(19) Евразийское патентное ведомство

(21) 202291082 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2022.07.28

(22) Дата подачи заявки
2020.10.08

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

(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

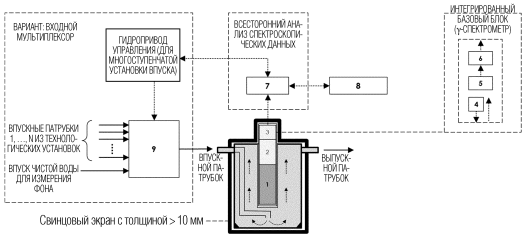
(31) **19202751.4**
(32) **2019.10.11**
(33) **EP**
(86) **PCT/EP2020/078214**
(87) **WO 2021/069548 2021.04.15**

(71) Заявитель:
УМВЕЛЬТ- УНД ИНЖЕНЁРТЕХНИК ГМБХ ДРЕЗДЕН (DE)

(72) Изобретатель:
Мертен Готтфрид Хорст, Шуберт Йенс (DE)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Изобретение относится к способу количественного определения радионуклидов в жидких средах, включающему измерение спектра гамма-излучения, к устройству для количественного определения радионуклидов в жидких средах и применению для количественного определения концентраций радионуклидов в гидрометаллургических технологических средах, в частности количественного определения концентраций урана и/или продуктов радиоактивного распада урана в растворах подземного выщелачивания урана или в растворах извлечения урана или количественного определения тория и/или продуктов радиоактивного распада ^{232}Th в технологических растворах редкоземельных элементов.



202291082 A1

202291082 A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-572667EA/022

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Настоящее изобретение относится к способу количественного определения радионуклидов в жидких средах, включающему измерение спектра гамма-излучения, устройству для количественного определения радионуклидов в жидких средах и применению для количественного определения концентраций радионуклидов в гидрометаллургических технологических средах, в частности, количественного определения концентраций урана и/или продуктов радиоактивного распада урана в растворах подземного выщелачивания урана или в растворах извлечения урана или количественного определения тория и/или продуктов радиоактивного распада ^{232}Th в технологических растворах редкоземельных элементов.

Обычно в способах количественного определения ^{235}U в системе с концентрациями ^{226}Ra от очень низких до исчезающе малых обычно применяют гамма-спектроскопию с измерением интенсивности гамма-излучения в пределах характерного для ^{235}U пика 185,7 кэВ (Kaspar и др. 2017). Поскольку ^{238}U не испускает гамма-излучение, его количество в пробе определяют посредством измерения интенсивности пика гамма-излучения с энергией 1001,0 кэВ, испускаемого продуктом цепочки распадов, ^{234m}Pa, при условии, что первые три элемента ^{238}U, ^{234}Th и ^{234m}Pa в цепочке распадов ^{238}U достигли векового равновесия. При условии, что пробы содержат только природный уран, т.е. с относительным содержанием ^{235}U (0,720±0,002)%, интенсивность гамма-пика 185,7 кэВ используют для определения общего количества урана в пробе. Недостатком является то, что ^{226}Ra, как радиоактивный изотоп цепочки распадов ^{238}U, испускает гамма-излучение с основной гамма-линией 186,1 кэВ . Эта гамма-линия накладывается на гамма-линию 185,7 кэВ от ^{235}U в природных системах, например, в урановой руде, в значительной степени. Таким образом, количественное определение концентрации ^{235}U уже не является надежным.

Однако системы с очень низкими или исчезающе малыми концентрациями ^{226}Ra получают высокоизбирательным выщелачиванием урана из природной урановой руды. Таким образом, количественное определение интенсивности пика 185,7 кэВ можно применять для определения концентрации ^{235}U и всего U (Khorfan и др. 2003, Singh и др. 2005, Sundar и др. 2007).

В работе Singh и др. описан способ поточного измерения урана в растворе методом гамма-спектроскопии в контейнере с впуском и выпуском с использованием стандартных растворов известных концентраций (Singh и др. 2005).

В CN 106569250 A раскрывается устройство для поточного измерения концентрации урана в выщелачиваемом шламе урановой руды на основе измерения кристаллом NaI(Tl) площади гамма-пика 185,7 кэВ от ^{235}U. Недостатками раскрытого способа являются помехи от ^{226}Ra и объемные или матричные эффекты, соответственно

основанные на калибровке системы путем применения калибровочного источника на ^{235}U, точечного источника, который не совсем точно представляет объемную шламовую пробу.

В CN 105115993 A и CN 204989064 U описывается устройство для поточного измерения концентрации урана в растворе на основе сцинтиллятора NaI(Tl), детектирующего гамма-излучение из довольно небольшой камеры с раствором. Преимущественно, матричные эффекты снижаются. Недостатком раскрытого способа является ограниченная эффективность.

В CN 105181719 A раскрывается способ поточного измерения концентрации урана в растворе на основе измерения кристаллом NaI(Tl) площади гамма-пика 185,7 кэВ от ^{235}U. В CN 105181719 A описывается калибровка системы с использованием 5 эталонных проб с заданными концентрациями урана в 5M растворе азотной кислоты. Применение данного способа ограничено очень специфическим химическим составом раствора пробы.

В JP S59 141086 A раскрыты способ и устройство для измерения низких концентраций ^{235}U в растворах, которые являются типичными в областях применения для производства ядерного топлива (т.е. для количественного определения обогащения ^{235}U). Спектроскопическое измерение выполняют с использованием детектора гамма-излучения, расположенного снаружи ячейки (трубы) с раствором, относительно внешнего опорного источника гамма-излучения внутри коллимирующей системы. Способ не применим к любым растворам, содержащим несколько испускающих гамма-излучение радионуклидов (т.е. когда для получения надежных результатов потребовалось бы спектральное разложение на основе шаблонов спектров). Матричные эффекты раствора в измерительной ячейке не учитываются в данном общем контексте.

US 2014/0197324 A1 относится к спектроскопии ответного γ-излучения от литологических (или геологических) образований или других пробных объектов (тел человека или животных, растительного вещества, неодушевленных предметов) с использованием гамма-излучающего инструмента, который применяют рядом с пробным объектом. Способ включает в себя спектральное разложение спектров ответного гамма-излучения в энергетическом диапазоне от 100 кэВ до 10 МэВ, чтобы количественно определить концентрацию по меньшей мере одного радионуклида (элемента), который испускает гамма-излучение. Численный анализ выполняется по отношению к заданной величине стандартного спектра гамма-излучения эталонной пробы. US 2014/1197324 A2 не раскрывает в явной форме ни определения шаблонов спектров, характерных для радионуклидов, ни коррекции на матричные эффекты.

JP 2017/161259 A относится к применению гамма-спектроскопии для определения концентраций радионуклидов (описано только для ^{134}Cs, ^{137}Cs и ^{40}K) в загрязненных почвах (например, после аварий ядерных установок). Отдельные функции отклика моделируются с помощью программного обеспечения для расчета прохождения излучения методом Монте-Карло, чтобы выявить спектральные вклады отдельных радионуклидов в измеренный спектр.

В IAEA-TECDOC-1363 сведены общие регулирующие нормы применения гамма-

спектроскопии для картирования радиоактивных элементов (Nicolet and Erdi-Krausz 2003).

В качестве альтернативы, принципы измерения для количественного определения концентраций урана в металлургических технологических средах основаны на спектроскопии характеристического электромагнитного излучения, начиная от фотометрической спектроскопии, гиперспектральных изображений или спектроскопии комбинационного рассеяния до рентгеновской флуоресценции. Недостаток данных способов состоит в том, что они неприменимы или по меньшей мере ненадежны при применениях в промышленности, что обусловлено главным образом значительным ослаблением излучения в пробе, а также в измерительном окне.

Задача настоящего изобретения состоит в том, чтобы предложить способ количественного определения радионуклидов в жидких средах, который преодолевает недостатки уровня техники.

Задача была решена предложением способа количественного определения радионуклидов в жидких средах, включающего следующие этапы:

(a) обеспечение содержащей по меньшей мере один радионуклид жидкой среды в измерительной ячейке, причем в измерительной ячейке расположен детектор гамма-излучения,

(b) измерение амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения жидкой среды детектором гамма-излучения,

(c) обеспечение смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

причем эти шаблоны амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения корректируют на матричные эффекты,

d) реализуемые компьютером идентификация и количественное определение упомянутого по меньшей мере одного радионуклида в жидкой среде с использованием спектральной подгонки измеренного амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения взвешенной комбинацией смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

при этом спектральная подгонка корректирует температурные эффекты и фоновые эффекты.

