

Исследования распределения нуклидов и расчеты показали (табл. 4), что в стеклоподобных материалах локализуется ~ 80—90% введенной суммы платиноидов и технеция, из них только до 30% гомогенно растворены в матрице, остальное количество иммобилизовано в ней в виде дисперсной фазы. Унос в газовую фазу при кальцинации, плавлении и термической выдержке расплавов существенно зависит от условий проведения эксперимента и может достигать примерно 98% технеция, 50% рутения и 3—4% родия и палладия.

Т а б л и ц а 4. Распределение нуклидов в процессе термической переработки жидких отходов

Распределение элементов, %	Фосфатное стекло, 1000 °С, 100 ч, 3% оксидов продуктов деления				Боросиликатное стекло, 1200 °С, 100 ч, 9% оксидов продуктов деления			
	Ru	Rh	Pd	Tc*	Ru	Rh	Pd	Tc*
Гомогенно распределенные в матрице	1—2	1—2	15—30	1	0,5—1	0,5—1	30—40	1
Гетерогенная фаза	55—95	96—97	68—83	5	47—93	97—99	45—67	3
Унос в газовую фазу	5—40	≤ 1	≤ 3	95—98	5—50	0,5—2	3—5	95—98

* Время выдержки расплава 5 ч.

Как показали оптическая микроскопия и рентгенофазовый анализ, равномерно распределенные в матрице дисперсные частицы увеличивают склонность материалов к расстекловыванию, выступая в качестве центров кристаллизации. Химическая стойкость этих материалов остается фактически неизменной. Для большинства стекол выщелачиваемость на 10-е сутки составила, г·см⁻²·сут⁻¹: 10⁻⁶ для Na⁺ и ~ 10⁻⁷ для Cs⁺, Sr⁺.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghattas N., Compper K. Vitrification of medium level liquid waste precipitates in VG 98/12 borosilicate glass. — Nucl. Chem. Waste Mater., 1986, v. 6, № 3, p. 169—174.
- Mitamura H., Murakami T., Banba T. Crystalline phases in devitrified simulated high-level waste glass containing the elements of platinum group. — J. Nucl. Mater., 1985, v. 136, № 2, p. 104—116.
- Nikiforov A.S., Polyakov A.S., Matyunin Yu.I. e.a. Behavior of plutonium, rare-earth elements and elements of the platinum group in vitreous phosphate composites during high-level waste vitrification. — In: Proc. Intern. Waste Management Conf., Seoul, Korea, Oct. 21—23, 1991, v. 2, p. 133—136.
- Krause Ch., Luckscheiter B. Properties and behaviour of the platinum group metals in the resulting from the reprocessing waste. — J. Mat. Res., 1991, v. 6, № 12, p. 2535—2546.
- Физические величины. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- Jullien R. Fractal aggregates. — Comm. Cond. Mat. Phys. (Comm. Mod. Phys., Pt B), 1987, v. 13, № 4, p. 177—205.
- Смирнов В.М. Фрактальные кластеры. — Успехи физ. наук, 1986, т. 149, вып. 2, с. 177—218.

Поступила в Редакцию 6.06.94

УДК 550.83

СПОСОБ γ -ОПРОВОБОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД

Давыдов А.В., Сковородников И.Г., Давыдов В.А.

(Уральская государственная горно-геологическая академия,
Институт геологии и геохимии УО РАН)

Опробование горных пород в естественном залегании на массовую долю природных радиоактивных элементов проводится, как правило, приборами направленного приема γ -излучения компенсационного типа [1—5]. γ -Излучение регистрируется двумя де-

текторами — основным и компенсационным (фоновым), размещенными в свинцовом экране специальной формы. Прибор направленного действия регистрирует плотность потока излучения из зоны опробования (в конусе эффективного угла направленности) в присутствии мешающего излучения окружающих пород и других внешних источников. Конструкция экрана приемника излучения обеспечивает анизотропную чувствительность детекторов к излучению из зоны опробования (в дальнейшем для краткости — сигнал) и фоновому излучению, что позволяет компенсировать фоновую составляющую в основном канале по информации фонового канала. Следует, однако, отметить, что детекторы прибора занимают разное геометрическое положение относительно зоны опробования и внешних источников излучения, что в определенных условиях приводит к перекомпенсации детекторов и налагает ограничения на условия измерения и размер детекторов (чем больше размер, тем больше расхождение в положении детекторов).

