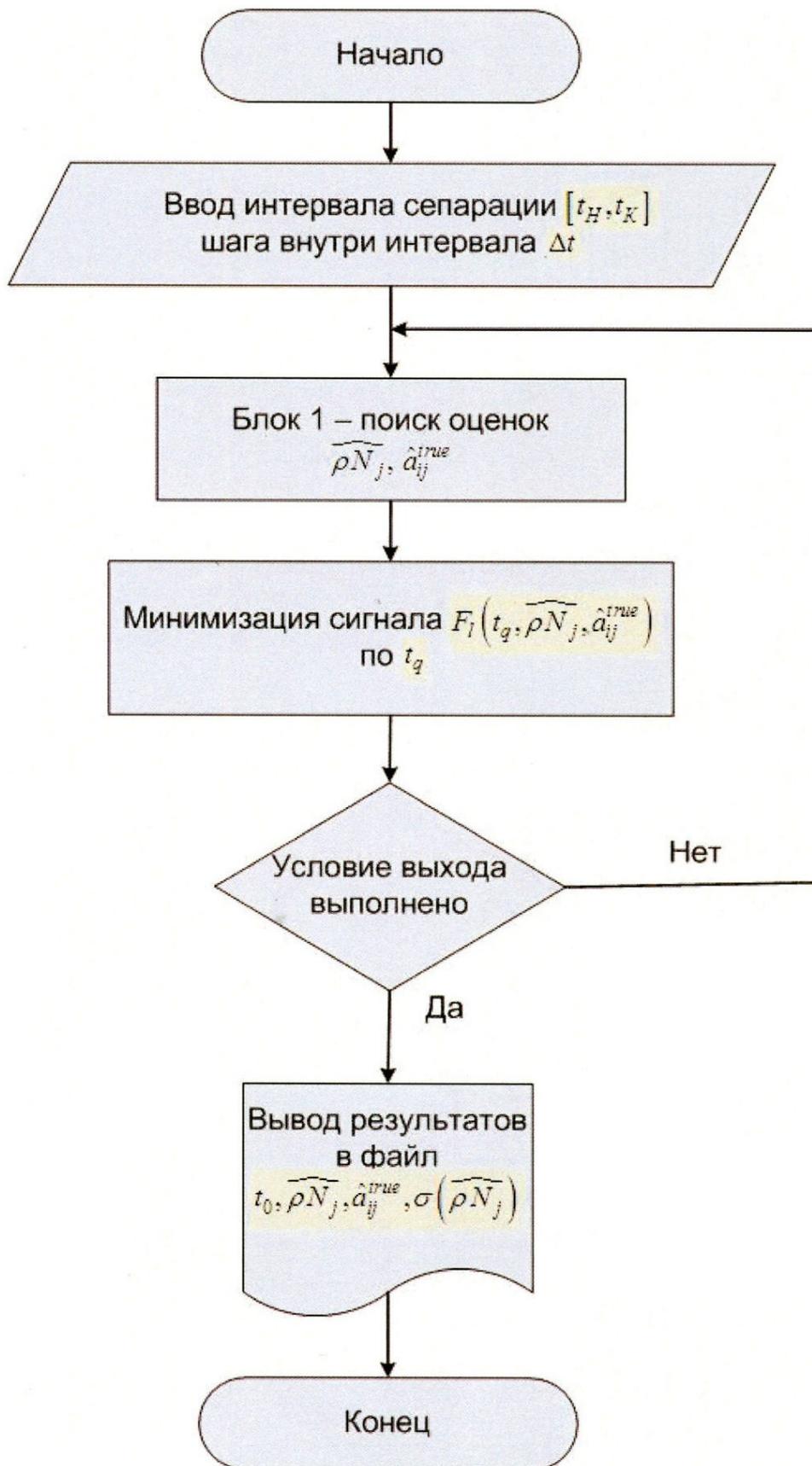
значений весов  $(c_1, c_2)$  элементов двумерного сигнала удельной активности  
 $\{a_{ij}(t_q, t)\}_{c_1 c_2}$ , вычислением по п.1 оценок сигналов  $(\widehat{\rho N_j})_{c_1 c_2}$ , выбором оценки