Употребляемый здесь термин «шаблон спектров гамма-излучения» относится к распределению спектральной характеристики сигналов детектора гамма-излучения для одного источника гамма-излучения в зависимости от амплитуды импульса сигнала детектора гамма-излучения, заданной в энергетическом эквиваленте гамма-излучения, при этом шаблон получают компьютерным моделированием. В настоящей заявке источник гамма-излучения является трехмерным в соответствии с геометрией измерительной ячейки, при этом детектор гамма-излучения расположен в измерительной ячейке.

Употребляемый здесь термин «калибровочный коэффициент» относится к отдельному для каждого радионуклида коэффициенту (характерному для радионуклида), который устанавливает связь концентрации радионуклида в жидкой среде в

измерительной ячейке с параметром интенсивности (спектральным весом) из спектральной подгонки. В предпочтительном варианте калибровочный коэффициент применяется для количественного определения концентрации конкретного радионуклида при заданном спектральном весе из примененной декомпозиции.

Употребляемый здесь термин «моделирование» относится к моделированию прохождения излучения от источника гамма-излучения, предпочтительно, содержащей по меньшей мере один радионуклид объемной жидкой среды в измерительной ячейке, к детектору гамма-излучения, с учетом процессов прохождения в самой среде, в материалах конструкции измерительной ячейки, в детекторе и его корпусе.

Преимущественно, способ по изобретению количественно определяет радионуклиды в жидких средах в реальном времени. Употребляемый здесь термин «реальное время» относится к количественному определению концентраций радионуклидов за короткий период времени, предпочтительно, в диапазоне от 10 с до 10 ч, более предпочтительно от 1 мин до 30 мин, наиболее предпочтительно от 1 мин до 5 мин. Время количественного определения концентрации радионуклида способом по изобретению зависит от времени измерения спектра гамма-излучения жидкой среды детектором гамма-излучения в соответствии с этапом b), в частности, концентрации радионуклида, интенсивности испускания его характерного гамма-излучения и отклика детектора гамма-излучения.

Также преимущественно, способ по изобретению является самокомпенсирующимся, в частности, компенсирующим матричные эффекты, температурные эффекты и фоновые эффекты. Термин «самокомпенсирующийся» относится к компенсации или коррекции, соответственно, матричных эффектов, температурных эффектов и фоновых эффектов в рамках самого способа, в частности, посредством обеспечения смоделированных шаблонов спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов, причем эти шаблоны спектров гамма-излучения корректируются на матричные эффекты.

Матричные эффекты обусловлены, в частности, рассеянием и поглощением гамма-излучения внутри измерительной ячейки и конструкционных материалов. В вариантах осуществления шаблоны амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения корректируют на матричные эффекты посредством настройки моделирования в соответствии с трехмерной геометрией и характеристиками материалов всех компонентов устройства.

Температурные эффекты, которые приводят к изменению масштаба измеренного амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения, учитываются коэффициентом масштабирования амплитуды импульса в ходе процедуры спектральной подгонки. Способ дополнительно включает в себя реализуемые компьютером идентификацию и количественное определение радионуклида с использованием смоделированных шаблонов спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов, при этом измеренный спектр гамма-излучения корректируется на

фоновые эффекты.

Также преимущественно, что при применении способа по изобретению для количественного определения в реальном времени можно применять автоматизированное управление технологическим процессом, в частности, для реагирования на изменения параметров процесса, включая концентрации радионуклидов или элементов, в пределах типичных постоянных времени кинетики технологического процесса.

В вариантах осуществления упомянутый по меньшей мере один радионуклид выбран из группы наиболее распространенных природных испускающих гамма-излучение радионуклидов, предпочтительно из группы, включающей ^{235}U, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{208}Tl, ^{40}K и искусственные радионуклиды. Предпочтительно, все вышеперечисленные испускающие гамма-излучение радионуклиды обычно учитываются при обработке данных в соответствии с этапом c) и этапом d). Интерпретация данных включает в себя периоды полураспада всех радионуклидов в цепочках радиоактивных распадов.

Предпочтительно, упомянутый по меньшей мере один радионуклид является ^{235}U, по меньшей мере одним радионуклидом из цепочки распадов ^{238}U, в частности ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi; по меньшей мере одним радионуклидом из цепочки распадов ^{232}Th, в частности, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{208}Tl; ^{40}K, и/или любым искусственным радионуклидом.

Употребляемый здесь термин «продукт радиоактивного распада» относится к радионуклиду, возникающему в результате цепочки радиоактивных распадов, предпочтительно, из ^{235}U, ^{238}U или ^{232}Th.

Преимущественно, способ по изобретению делает возможным количественное определение искусственных радионуклидов. В вариантах осуществления искусственные радионуклиды являются продуктами деления в виде части отходов ядерных реакторов или от испытаний ядерного оружия, предпочтительно, ^{137}Cs и ^{137m}Ba; или изотопами, используемыми для медицинских или технических применений, предпочтительно, ^{60}Co.

Преимущественно, способ по изобретению применим для жидких сред, содержащих более чем один радионуклид, в частности, сложных смесей радионуклидов, в частности, в условиях неравновесного состояния радионуклидов и продуктов их распада.

В дополнительных вариантах осуществления содержащая по меньшей мере один радионуклид жидкая среда в соответствии с этапом a) выбирается из гидрометаллургических технологических сред, предпочтительно, выщелачиваемых шламов, выщелачивающих растворов, концентрированных технологических растворов и растворов отходов. Предпочтительно, содержащая по меньшей мере один радионуклид жидкая среда выбирается из растворов подземного выщелачивания урана или из растворов извлечения урана, или технологических растворов редкоземельных элементов. Предпочтительно, способ по изобретению можно применять для количественного определения технологических растворов редкоземельных элементов, при этом редкоземельные руды связаны в основном с Th и U вместе со всеми продуктами радиоактивного распада соответствующих цепочек распадов для Th и U.

Преимущественно, выщелачивание урановых руд, например, в выщелачиваемых шламах или выщелачивающих растворах, приводит к избирательному растворению урана, тогда как продукты распада урана, в частности, ^{226}Ra, не растворяются или связываются посредством осаждения в виде вторичных минералов. Таким образом, на спектр ^{235}U с характерной гамма-линией 185,7 кэВ не накладывается спектр ^{226}Ra с характерной гамма-линией 186,1 кэВ и ^{235}U и, следовательно, концентрацию урана можно точно определить количественно. В некоторых вариантах осуществления спектральная подгонка корректирует оставшиеся помехи от гамма-излучения от остаточного ^{226}Ra. Преимущественно, с помощью способа по изобретению можно скорректировать значительные помехи от ^{226}Ra.

В вариантах осуществления содержащая по меньшей мере один радионуклид жидкая среда в соответствии с этапом а) обеспечивается непрерывным потоком. Преимущественно, непрерывный поток дает возможность измерения в реальном времени, в частности, измерения любых изменений состава и концентрации радионуклидов.

В вариантах осуществления жидкая среда обеспечивается в режиме пробкообразного потока. Используемый здесь термин «пробкообразный поток» относится к профилю скорости жидкой среды, в котором скорость текучей среды является почти постоянной по любому сечению измерительной ячейки, перпендикулярному оси измерительной ячейки. Преимущественно, пробкообразный поток является однородным и минимизирует время замены жидкой среды в измерительной ячейке. Требуется очень малое время замены, чтобы минимизировать время выключения измерительного устройства в процессе перехода с технологических сред и чистой воды для измерения фона или в процессе перехода между разными приточными линиями (мультиплексный режим).

В вариантах осуществления жидкая среда обеспечивается (подается) с расходом в диапазоне от 3 л/мин до 6 л/мин. Преимущественно, данный расход делает возможным замену жидкой среды в измерительной ячейке за короткое время, предпочтительно, в диапазоне от 0,1 мин до 2 мин, более предпочтительно в диапазоне от 1 мин до 2 мин.