Анизотропия чувствительности приемника излучения к сигналу и фону может быть сформирована с использованием аппаратного спектра излучения [6, 7], что позволяет реализовать одноканальный способ направленного γ -опробования, который свободен от указанных недостатков и ограничений, в том числе и по размеру детектора. Последнее дает возможность создавать высокочувствительные приборы для измерения массовой доли природных радиоактивных элементов в горных породах на уровне кларковых и проведения радиоэкологических исследований — экологического контроля строительных материалов, жилой и производственной сферы жизнедеятельности человека и пр. Приемник излучения такого прибора содержит детектор излучения спектрометрического типа, расположенный в свинцовом экране-коллиматоре с окном в зону опробования, при этом излучение из зоны опробования через окно коллиматора проходит непосредственно на детектор, а фоновое излучение — на детектор через боковые стенки экрана небольшой толщины (4—8 мм свинца). Тем самым создается резкая анизотропия спектральной чувствительности детектора к сигналу и фону в области низкой энергии. Излучение регистрируется в двух энергетических интервалах: низко- и высокоэнергетическом с энергией E_g границы разделения интервалов ~ 200 —350 кэВ.

Форма спектров γ -излучения руд и горных пород в естественном залегании в области энергии ниже 400 кэВ определяется, в основном, многократным комптоновским рассеянием γ -квантов в излучающей-поглощающей среде и фактически не зависит от природы излучения. Регистрируемая в низко- и высокоэнергетических интервалах спектра частота импульсов от детектора будет определяться выражениями

$$\begin{cases} M_H = P_H N + R_H F & (E < E_g); \\ M_B = P_B N + R_B F & (E > E_g), \end{cases} \quad (1)$$

где P_H, P_B — относительная доля частоты импульсов N в низко- и высокоэнергетическом интервале; R_H, R_B — то же для частоты F ; N — суммарная в интервалах частота импульсов от излучения из зоны опробования; F — то же для фонового излучения. Коэффициенты P и R могут быть определены по аппаратным спектрам излучения однородного по массовой доле природных радиоактивных элементов полупространства (или соответствующих моделей), зарегистрированным открытым и полностью экранированным детектором. Решая систему (1) относительно частоты N для излучения из зоны опробования, получим

$$\begin{aligned} N &= K_H M_H - K_B M_B = K_H (M_H - M_B R_H / R_B); \\ K_H &= R_B / (P_H - R_H); K_B = R_H / (P_H - R_H). \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты K_H, K_B и соотношение M_H, M_B определяются толщиной экрана и положением границы E_g на аппаратных спектрах. Анализ зависимости дисперсии

отсчетов N по уравнению (2) от E_g , проведенный с использованием известных данных [8—11] и экспериментальных измерений для монокристаллов NaI(Tl) размером от 20×20 до 80×80 мм со свинцовыми экранами толщиной от 4 до 8 мм, показал, что минимум дисперсии наблюдается внутри интервала значений границы E_g от E_{g1} до E_{g2} ($E_{g1} < E_{g2}$), на которых выполняются условия

$$M_H = M_B \quad \text{при } E_g = E_{g1}; \quad (3)$$

$$R_H = R_B \quad \text{при } E_g = E_{g2}.$$

Значение E_{g1} (диапазон 180—220 кэВ) соответствует границе E_g , при которой наблюдается равенство частот импульсов в низко- и высокоэнергетических интервалах в рабочем положении прибора на поверхности излучающей среды. Значение E_{g2} (диапазон 250—450 кэВ) определяет границу, при которой наблюдается равенство частот импульсов в интервалах при полном экранировании детектора (при перекрытии окна в зону опробования экраном с толщиной, равной толщине бокового экрана детектора). Оптимальная зона ($E_{g2} - E_{g1}$) увеличивается при повышении толщины экрана и размера детектора. Условие (3) удобно для схмотехнической реализации приборов. При установлении границы интервалов по этому условию $N = K_H(M_H - M_B) = (M_H - M_B)/K$, при этом $K = K_H^{-1}$ будет представлять собой пересчетный коэффициент опробования и может определяться при градуировании прибора на эталонных моделях непосредственно в имп./с на единицу массовой доли природных радиоактивных элементов (в единицах равновесного урана). Выполнение условия (3) может периодически контролироваться и в процессе работы измерениями при полном экранировании детектора (с помощью специального вкладыша на входное окно экрана).