$(\widehat{\rho N_j})_{c_1 c_2}$ , для которой значение 
$$\sum_{i=1}^n \left( \tilde{A}_i(t) - \sum_{j=1}^m (a_{ij}^{true}(t_q, t))_{c_1 c_2} \cdot (\widehat{\rho N_j})_{c_1 c_2} \right)^2$$

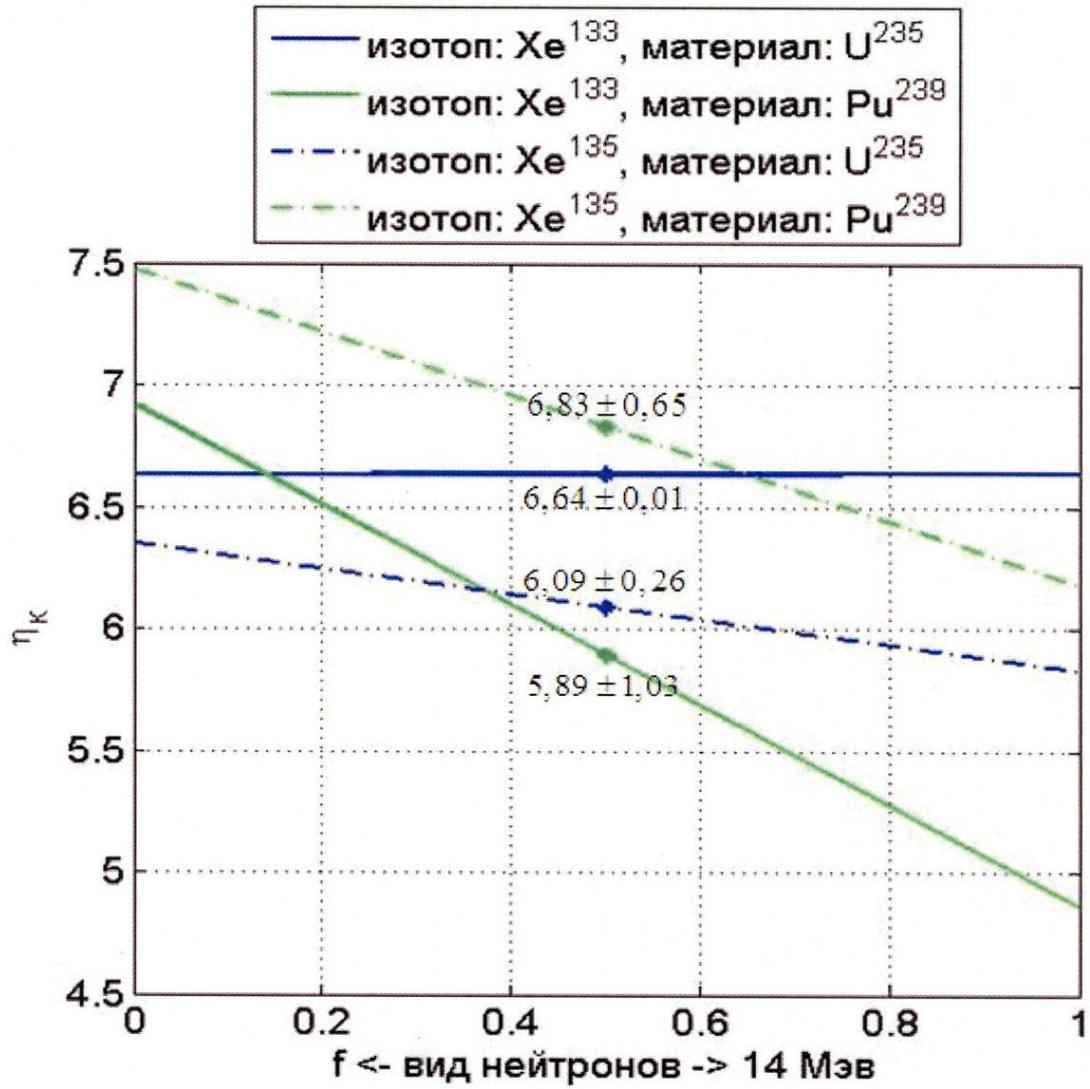
минимально.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 4