

11724

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА  
Д7 - 11724

Г.Н.Флеров, Ю.С.Короткин, Г.М.Тер-Акопьян,  
И.Звара, Ю.Ц.Оганесян, А.Г.Попеко, Ю.Т.Чубурков,  
Л.П.Челноков, О.Д.Маслов, В.И.Смирнов,  
Р.Герстенбергер

РЕЗУЛЬТАТЫ

ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ

ПОЛУОСТРОВА ЧЕЛЕКЕН

1978

Д7 - 11724

Г.Н.Флеров, Ю.С.Короткин, Г.М.Тер-Акопьян,  
И.Звара, Ю.Ц.Оганесян, А.Г.Попеко, Ю.Т.Чубурков,  
Л.П.Челноков, О.Д.Маслов, В.И.Смирнов,  
Р.Герстенбергер

РЕЗУЛЬТАТЫ

ПОИСКОВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ  
ПОЛУОСТРОВА ЧЕЛЕКЕН

*Направлено в "Zeitschrift für Physik"*

ОИЯИ  
БИБЛИОТЕКА

Флеров Г.Н. и др.

D7 - 11724

Результаты поисков сверхтяжелых элементов  
в геотермальных водах полуострова Челекен

Вода геотермальных источников полуострова Челекен, богатая тяжелыми летучими металлами, пропусклась через колонну, содержащую 850 кг анионообменной смолы. Активность спонтанного деления образцов наблюдалась с помощью детекторов множественной эмиссии нейтронов. Скорость счета спонтанного деления составила ~1/сутки для 20 кг насыщенной смолы и ~5/сутки для сухих продуктов, полученных при смыве минеральной фракции со 170 кг смолы. Приводятся оценки величины  $\bar{\nu}$ , которые следуют из распределения зарегистрированных событий по кратностям ( $\bar{\nu} \approx 2-4$ ). Показано, что возможность загрязнения образцов изотопом  $^{252}\text{Cf}$  маловероятна. Рассматривается объяснение наблюдавшегося эффекта спонтанным делением нового природного нуклида, принадлежащего к области сверхтяжелых элементов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Flerov G.N. et al.

D7 - 11724

Results of the Searches for Superheavy Nuclei  
in the Cheleken Peninsula Geothermal Waters

The water rich in heavy volatile metals from the Cheleken Peninsula hot springs was passed through a column containing 850 kg of anion-exchange resin. The s.f. activity of the samples was measured by neutron multiplicity detectors. The counting rate of spontaneous fission events was about 1 count per day for 20 kg of saturated resin, and about 5 counts per day for the dry deposits obtained by the elution of the mineral fraction from 170 kg of resin. The  $\bar{\nu}$  value estimates following from the multiplicity distribution of detected events are given to lie between 2 and 4. It is shown that the possibility of contamination of the samples with  $^{252}\text{Cf}$  is unlikely. The explanation of the observed effect as being due to the spontaneous fission of a new naturally occurring isotope of a superheavy element is considered to be the most probable.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Недавно нами <sup>1</sup> в веществе некоторых метеоритов, относящихся к классам углистых и неравновесных хондритов, был обнаружен ранее неизвестный спонтанно делящийся нуклид. Анализ результатов многолетних экспериментов по поиску сверхтяжелых элементов в природе <sup>2-6</sup> и результаты первых опытов по химическому концентрированию этого нуклида <sup>7</sup> позволили высказать предположение о его принадлежности к области сверхтяжелых элементов /СТЭ/. Однако дальнейшее изучение его свойств затруднено из-за малого количества метеоритного вещества, доступного для исследования.

При работе с образцами метеоритов весом около 10 кг удавалось регистрировать <sup>1</sup> примерно одно событие спонтанного деления в неделю; в продолжительных опытах было зарегистрировано всего 42 события. Если период полураспада нового нуклида предположительно равен  $10^9$  лет /это будет подразумеваться в дальнейшем/, его концентрация в метеоритном веществе составляет  $1 \cdot 10^{14}$  г/г, или же  $2 \cdot 10^{10}$  атомов в одном килограмме.

Для более детального изучения свойств нового излучателя, включая определение порядкового номера и массового числа, необходимо получение его в значительно больших количествах и концентрирование в образцах небольшого веса. С этой целью нами были предприняты эксперименты по поиску нового излучателя в материалах земного происхождения. Если этот излучатель действительно принадлежит к области СТЭ и образовался при нуклеосинтезе элементов Солнечной системы, то сле-

Таблица 1  
Концентрация элементов / г/кг/

Элементы	Гидротермы, Челекен	Морская вода	Алленте	Насыщенная смола	Гидроокисл*
Na	60	10,76	3,5	15	
Ca	18	0,41	20,5	29	20
Fe	8.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	240		30
Zn	2,5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-6</sup>	0,11	0,2	16
Cd	8.10 <sup>-4</sup>	-	4.10 <sup>-4</sup>	-	
Tl	10 <sup>-4</sup>	-	6.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	
Pb	8.10 <sup>-4</sup>	4.10 <sup>-6</sup>	1,3.10 <sup>-3</sup>	0,01	0,1
U	2,5.10 <sup>-6</sup>	-	3.10 <sup>-5</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	3 · 10 <sup>-4</sup>
Cl	125	19,35	-		
Bz	0,6	0,066	2.10 <sup>-3</sup>		0,1
γ	0,021	6.10 <sup>-5</sup>	1,4.10 <sup>-4</sup>		
Сумма солей	209,50	37,12			

\* Основа Ca, Mg.