Способ проверяли на опытных образцах приемников излучения с цилиндрическими свинцовыми экранами-коллиматорами с толщиной стенок 4—8 мм. Внутри экранов помещали сцинтилляционные счетчики с детекторами NaI(Tl) размером от 20×20 до 80×80 мм. Диаметр экранов определялся диаметром детектора NaI(Tl). Нижний порог регистрации первого (низкоэнергетического) канала прибора устанавливался равным 20 кэВ, верхний порог регистрации первого канала, он же нижний порог регистрации второго (высокоэнергетического) канала, имел возможность регулирования от 150 до 500 кэВ. Градуирование проводилось на насыщенной рудной модели урана.

Экспериментальные измерения подтвердили выполнение прибором целевого назначения. Эффективный угол направленности приема излучения (по ширине диаграммы направленности на половине высоты), измеренный регистрацией γ -излучения точечного источника радия за барьером (бетонная стена толщиной 30 см), зависит от положения детектора в экране относительно выходного окна и может изменяться в пределах 50—120 градусов. При угле направленности ~ 90 градусов чувствительность прибора составляет 3—4 имп./с на 1 см^3 монокристалла NaI(Tl) на 0,01% урана в зоне опробования.

Как видно из табл. 1, 6 мм свинца обеспечивают достаточно хорошо выраженную спектральную анизотропию чувствительности к сигналу и фону. При эффективном угле направленности приема излучения 90 градусов датчик регистрирует $\sim 30\%$ потока N (сигнал) и 70% потока F (фон). По данным табл. 1, принятым за единичную массовую долю в однородном полупространстве (зона опробования $Q_n = 1$, окружающие породы $Q_f = 1$), рассчитана статистическая погрешность измерений интенсивности потока

Т а б л и ц а 1. Спектр незранированного (N) и полностью экранированного (F) датчика с детектором NaI(Tl) 80×80 мм при толщине свинцового экрана 6 мм на поверхности однородного полупространства с массовой долей эквивалентного урана $\sim 0,0005\%$ (ширина канала 30 кэВ)

Характеристика	E_g , кэВ													
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	> 420
N , с^{-1}	33	72	96	86	63	49	40	32	24	20	16	13	11	130
F , с^{-1}	3,4	6,1	5,8	4	3,1	3,2	3,3	3,6	3,8	4	4,1	4	3,9	76

$N(Q_n)$ для экспозиции измерений 10 с при различных значениях границы E_g и для различных отношений массовой доли Q_n/Q_f (при $E_g = 300$ кэВ):

E_g , кэВ	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480
$\delta(Q_n)$, %	3,90	3,67	3,54	3,49	3,47	3,47	3,51	3,56	3,68	3,75	3,80
Q_n/Q_f	20/1	10/1	5/1	3/1	2/1	1/1	1/2	1/3	1/5	1/10	1/20
$\delta(Q_n)$, %	0,70	0,99	1,42	1,86	2,33	3,47	3,79	4,10	4,64	5,79	7,58

Интенсивность естественного низкоэнергетического γ -излучения зависит от эффективного атомного номера $z_{\text{эф}}$ излучающей-поглощающей среды [2, 8]. При существенных изменениях $z_{\text{эф}}$ по площади опробования это может приводить к появлению дополнительной погрешности определения массовой доли природных радиоактивных элементов. Наиболее простой метод исключения данного фактора — закрытие входного окна датчика свинцовым фильтром толщиной ~ 1 мм, что немного снижает чувствительность приборов, но не изменяет условий их настройки и градуирования. Альтернативные решения — контроль за состоянием $z_{\text{эф}}$ в зоне опробования и стабилизация пересчетного коэффициента аппаратуры известными способами [12—14].

При использовании детекторов большого размера массогабаритные характеристики приемников излучения могут быть существенно улучшены изменением положения экрана, создающего спектральную анизотропию чувствительности к сигналу и фону, с бокового положения на торцевое, что также позволяет решать систему уравнений (1), хотя и с более высоким уровнем статистической погрешности определения массовой доли природных радиоактивных элементов. Торцевое расположение экрана позволяет реализовать шпуровое γ -опробование с направленностью приема γ -излучения на забой шпура [15], что невозможно выполнить приборами компенсационного типа. При торцевом экране, являющемся общим для двух встречно направленных детекторов излучения, аналогично реализуется скважинный прибор γ -опробования с узкой направленностью приема излучения в плоскости, перпендикулярной оси скважины [16], которым может проводиться высокоточная детализация рудных зон, до определения массовой доли урана в отдельных рудных прожилках.