В соответствии с изобретением измерительная ячейка предназначена для жидких сред и содержит жидкую среду, содержащую по меньшей мере один радионуклид, и детектор гамма-излучения.

В дополнительных вариантах осуществления измерительная ячейка является проточной измерительной ячейкой. В качестве альтернативы, измерительная ячейка является технологическим узлом, предпочтительно, трубой или, предпочтительно, баком с перемешиванием.

В вариантах осуществления измерительная ячейка является цилиндрической.

Предпочтительно, детектор гамма-излучения расположен в центре измерительной ячейки. Употребляемый здесь термин «центр» означает точку, равноудаленную от внешних границ, предпочтительно, цилиндрической измерительной ячейки.

В вариантах осуществления детектор гамма-излучения окружен

водонепроницаемой защитной оболочкой, предпочтительно, цилиндрическим контейнером с двойными стенками.

В дополнительных вариантах осуществления расстояние от внешних границ измерительной ячейки до стенки детектора гамма-излучения составляет в диапазоне от 2 см до 20 см, предпочтительно, в диапазоне от 5 см до 10 см. Преимущественно, детектор гамма-излучения в центре измерительной ячейки с расстоянием от внешних границ измерительной ячейки до стенки детектора гамма-излучения в приведенном диапазоне делает возможным измерение гамма-излучения от пробы большого объема, предпочтительно, пробы фактически бесконечно большого объема, из чего следует, что увеличение объема пробы не приведет к увеличению отклика детектора гамма-излучения. Преимущественно, большой объем пробы приводит к повышению скорости счета (числа событий) и снижению статистической неопределенности измерения. Тем самым сокращается время измерения и возможно измерение в реальном времени. Преимущественно, геометрия измерительной ячейки может быть оптимизирована с учетом основных целевых радионуклидов, испускающих характерное гамма-излучение в соответствующих диапазонах, в самой жидкой среде.

В вариантах осуществления содержащая по меньшей мере один радионуклид жидкая среда в соответствии с этапом a) обеспечивается выщелачиванием и/или переработкой материала или раствора, содержащего по меньшей мере один радионуклид.

В дополнительном варианте осуществления выщелачивание и/или переработка материала или раствора, содержащего по меньшей мере один радионуклид, в соответствии с этапом a) и измерение спектра гамма-излучения жидкой среды в соответствии с этапом b) выполняются в потоке или на месте. Преимущественно, измерение в потоке или на месте делает возможным измерение в реальном времени.

Употребляемый здесь термин «в потоке» (in-line) относится к измерению радионуклидсодержащей среды в технологической линии, при этом измерительная ячейка входит в состав самой технологической линии или технологического узла или соединена с ней или с ним. Преимущественно, измерение в потоке делает возможным быстрое управление процессом.

Употребляемый здесь термин «на месте» (in-situ) относится к измерению концентраций радионуклидов непосредственно в технологической среде, т.е. без отбора проб, подлежащих измерению вне объекта в аналитической лаборатории.

Предпочтительно, способ по изобретению осуществляют в порядке следования этапов a), b), c) и d) или c), a), b) и d) или c).

В вариантах осуществления время измерения гамма-спектра в соответствии с этапом b) составляет в диапазоне от 10 с до 10 ч, предпочтительно, в диапазоне от 1 мин до 30 мин.

В соответствии с изобретением обеспечивают смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты, при этом шаблоны спектров гамма-излучения корректируют на матричные эффекты посредством

моделирования, настроенного для геометрии измерения, т.е. положения детектора гамма-излучения в измерительной ячейке и геометрии самой измерительной ячейки.

Смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты являются основой для спектрального разложения с применением спектральной подгонки.

Употребляемый здесь термин «матричные эффекты» относится к изменениям спектра гамма-излучения, обусловленным поглощением и рассеянием гамма-излучения в жидкой среде, например, гамма-излучение с энергией 185,7 кэВ от ^{235}U поглощается на 50% слоем воды толщиной 4,0 см. Преимущественно, способ по изобретению корректирует матричные эффекты, в частности, сильные матричные эффекты в большом объеме пробы.

Употребляемый здесь термин «температурные эффекты» относится к изменениям сдвигов энергетической шкалы и разрешения и, следовательно, амплитуды импульса для электрона в амплитудно-импульсном спектре, происходящим в результате взаимодействия гамма-излучения в сцинтилляторе вследствие изменений температуры. Преимущественно, использование спектральной подгонки на этапе d) также корректирует температурные эффекты, в частности, сдвиги энергетической шкалы и разрешения.

Предпочтительно, температурные эффекты корректируются коэффициентом масштабирования амплитуды импульса, применяемым в процедуре спектральной подгонки в соответствии с этапом d).

В дополнительных вариантах осуществления смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты на этапе c) получают моделированием с помощью программного обеспечения для статистического расчета прохождения излучения для сложных систем, предпочтительно, с помощью программы Monte Carlo N-Particle (MCNP), разработанной в Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL), или GEANT4. Предпочтительно, применяется программное обеспечение MCNP6.2 (https://mcnp.lanl.gov/). Преимущественно, программное обеспечение для статистического расчета прохождения излучения для сложных систем учитывает геометрию измерения и материал измерительной ячейки, в том числе детектора гамма-излучения, жидкой среды, камеры и всех стенок, экранирующих элементов и, при их наличии, других компонентов. Таким образом, определение калибровочных коэффициентов для отдельных радионуклидов посредством соотнесения концентрации отдельного радионуклида с его абсолютной функцией отклика, измеренной детектором гамма-излучения, предпочтительно проверяется (валидируется) и регулируется в сравнении с аналитическими данными для репрезентативных проб.

В вариантах осуществления смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты на этапе c) обеспечиваются для наиболее распространенных природных испускающих гамма-излучение радионуклидов, предпочтительно, для радионуклидов ^{235}U, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{208}Tl и/или ^{40}K. Преимущественно, все вышеперечисленные природные гамма-излучающие

радионуклиды обычно учитываются при обработке данных в соответствии с этапом c) и этапом d).

Предпочтительно, смоделированные компьютером шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты проверяются на соответствие результатам химического анализа проб радионуклидов, предпочтительно, методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) или прецизионного титрования.

В соответствии с изобретением идентифицируют по меньшей мере один радионуклид в жидкой среде и его концентрацию в жидкой среде количественно определяют с использованием алгоритма спектральной подгонки измеренного амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения взвешенной комбинацией смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов, при этом спектральная подгонка корректирует температурные эффекты.

Употребляемый здесь термин «спектральная подгонка» относится к процедуре, использующей модельную функцию, которая является взвешенной суммой характерных для радионуклида амплитудно-импульсных шаблонов. Преимущественно, при использовании спектральной подгонки спектральный вес всех релевантных отдельных радионуклидов в жидкой среде может быть преобразован в концентрацию отдельного радионуклида на основе калибровочного коэффициента для каждого радионуклида. Каждый характерный для радионуклида амплитудно-импульсный шаблон получается преобразованием энергетических спектров гамма-излучения (т.е. образцов спектров гамма-излучения) в амплитудно-импульсные спектры. Процедура подгонки изменяет веса слагаемых модельной функции (называемые также *весовыми коэффициентами*), а также изменяет параметры для энергетической шкалы и энергетического разрешения. Процедура спектральной подгонки дополнительно содержит преобразование весовых коэффициентов в концентрации с помощью калибровочных коэффициентов. Процедура спектральной подгонки корректирует (т.е. вводит поправку) на фон гамма-излучения.

В вариантах осуществления спектральная подгонка является подгонкой методом минимума хи-квадрат, подгонкой методом правдоподобия, или подобной, предпочтительно, подгонкой методом минимума хи-квадрат.

В вариантах осуществления коррекцию фоновых эффектов производят измерением фонового спектра с чистой водой, предпочтительно, в диапазоне от каждого часа до каждой недели, предпочтительнее, один раз в сутки. Преимущественно, измерение фонового спектра дает возможность идентификации долговременных изменений, в частности, нарастания накипи или эффектов загрязнения или адсорбции, т.е. накопления радионуклид-содержащих веществ на поверхности детектора гамма-излучения или внутренней поверхности измерительной ячейки. Если эффекты накипи или загрязнения превышают допустимый предел, то измерительную ячейку необходимо очистить. Допустимый предел определяется пользователем в зависимости от конкретного

применения.