Работа приемника излучения в спектрометрическом режиме требует стабилизации энергетической шкалы измерений. Влияние любых дестабилизирующих факторов на прибор, как правило, отображается в изменении коэффициента усиления сигналов детектора. Это позволяет контролировать и подстраивать энергетическую шкалу приборов путем использования реперных источников излучения в периодическом режиме либо в режиме постоянной автостабилизации. При установке границы E_g по условию (3) периодический контроль, как уже отмечалось, затруднений не представляет и мо-

жст выполняться по естественному излучению пород. Реперная автостабилизация шкалы повышает надежность и точность измерений, но усложняет приборы и в данном случае трудно выполнима — места в спектре для реперной энергии фактически нет.

Влияние дестабилизирующих факторов может учитываться автоматически, если при градуировании прибора принять последние в качестве информационных параметров аппаратуры. Сущность способа рассматривается ниже в общей форме определения массовой доли элемента по результатам спектрометрических измерений (для которых данный способ также может использоваться) и заключается в следующем.

Система спектральных уравнений для n определяемых элементов

$$M_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} g_i, \quad (4)$$

где M_j — частота импульсов (экспозиционный отсчет) в j -интервалах спектра; j — индекс интервалов регистрации спектра ($1 \leq j \leq n$); i — индекс элементов ($1 \leq i \leq n$); a_{ji} — коэффициент чувствительности в j -интервалах к i -элементам (на единицу массовой доли); g_i — массовая доля элементов в объекте измерений. Решение

системы уравнений относительно массовой доли элементов: $g_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} M_j$, где C_{ij} — инверсная матрица интерпретационных коэффициентов.

В реальных условиях измерений при воздействии на прибор дестабилизирующих факторов за счет изменения энергетической шкалы изменяются коэффициенты, формирующие отсчеты: $a_{ji}^* = a_{ji} + d_{ji}$, где d_{ji} — изменения (приращения коэффициентов).

Отсюда $M_j^* = \sum_{i=1}^n a_{ji}^* g_i = \sum_{i=1}^n a_{ji} g_i + d_{ji} g_i = M_j + M_{jd}$; $g_i^* = \sum_{j=1}^n C_{ij} M_j^* = \sum_{j=1}^n C_{ij} M_j + C_{ij} M_{jd} = g_i + \sigma_{id}$, где $\sigma_{id} = C_{ij} d_{ji} g_i$ — погрешность определения содержания элементов за счет изменения энергетической шкалы измерений. Коэффициент d_{ji} можно ввести в качестве составляющих в систему уравнений (4) с нормировкой на единичное изменение масштаба шкалы:

$$M_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} g_i + D \sum_{i=1}^n d_{ji} g_i = \sum_{i=1}^n a_{ji} g_i + \sum_{i=1}^n d_{ji} R_i, \quad (5)$$

где D — количество единиц изменения энергетической шкалы (в качестве единицы может быть принят 1% изменения ее масштаба); d_{ji} — изменение спектральных коэффициентов элементов при изменении шкалы на одну единицу при единичной массовой доле элементов; $R_i = D g_i$ — новые переменные фиктивных «массовых долей».

В системе уравнений (5) $2n$ неизвестных (g_i, R_i). Для решения система уравнений должна быть доопределена до $2n$ строк, т.е. число интервалов регистрации спектра должно быть увеличено до $2n$. Последнее может быть выполнено разделением каждого интервала регистрации спектра системы (1) на два интервала или новым разделением спектра на четыре интервала с учетом получения минимальной статистической погрешности определения массовой доли элемента для наиболее вероятной при практических измерениях формы спектра суммарного излучения элементов.

После доопределения система уравнений (5) содержит общую полную квадратную матрицу коэффициентов (a_{ji}, d_{ji}). Значения всех коэффициентов определяются при градуировании прибора. Сначала во всех интервалах спектра от эталонов с известной массовой долей элемента определяется концентрационная чувствительность a_{ji} (в j -интервалах к i -элементам). Затем имитируется воздействие на прибор дестабилизи-

рующего фактора, подлежащего учету, и определяется концентрационная чувствительность a_{ji}^* во всех j -интервалах для всех i -элементов. Коэффициент d_{ji} определяется разностью $d_{ji} = a_{ji}^* - a_{ji}$.

Отметим, что в общем случае по аналогичной методике может учитываться влияние на измерения нескольких дестабилизирующих факторов (с соответствующим увеличением ранга матриц и интервалов регистрации спектра), если их спектральные коэффициенты не зависят (мало зависят) один от другого при одновременном воздействии на прибор, а к числу учитываемых могут относиться не только инструментальные, но и технологические факторы, как, например, отклонение от номинального расстояния между детектором излучения и объектом измерений при рентгенорадиометрии и т.п.

Полная матрица коэффициентов (a_{ji}, d_{ji}) системы (5) инверсируется и первые n -строк инверсной матрицы используются для определения массовой доли элемента, при этом полученное решение освобождено от влияния дестабилизирующих факторов.

Способ позволяет оценивать и собственно дестабилизирующие факторы в принятых при градуировании единицах. Для этого с использованием строк $i > n$ инверсной матрицы определяются значения R_i и с учетом вычисленных массовых долей элементов находятся значения $D_i = R_i/g_i$ и среднее D , которое может служить для периодической или автоматической коррекции энергетической шкалы измерений.

Естественно, что увеличение количества интервалов регистрации спектра и уравнений в системе (5) ухудшает обусловленность обратной матрицы решения и приводит к росту статистической погрешности определения массовой доли элемента, однако последнее может считаться приемлемой ценой за автоматический учет влияния дестабилизирующих факторов и компенсироваться увеличением экспозиции измерений. Отметим также, что влияние большинства дестабилизирующих факторов эквивалентно изменению энергетической шкалы прибора и учитывается автоматически при введении градуировочных коэффициентов только на изменение шкалы.

Измерения проводили детектором NaI(Tl) размером 80×80 мм на поверхности полупространства (спектр — см. табл. 1), неоднородности по излучению создавали ^{226}Ra , помещаемым в наклонный шпур на глубину не менее 30 см при моделировании $Q_f > 1$ и не менее 50 см при моделировании $Q_n > 1$, Q_n и Q_f определяли в эквивалентных единицах массовой доли по естественному излучению полупространства ($Q_n = Q_f = 1$) (табл. 2). Границы интервалов регистрации спектра, установленные по минимуму статистической погрешности определения Q_n при $Q_n = Q_f = 1$, равнялись 30—90, 90—180, 180—510 и > 510 кэВ. Изменения шкалы имитировали варьированием коэффициента усиления сигналов в измерительном тракте прибора, значение D принималось в единицах процента изменения усиления сигналов (K), K в нормальных условиях принято равным 100. Экспозиция единичного измерения 10 с, статистическая погрешность подсчитывалась по 50 измерениям на одной установке. Параллельно рассчитывались массовая доля Q_n и статистическая погрешность его определения по измерениям в интервалах 0—180 и > 180 кэВ, т.е. без поправки на изменение шкалы. В последней графе таблицы приводится среднее значение систематического расхождения в определениях Q_n по двум и четырем интервалам, которое характеризует влияние изменений шкалы на двухканальные измерения.

Как видно из табл. 2, введение спектральных коэффициентов изменения масштаба шкалы позволяет почти полностью исключить влияние данного фактора на результаты опробования, при этом эквивалентная чувствительность датчика опробования, которая приведена к чувствительности идеального детектора, регистрирующего только целевое излучение, ~ 8 имп./с на 0,0001 % урана в зоне опробования. Влияние вариаций фо-

нового излучения на результаты измерений также исключается и сказывается только на некотором увеличении статистической погрешности определения содержания в зоне опробования, что может оперативно компенсироваться изменением экспозиции измерений.