В вариантах осуществления система управления контролирует фоновые эффекты и/или сигналы, превосходящие допустимый предел.

В дополнительных вариантах осуществления способ по изобретению, в котором упомянутый по меньшей мере один радионуклид является ураном, содержит дополнительный этап, на котором корректируется мешающее воздействие ^{226}Ra на измерение концентраций ^{235}U и/или U. Коррекция мешающего воздействия ^{226}Ra достигается путем количественного определения преобладающих испускающих гамма-излучение радионуклидов цепочки распадов ^{238}U, в частности, ^{214}Bi, ^{214}Pb и ^{226}Ra, и путем ограничения их весовых коэффициентов при подгонке гамма-спектра некоторым фиксированным отношением, т.е. отношением, соответствующим вековому равновесию между ^{214}Bi, ^{214}Pb и ^{226}Ra.

В дополнительных вариантах осуществления способ по изобретению, в котором упомянутый по меньшей мере один радионуклид является ураном, содержит дополнительный этап, на котором суммарная концентрация U вычисляется по концентрации ^{235}U с фиксированным относительным содержанием изотопа ^{235}U (0,720±0,002)%.

В вариантах осуществления спектры гамма-излучения сохраняют, предпочтительно, каждые 10 с - каждую 1 мин. Преимущественно, спектры гамма-излучения, подлежащие анализу посредством спектральной подгонки, выводят из сохраненных спектров гамма-излучения в виде скользящего среднего таким образом, чтобы реализовать подходящие статистические неопределенности.

Другим аспектом изобретения является устройство для количественного определения радионуклидов в жидких средах в соответствии со способом по изобретению.

Предпочтительно, устройство по изобретению содержит блок обработки данных, выполненный с возможностью выполнения этапа d) способа по изобретению.

Другим объектом изобретения является устройство для количественного определения радионуклидов в жидких средах, содержащее:

i. по меньшей мере одну измерительную ячейку,

ii. детектор гамма-излучения, содержащий по меньшей мере один усилитель и по меньшей мере один многоканальный анализатор,

при этом детектор гамма-излучения расположен в измерительной ячейке,

iii. блок обработки данных, содержащий процессор, выполненный с возможностью обеспечения смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

причем эти шаблоны амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения корректируются на матричные эффекты,

и выполнения идентификации и количественного определения по меньшей мере одного радионуклида с использованием спектральной подгонки измеренного амплитудно-

импульсного спектра гамма-излучения взвешенной комбинацией смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

при этом спектральная подгонка корректирует температурные эффекты и фоновые эффекты.

В соответствии с изобретением измерительная ячейка предназначена для жидких сред и содержит жидкую среду, содержащую по меньшей мере один радионуклид, и детектор гамма-излучения.

Предпочтительно, измерительная ячейка предназначена для достижения высокой эффективности детектирования, в частности, для измерения концентрации радионуклидов с достаточной точностью за короткий период времени, за счет оптимизированной геометрии, в частности, большого объема пробы для максимизации статистики подсчета событий при гамма-спектроскопии; и за счет оптимизированной пропускной способности, в частности, пробкообразного потока для обеспечения малых промежутков времени смены объемов.

В вариантах осуществления упомянутая по меньшей мере одна измерительная ячейка является проточной измерительной ячейкой. В качестве альтернативы, измерительная ячейка является технологическим узлом, предпочтительно, трубой или баком, предпочтительнее, баком с перемешиванием с по меньшей мере одним впуском и выпуском.

В вариантах осуществления измерительная ячейка является цилиндрической. Предпочтительно, детектор гамма-излучения расположен в центре измерительной ячейки.

В дополнительных вариантах осуществления измерительная ячейка имеет объем в диапазоне от 1 л до 30 л, предпочтительно, в диапазоне от 3 л до 10 л.

В вариантах осуществления упомянутая по меньшей мере одна измерительная ячейка экранирована от внешних источников фонового гамма-излучения. Предпочтительно, упомянутая по меньшей мере одна измерительная ячейка снабжена свинцовым (Pb) экраном.

В дополнительных вариантах осуществления экран из Pb имеет толщину по меньшей мере 10 мм, предпочтительно, в диапазоне от 10 мм до 50 мм. В дополнительных вариантах осуществления экран из Pb выбирается из свинцовых плит, свинцовых колец и свинцовых пластин. Преимущественно, экран из Pb экранирует измерения, в частности, детектор гамма-излучения, от внешних источников фонового гамма-излучения. Таким образом, предел обнаружения при количественном определении снижается. Следовательно, для минимизации фонового излучения предпочтительно увеличение толщины экрана из Pb.

В вариантах осуществления детектор гамма-излучения является гамма-сцинтиллятором, предпочтительно, сцинтиллятором на основе галогенида церия или лантана или NaI(Tl). Преимущественно, детекторы гамма-излучения являются детекторами гамма-излучения высокой производительности и/или большого объема с

высокой эффективностью детектирования и хорошим разрешением. Также преимущественно, высокая эффективность детектирования в сочетании с большим объемом пробы минимизирует статистическую неопределенность и время измерения.

Предпочтительно, гамма-сцинтиллятор выбирается из группы, включающей сцинтиллятор на основе $CeBr_3$, $LaBr_3$:Ce, $LaCl_3$:Ce и NaI(Tl), предпочтительно, гамма-сцинтиллятор является сцинтиллятором на основе $CeBr_3$.

В дополнительных вариантах осуществления детектор гамма-излучения является детектором большого размера. Преимущественно, детектор большого размера повышает эффективную скорость счета при наборе спектра и, следовательно, сокращает время измерения.

В вариантах осуществления детектор гамма-излучения окружен водонепроницаемой защитной оболочкой, предпочтительно, цилиндрическим контейнером с двойными стенками. Преимущественно, водонепроницаемая защитная оболочка полностью изолирует детектор гамма-излучения от объема пробы.

В вариантах осуществления водонепроницаемая защитная оболочка и/или внутренняя обшивка измерительной ячейки изготовлена из пластика. Преимущественно, пластик поглощает минимум гамма-излучения. Более преимущественно, пластик выдерживает воздействие жидких сред с высокими концентрациями солей и/или низкими уровнями pH, предпочтительно, вплоть до pH 0,5. Предпочтительно, водонепроницаемая защитная оболочка и/или внутренняя обшивка измерительной ячейки не изготовлена из поливинилхлорида (ПВХ). Неблагоприятным фактором в этом случае является то, что торий адсорбируется ПВХ и, следовательно, будет вносить вклад в фон и влиять на предел обнаружения.

В вариантах осуществления устройство по изобретению дополнительно содержит по меньшей мере один технологический узел, предпочтительно, бак или трубу. В дополнительном варианте осуществления технологический узел соединен с измерительной ячейкой непосредственно впуском или с помощью обходной или ответвительной проточной измерительной ячейки.

В вариантах осуществления устройство по изобретению дополнительно содержит по меньшей мере один дополнительный элемент, выбранный из группы, включающей расходомер, стабилизатор положения пиков, охладитель, в частности, с электрическим охлаждением или с охлаждением азотом (N_2), и мультиплексор, предпочтительно, гидравлический мультиплексор.

Преимущественно, мультиплексор делает возможным последовательное измерение концентраций радионуклидов в по меньшей мере двух технологических узлах, предпочтительно, 2-20 технологических узлах, предпочтительнее, 6-12 технологических узлах. В варианте осуществления мультиплексор настраивается блоком управления.

В предпочтительных вариантах осуществления устройство по изобретению, содержащее мультиплексор, включает в себя один впуск из резервуара с чистой водой. Преимущественно, резервуар с чистой водой используется для измерения фона спектра

гамма-излучения. Также преимущественно, устройство с мультиплексором, содержащее один впуск из резервуара с чистой водой, делает возможным промывку устройства и измерение фонового спектра за оптимальное время.

Преимущественно, измерение фонового спектра делает возможным идентификацию нарастания накипи или эффектов загрязнения, т.е. накопления радионуклид-содержащих веществ на поверхности детектора гамма-излучения или внутренней поверхности измерительной ячейки.