Т а б л и ц а 2. Результаты проверки способа на физической модели

Задано			Измерено										
			4 канала								2 канала		
Q_n	Q_f	D	Q_n	$\delta, \%$	Q_f	$\delta, \%$	D	$\delta, \%$	K	$\delta, \%$	Q_n	$\delta, \%$	$S, \%$
1	1	0	0,995	5,1	1,01	10,3	-0,1	960	99,9	1,0	0,996	3,7	0,1
1	1	1	1,002	5,4	1,00	11,4	0,79	278	100,8	2,2	0,995	3,6	-0,7
1	1	2	1,005	4,8	0,99	10,6	2,23	137	102,2	2,2	0,991	3,5	-1,4
1	1	3	1,003	4,7	0,99	10,6	3,08	85	103,1	2,5	0,972	3,4	-3,1
1	1	5	1,011	4,8	0,98	10,7	5,41	55	105,4	2,8	0,943	3,7	-6,7
1	1	10	1,012	4,9	0,97	10,9	10,6	27	110,6	2,6	0,905	3,5	-9,9
1	3	3	0,992	5,9	2,92	4,54	2,88	98	102,9	2,7	0,949	4,7	-4,3
1	9	3	0,998	7,2	8,90	2,08	2,91	129	102,9	3,6	0,910	6,5	-8,8
3	1	3	3,060	2,7	1,00	16,0	3,11	97	103,1	2,9	2,980	2,0	-2,6
9	1	3	9,131	1,5	1,00	28,6	3,07	153	103,1	4,6	8,905	1,1	-2,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бовин В.П. Примененис методов направленной регистрации гамма-излучения для гамма-опробования. — В сб.: Вопросы рудной радиометрии. М.: Госатомиздат, 1962, с. 94—112.
- Хайкович И.М., Шашкин В.Л. Опробование радиоактивных руд по гамма-излучению. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
- Пруткина М.Н., Шашкин В.Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
- Бовин В.П., Лебедев А.М. Некоторые вопросы теории компенсационного метода направленного приема гамма-излучения. — В сб.: Вопросы рудной радиометрии. Вып. 2. М.: Атомиздат, 1968, с. 73—81.
- Бовин В.П. и др. Сцинтилляционный радиометр для направленного приема гамма-излучения. — Там же, с. 81—87.
- Давыдов А.В. Способ опробования горных пород и руд по гамма-излучению. — Известия Уральского горного института. Сер. Геология и геофизика, 1993, вып. 2, с. 185—188.
- Давыдов А.В., Давыдов В.А., Афонин К.В. Способ гамма-опробования горных пород радиометрами направленного приема. А.с. СССР № 1820740 А1, МКИ G01V 5/00, 1989.
- Троицкий С.Г. Экспериментальные исследования спектров гамма-излучения радиоактивных руд в больших массах. — В сб.: Вопросы рудной радиометрии. М.: Госатомиздат, 1962, с. 3—51.
- Троицкий С.Г., Быкова К.И., Бурмистенко Ю.Н. Спектры гамма-излучения бесконечных пластов урановых и ториевых руд. — В сб.: Вопросы рудной радиометрии. Вып. 2. М.: Атомиздат, 1968, с. 13—35.
- Быкова К.И. Коэффициенты пропускания моноэнергетического гамма-излучения стальными и свинцовыми цилиндрическими фильтрами. — Там же, с. 36—37.
- Лебедев А.М., Шашкин В.Л. Коэффициенты пропускания гамма-излучения больших масс урановых и ториевых руд стальными и свинцовыми фильтрами. — Там же, с. 45—57.
- Давыдов А.В., Давыдов В.А., Серых А.С. Способ определения содержания радиоактивных элементов в горных породах. А.с. СССР № 1514116, МКИ G01V 5/00, 1988.
- Давыдов А.В., Коргуль Г.Г. Шампаров А.Г. Способ определения эффективного атомного номера горных пород и устройство для его осуществления. А.с. СССР № 1570523, МКИ G01V 5/00, 1988.
- Давыдов А.В., Шампаров А.Г., Серых А.С. Способ стабилизации коэффициента энергетического преобразования измерительного тракта радиометрической аппаратуры и устройство для его осуществления. А.с. СССР № 1327687, МКИ G01V 5/00, 1987.
- Давыдов А.В., Сквородников И.Г. Способ направленного детектирования гамма-излучения горных пород. А.с. СССР № 1122126, МКИ G01V 5/00, 1983.
- Давыдов А.В., Сквородников И.Г. Способ направленного детектирования гамма-излучения горных пород. А.с. СССР № 1227019, МКИ G01V 5/00, 1984.

Поступила 23.11.94

В окончательной редакции 23.02.96