Еще одним аспектом изобретения является применение способа по изобретению и/или устройства по изобретению для количественного определения концентраций радионуклидов в гидрометаллургических технологических средах, предпочтительно, количественного определения концентраций урана и/или продуктов радиоактивного распада урана в растворах подземного выщелачивания урана или в растворах извлечения урана или количественного определения тория и/или продуктов радиоактивного распада ^{232}Th в технологических растворах редкоземельных элементов. Кроме того, концентрации радионуклидов, измеряемые с помощью способа и/или устройства по изобретению, можно использовать для реализации управления технологическим процессом в реальном времени, т.е. для регулировки технологических условий с целью достижения целевых значений концентраций радионуклидов.

В некоторых вариантах осуществления способ по изобретению и/или устройство по изобретению применяются для оценки эффективности удаления тория и/или продуктов радиоактивного распада ^{232}Th из редкоземельных элементов следующим образом:

(a) вследствие короткого периода полураспада ^{228}Ac (6,13 ч) интенсивность гама-излучения ^{228}Ac используется для количественного определения удаления элемента Ra, в частности, ^{228}Ra как материнского нуклида для ^{228}Ac,

(b) вследствие коротких периодов полураспада всех продуктов распада, образующихся в результате распада ^{228}Th, интенсивность гамма-излучения от ^{212}Pb и ^{208}Tl используется для количественного определения концентрации элемента Th и эффективности его удаления из редкоземельных элементов.

В дополнительных вариантах осуществления вышеописанные варианты осуществления могут быть скомбинированы, в частности, варианты осуществления способа по изобретению можно применять к устройству и применению по изобретению, а варианты осуществления устройства по изобретению можно применять к способу и применению по изобретению.

Настоящее изобретение дополнительно поясняется далее с помощью следующих неограничивающих фигур и примеров.

На **Фиг. 1** показана схема устройства по изобретению с двумя вариантами осуществления: **A)** детектор гамма-излучения установлен на стенке технологического узла или измерительной ячейки соответственно, **B)** детектор гамма-излучения установлен в коленчатой трубе в качестве измерительной ячейки.

На **Фиг. 2** показана схема проточной измерительной ячейки (обходной или

ответвительной), включающей в себя детектор гамма-излучения и камеру большого объема для жидких сред.

Фиг. 3 представляет влияние концентраций урана в жидкой среде и времени измерения на относительную статистическую неопределенность измерения концентраций урана в случае от исчезающей малых до низких концентраций Ra. **A** Относительная статистическая неопределенность как функция концентрации урана при нулевом уровне фона (идеализированный случай). **B** Относительная статистическая неопределенность как функция концентрации урана при типичном уровне фона в камере с экраном толщиной 1 см.

Фиг. 4 представляет измеренный спектр (в логарифмической шкале) урансодержащей жидкой среды, содержащей 515 мг/л урана со значительно ослабленными концентрациями продуктов распада урана (достигнутыми путем избирательного выщелачивания), в сравнении с подогнанным спектром, полученным с помощью процедуры математической аппроксимации для разложения на основе спектров-шаблонов для радионуклидов ^{40}K, ^{214}Bi, ^{241}Pb, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra и ^{235}U (смоделированных компьютером) и фона (измеренного).

Фиг. 5 представляет измеренный спектр (в линейной шкале) урансодержащей жидкой среды, содержащей 515 мг/л урана со значительно ослабленными концентрациями продуктов распада урана (достигнутыми путем избирательного выщелачивания), сниженный до диапазона энергий, представляющего интерес для текущего применения, в сравнении с подогнанным спектром, полученным с помощью процедуры математической аппроксимации для разложения на основе спектров-шаблонов для значимых радионуклидов ^{234}Th, ^{226}Ra и ^{235}U (смоделированных компьютером) и фона (измеренного).

Примеры устройства по изобретению показаны на **фиг. 1A, B** и **фиг. 2**. В первом примере измерительная ячейка содержит детектор гамма-излучения, при этом детектор гамма-излучения установлен на стенке измерительной ячейки (фиг. 1A). Во втором примере проточная измерительная ячейка является коленчатой трубой, в которой установлен детектор гамма-излучения (фиг. 1B). В обоих примерах детектор гамма-излучения содержит сцинтиллятор, фотоумножитель и встроенный базовый блок 3 гамма-спектрометра, содержащий высоковольтный блок 4 питания, предусилитель 5 и многоканальный анализатор 6. Кроме того, устройство по изобретению содержит компьютер 7 и программируемый логический контроллер 8 для всестороннего анализа спектроскопических данных и оперативного доступа к данным, измеренным устройством по изобретению.

Дополнительный пример включает в себя входной мультиплексор 9 (фиг. 2). Проточная измерительная ячейка является камерой большого объема (внутренний диаметр 200 мм, внутренняя высота 260 мм) для жидкой среды, с одним центральным впуском (для равномерного распределения притока) и одним выпуском (выполненным в виде системы с 4 выпусками для реализации пропускной способности, близкой к режиму пробкообразного потока) и с экраном из Pb толщиной 10 мм, и содержит детектор гамма-

излучения, причем детектор гамма-излучения установлен на стенке измерительной ячейки. В альтернативном примере детектор гамма-излучения установлен в центре измерительной ячейки. Детектор гамма-излучения содержит сцинтиллятор 1, фотоумножитель 2 и встроенный базовый блок 3 γ-спектрометра, содержащий высоковольтный блок 4 питания, предусилитель 5 и многоканальный анализатор 6. Кроме того, устройство по изобретению содержит компьютер 7 и программируемый логический контроллер 8 для всестороннего анализа спектроскопических данных и оперативного доступа к данным, измеренным устройством по изобретению. Компьютер подсоединен к гидрорегулятору для многоступенчатой настройки входного мультиплексора 9, чтобы однозначно относить измеренные данные к источнику жидкой среды (например, трубе).

Количественное определение урана

Урансодержащую жидкую среду (сернокислый выщелачивающий раствор), содержащую 515 мг/л урана со значительно сниженными концентрациями продуктов распада урана (достигнутыми избирательным выщелачиванием урана), измеряли устройством по фиг. 2, и результаты сравнивали с подогнанным спектром, полученным с помощью процедуры математической подгонки методом хи-квадрат для разложения, основанного на спектрах-шаблонах для радионуклидов ^{40}K, ^{214}Bi, ^{241}Pb, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra и ^{235}U (смоделированных компьютером с помощью программы Monte Carlo N-Particle (MCNP), разработанной Лос-Аламосской национальной лабораторией), и фона (измеренного с водой). На фиг. 4 и фиг. 5 представлен измеренный спектр (в логарифмической и линейной шкалах соответственно) в сравнении с подогнанным спектром, а также со всеми рассматриваемыми спектрами-шаблонами.

Влияние фонового спектра и времени измерения на относительную статистическую неопределенность концентраций радионуклидов и более низкий уровень обнаружения показано на фиг. 3 как функция концентрации урана в растворе-продукте выщелачивания в качестве примера, при этом концентрация ^{226}Ra исчезающе низка. Посредством увеличения толщины свинцового экрана с 10 мм до более высоких значений можно приблизиться к идеализированному случаю минимальной статистической неопределенности и более низкому уровню обнаружения, показанному на фиг. 3a, при этом фактические условия зависят от локального уровня фона и толщины свинцового экрана. На фиг. 3b показаны условия неопределенности для умеренного свинцового экрана толщиной 10 мм.

Список непатентной литературы

Kaspar TC, Lavender CA, Dibert MW (2017) Evaluation of Uranium-235 Measurement Techniques. Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830.

Khorfan A, Wahoud A, Rafool W (2003) A quick method to determine uranium concentration by gamma spectroscopy: Its application for extraction of uranium from wet phosphoric acid. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 257 (2) 313-316.

Nicolet J-P, Erdi-Krausz G (2003) IAEA-TECDOC-1363 Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, Retrieved from the internet: URLhttps:/www-

pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web/PDF/Contents.pdf.

Singh S, Ramaswami A, Singh Gill J (2005) Development of a technique for the on line determination of uranium in solution by gamma ray spectrometry. BARC Report. BARC/2005/E/005.

Sundar U, Ramamurthy V, Buche V, Rao DN, Sivadasan PC, Yadav RB (2007) Rapid measurements of concentrations of natural uranium in process stream samples via gamma spectrometry at an extraction facility. Talanta. 73 (3) 476-482.

Ссылочные обозначения

1 – Сцинтиллятор

2 – Фотоумножитель

3 – Базовый блок γ-спектрометра

4 – Высоковольтный блок питания

5 – Предусилитель

6 – Многоканальный анализатор

7 – Компьютер

8 – Программируемый логический контроллер

9 – Мультиплексор

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ количественного определения радионуклидов в жидких средах, включающий следующие этапы:

a) обеспечение содержащей по меньшей мере один радионуклид жидкой среды в измерительной ячейке, причем в измерительной ячейке расположен детектор гамма-излучения,

b) измерение амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения жидкой среды детектором гамма-излучения,

c) обеспечение смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

причем эти шаблоны амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения корректируют на матричные эффекты,

d) реализуемые компьютером идентификация и количественное определение упомянутого по меньшей мере одного радионуклида в жидкой среде с использованием спектральной подгонки измеренного амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения взвешенной комбинацией смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

при этом спектральная подгонка корректирует температурные эффекты и фоновые эффекты.

2. Способ по п. 1, причем упомянутый по меньшей мере один радионуклид выбран из группы, включающей ^{235}U, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{208}Tl, ^{40}K и искусственные радионуклиды.

3. Способ по п. 1 или 2, причем измерительная ячейка является проточной измерительной ячейкой или баком.

4. Способ по любому из пп. 1-3, причем расстояние от внешних границ измерительной ячейки до детектора гамма-излучения составляет в диапазоне от 2 см до 20 см.

5. Способ по любому из пп. 1-4, причем обеспечение содержащей по меньшей мере один радионуклид жидкой среды согласно этапу a) и измерение спектра гамма-излучения жидкой среды согласно этапу b) выполняют в потоке или на месте.

6. Способ по любому из пп. 1-5, причем смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты на этапе c) получают моделированием с помощью программного обеспечения для статистического расчета прохождения излучения для сложных систем, предпочтительно, с помощью программы Monte Carlo N-Particle (MCNP), разработанной Лос-Аламосской национальной лабораторией, или GEANT4.

7. Способ по любому из пп. 1-6, причем смоделированные шаблоны спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочные коэффициенты на этапе c) обеспечивают для радионуклидов ^{235}U, ^{234m}Pa, ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{228}Ac, ^{212}Pb, ^{208}Tl и/или ^{40}K.

8. Способ по любому из пп. 1-7, причем коррекцию фоновых эффектов производят измерением фонового спектра с чистой водой, предпочтительно, в диапазоне от каждого часа до каждой недели.

9. Способ по любому из пп. 1-8, причем спектральная подгонка является по меньшей мере подгонкой методом минимума хи-квадрат или подгонкой методом правдоподобия, или подобной.

10. Устройство для количественного определения радионуклидов в жидких средах, содержащее:

i. по меньшей мере одну измерительную ячейку,

ii. детектор гамма-излучения, содержащий по меньшей мере один усилитель (5) и по меньшей мере один многоканальный анализатор (6),

причем детектор гамма-излучения расположен в измерительной ячейке,

iii. блок (7) обработки данных, содержащий процессор, выполненный с возможностью обеспечения смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

причем эти шаблоны амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения корректируются на матричные эффекты;

и выполнения идентификации и количественного определения по меньшей мере одного радионуклида с использованием спектральной подгонки измеренного амплитудно-импульсного спектра гамма-излучения взвешенной комбинацией смоделированных шаблонов амплитудно-импульсных спектров гамма-излучения для радионуклидов и калибровочных коэффициентов,

при этом спектральная подгонка корректирует температурные эффекты и фоновые эффекты.

11. Устройство по п. 10, причем упомянутая по меньшей мере одна измерительная ячейка является баком или проточной измерительной ячейкой, предпочтительно, баком с по меньшей мере одним впуском и выпуском или трубой.

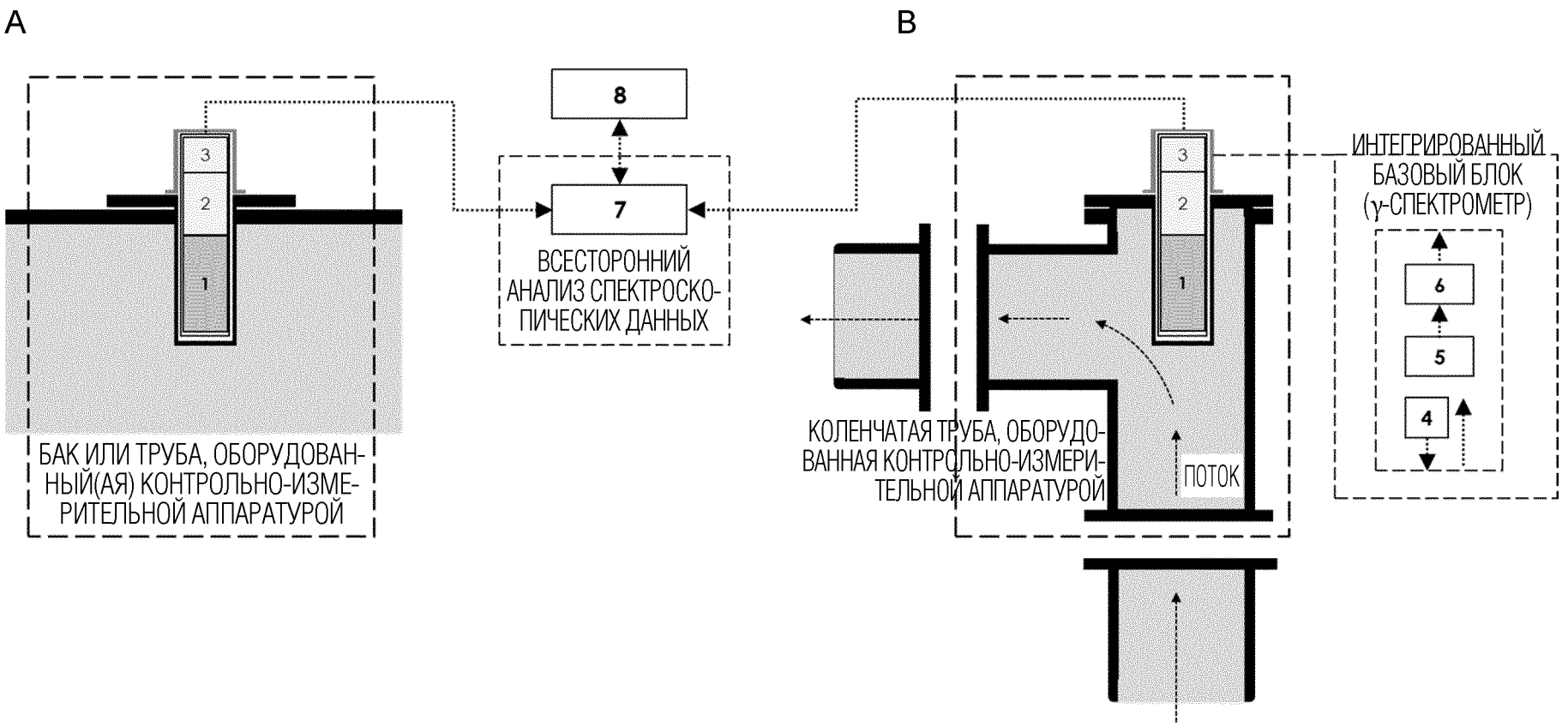
12. Устройство по п. 10 или 11, причем упомянутая по меньшей мере одна измерительная ячейка экранирована Pb, предпочтительно, с толщиной в диапазоне от 10 мм до 50 мм.

13. Устройство по любому из пп. 10-12, причем детектор гамма-излучения окружен водонепроницаемой защитной оболочкой.

14. Устройство по любому из пп. 10-13, причем детектор гамма-излучения является сцинтиллятором на основе галогенида церия или лантана или NaI(Tl).

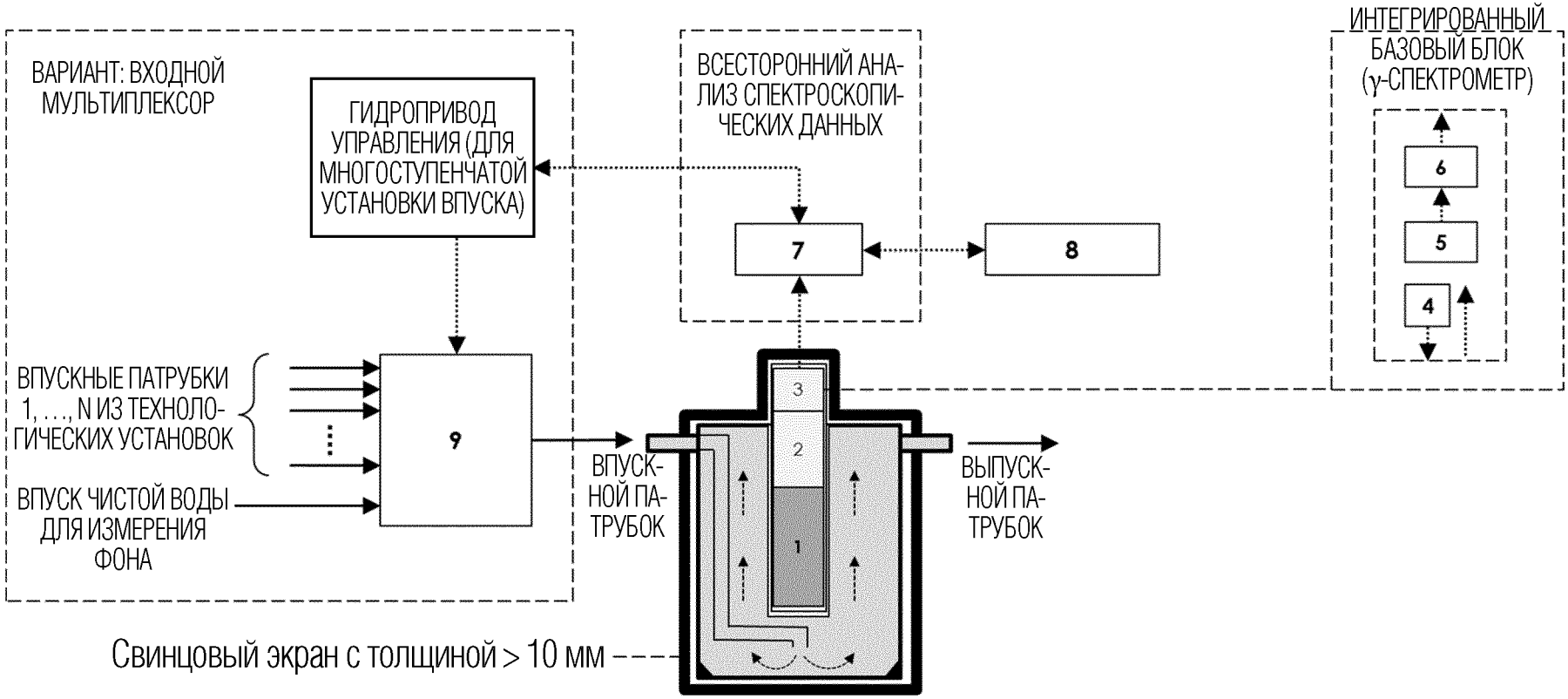
15. Применение способа по любому из пп. 1-9 и/или устройства по любому из пп. 10-14 для количественного определения концентраций радионуклидов в гидрометаллургических технологических средах, предпочтительно, количественного определения концентраций урана и/или продуктов радиоактивного распада урана в растворах подземного выщелачивания урана или в растворах извлечения урана или количественного определения тория и/или продуктов радиоактивного распада ^{232}Th в

технологических растворах редкоземельных элементов.

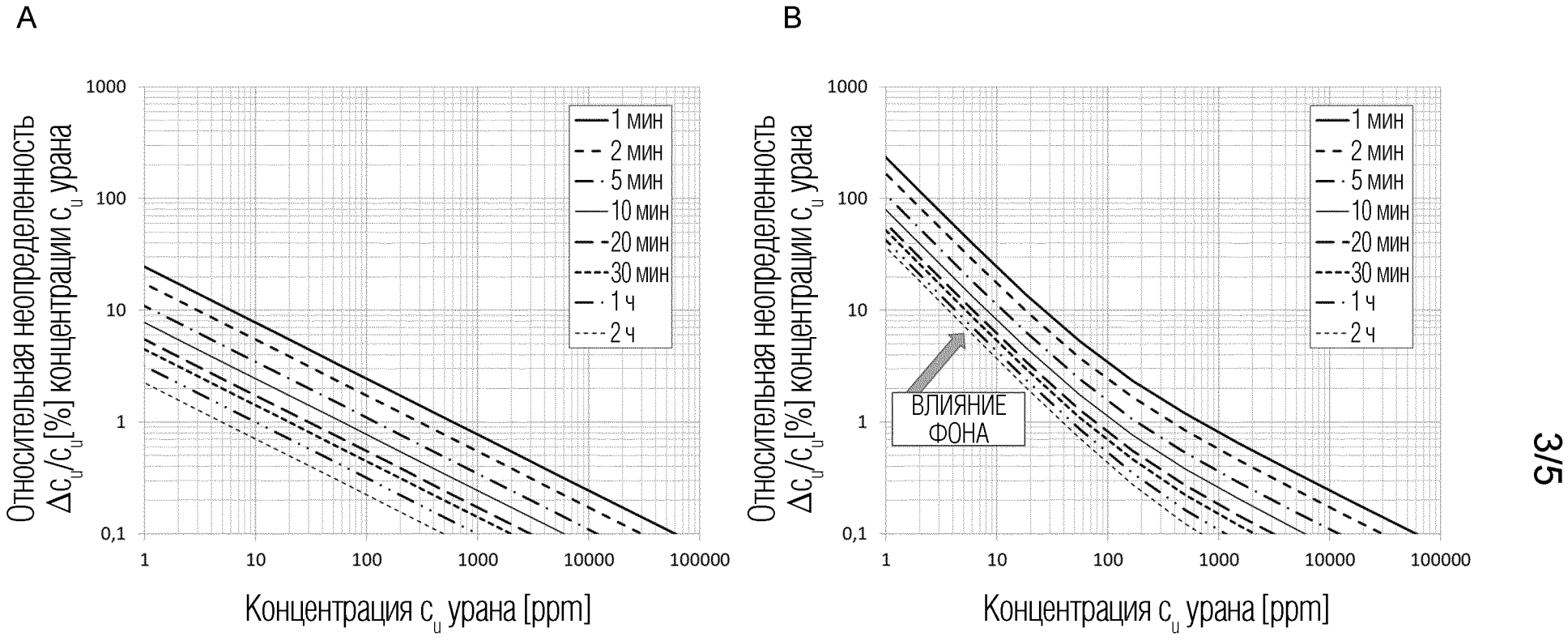

A
B
8
7
3
2
1
ВСЕСТОРОННИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ
БАК ИЛИ ТРУБА, ОБОРУДОВАННЫЙ(АЯ) КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ
КОЛЕНЧАТАЯ ТРУБА, ОБОРУДОВАННАЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ
ПОТОК
ИНТЕГРИРОВАННЫЙ БАЗОВЫЙ БЛОК (γ-СПЕКТРОМЕТР)
6
5
4

ФИГ. 1

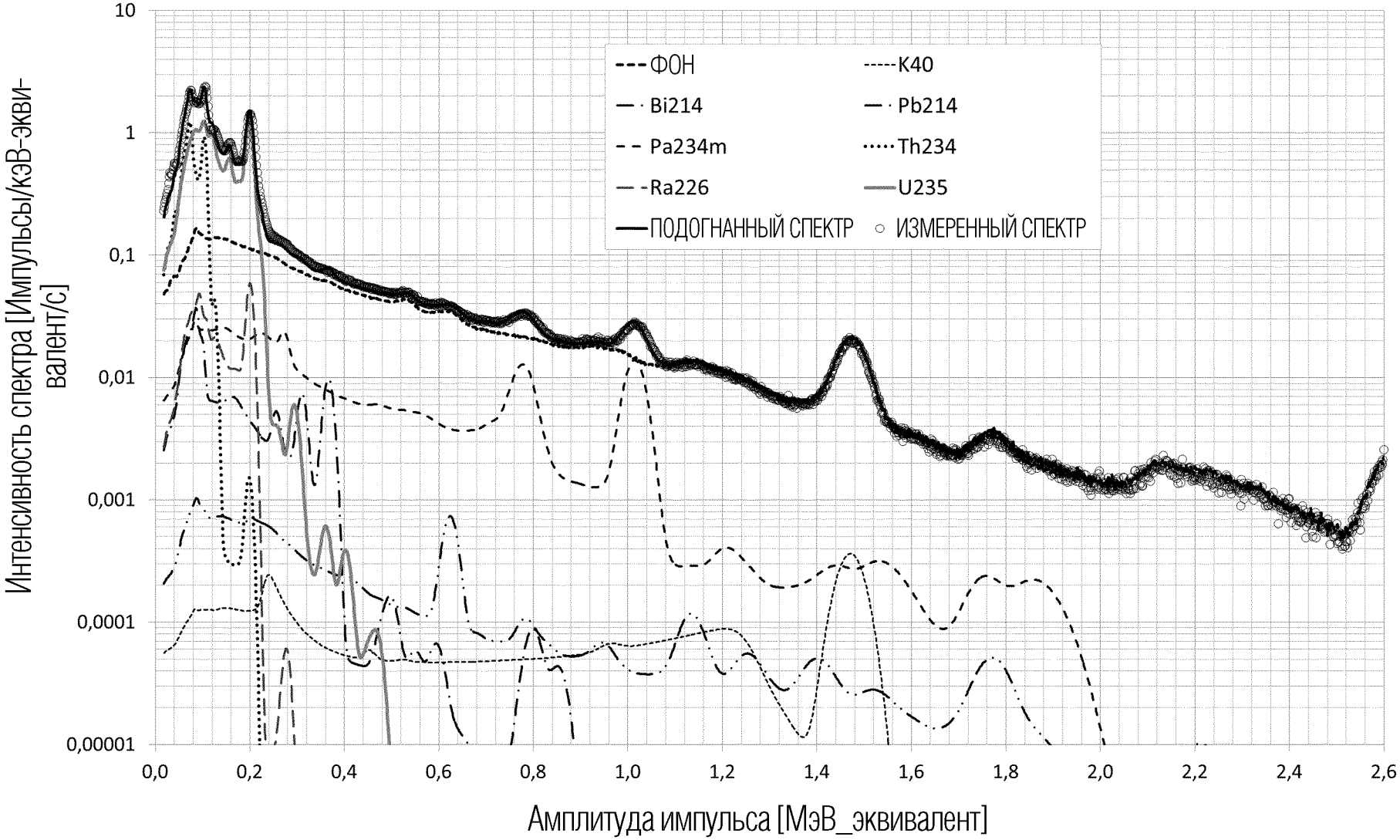
572667


ВАРИАНТ: ВХОДНОЙ МУЛЬТИПЛЕКСОР
ГИДРОПРИВОД УПРАВЛЕНИЯ (ДЛЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ УСТАНОВКИ ВПУСКА)
ВСЕСТОРОННИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ИНТЕГРИРОВАННЫЙ БАЗОВЫЙ БЛОК (γ-СПЕКТРОМЕТР)
7
8
6
5
4
ВПУСКНЫЕ ПАТРУБКИ 1, …, N ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ВПУСК ЧИСТОЙ ВОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФОНА
9
3
2
1
ВПУСКНОЙ ПАТРУБОК
ВЫПУСКНОЙ ПАТРУБОК
Свинцовый экран с толщиной > 10 мм

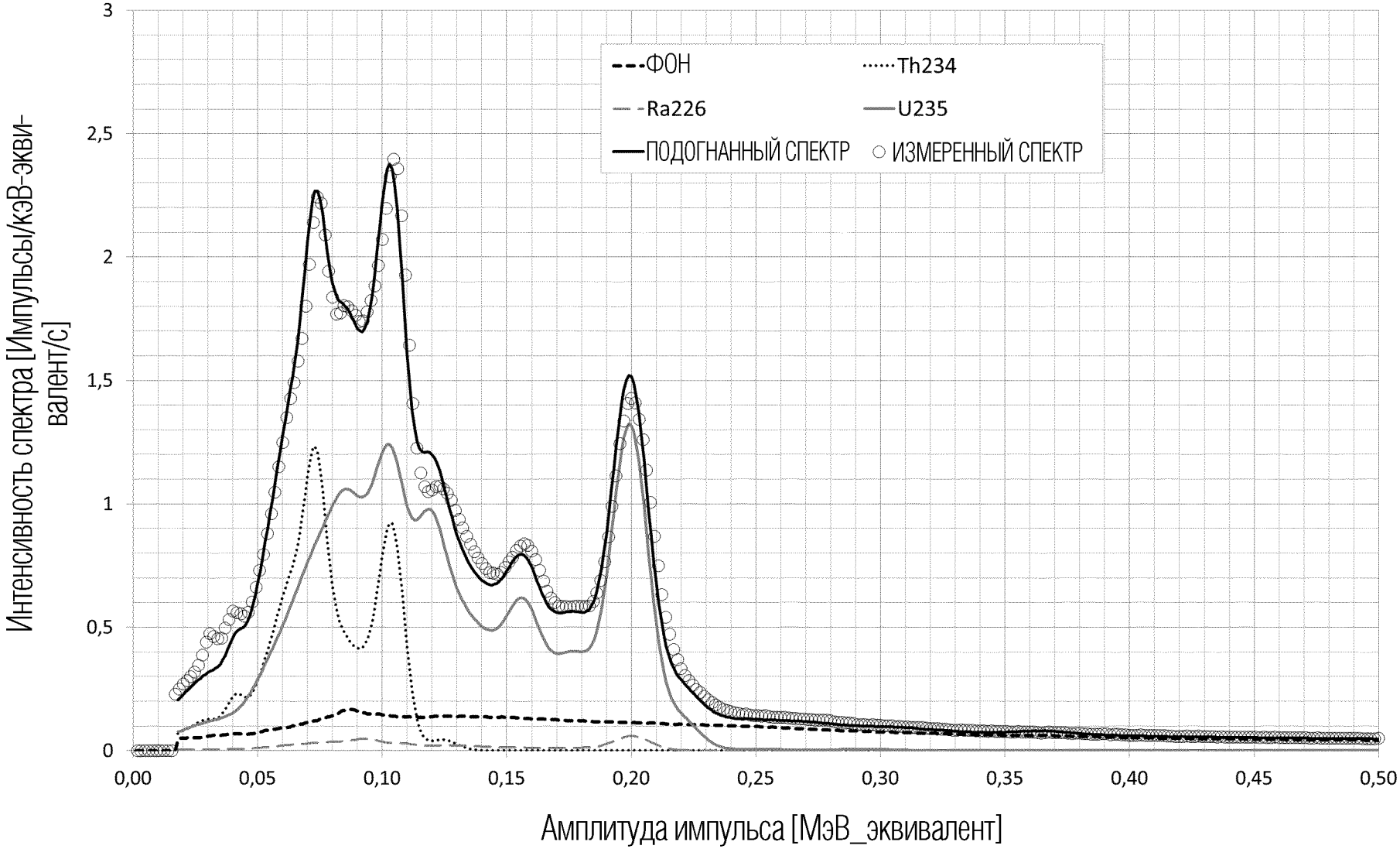
ФИГ. 2


A
B
Относительная неопределенность
Δc_u/c_u [%] концентрации c_u урана
1000
100
10
1
0,1
1
10
100
1000
10000
100000
Концентрация c_u урана [ppm]
1 мин
2 мин
5 мин
10 мин
20 мин
30 мин
1 ч
2 ч
ВЛИЯНИЕ
ФОНА

ФИГ. 3


ФОН
K40
Bi214
Pb214
Pa234m
Th234
Ra226
U235
ПОДОГНАННЫЙ СПЕКТР
ИЗМЕРЕННЫЙ СПЕКТР
Интенсивность спектра [Импульсы/кэВ-эквивалент/с]
Амплитуда импульса [МэВ_эквивалент]
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
2,2
2,4
2,6

ФИГ. 4


ФОН
Th234
Ra226
U235
ПОДОГНАННЫЙ СПЕКТР
ИЗМЕРЕННЫЙ СПЕКТР
Интенсивность спектра [Импульсы/кэВ-эквивалент/с]
Амплитуда импульса [МэВ_эквивалент]
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
0,00
0,05
0,10
0,15
0,20
0,25
0,30
0,35
0,40
0,45
0,50

ФИГ. 5