дует ожидать, что его средняя распространенность в веществе Земли примерно та же, что и в метеоритах типа углистых хондритов.

Предсказания химических свойств СТЭ<sup>8,9/</sup>, к сожалению, недостаточно надежны, чтобы можно было с достоверностью указать на руды и минералы, в которых они должны концентрироваться. Однако, основываясь на положительных результатах упомянутых выше экспериментов<sup>7/</sup> по термохроматографическому извлечению нового нуклида из вещества метеорита Алленте и на предсказаниях о сравнительно высокой летучести элементов с атомными номерами 108-116 в элементарном состоянии или в виде окислов и хлоридов, следовало обратить внимание на природные объекты, в которых они должны концентрироваться благодаря этому свойству.

В настоящей работе в качестве объекта для поиска и извлечения СТЭ была выбрана вода геотермальных источников полуострова Челекен /юго-восточный Каспий/, богатая тяжелыми летучими металлами /см. табл. 1/, которые, по существующим представлениям<sup>12/</sup>, выделяются вместе с другими летучими компонентами из сравнительно мало дифференцированного вещества мантии. В зонах глубинных рифтовых разломов земной коры, которые прослежены на полуострове Челекен, эти элементы захватываются хлоридными натриево-кальциевыми рассолами. Содержание тяжелых летучих металлов /таллий, свинец<sup>10/</sup> / в воде Челекенских скважин примерно в 100 раз больше, чем в океанской воде, при общей минерализации свыше 200 г/кг, что в 10 раз превышает концентрацию солей в океанской воде. Количество воды, которое в принципе сравнительно легко может быть использовано для извлечения СТЭ, составляет миллионы кубометров.

Принимая во внимание, что главными минеральными компонентами челекенских рассолов являются соли натрия, кальция и других элементов легче железа, нам представлялось целесообразным попытаться сконцентрировать тяжелые элементы методом ионообменной хроматографии, направленной на извлечение возможно



Рис. 1. Сорбционная колонка на устье скважины.

более широкого набора элементов тяжелее железа. Опыт по извлечению тяжелых элементов из челекенской воды был проведен  $^{11}/с$  помощью винил-пиридиновой анионо-обменной смолы. Через колонну с 850 кг смолы было пропущено около 2000 м<sup>3</sup> воды /см. рис. 1/.

Содержание ряда элементов в насыщенной смоле определялось нейтронно-активационным, рентгенофлюоресцентным и другими методами анализа. В табл. 1 приведены полученные средние концентрации элементов в исходном рассоле и в насыщенной смоле. Отметим, что количество железа, цинка, таллия и свинца, найденное в смоле, соответствовало полному их извлечению всего из 50 м<sup>3</sup> воды.

Измерения активности спонтанного деления в насыщенной смоле были проведены с помощью развитых нами высокочувствительных методик.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по наблюдению природного излучателя проводились методом регистрации мгновенных нейтронов спонтанного деления. Характеристики детекторов, применявшихся для регистрации событий множественной эмиссии нейтронов, подробно описаны ранее<sup>1,2/</sup>, поэтому мы лишь коротко остановимся на принципе их действия и приведем основные параметры.

В блоке замедлителя /парафин или оргстекло/, в центре которого находился объем для помещения исследуемых образцов, располагались пропорциональные счетчики, наполненные <sup>3</sup>He при давлении 7 атм. Нейтроны, испущенные из образца, после замедления с большой вероятностью захватывались ядрами <sup>3</sup>He, и возникавшие заряженные частицы /протон и тритон/ регистрировались пропорциональными счетчиками. В настоящей работе использовались два нейтронных детектора, несколько отличавшиеся по своим параметрам. В одном из них находилось 54 счетчика, и максимальная вероятность регистрации нейтронов при чувствительном объеме 6 литров составляла 58%. В другом детекторе находилось 28 счетчиков,



*Рис. 2. Общий вид лаборатории в соляной шахте на глубине 1100 мез /434 метра породы/.*



*Рис. 3. Детектор нейтронов с чувствительным объемом 6 л в процессе сборки.*

величина чувствительного объема составляла 10 литров, максимальная вероятность регистрации нейтронов - 38%.

Характерным признаком спонтанного деления в данных условиях являлось наблюдение таких событий, в которых пропорциональными  $^3\text{He}$ -счетчиками за определенный интервал времени регистрировалось два, три или более нейтронов. Этот интервал был выбран равным 250 мкс с учетом того обстоятельства, что среднее время жизни нейтронов в системе детектора составляло 50-70 мкс. Поиск событий спонтанного деления осуществлялся с помощью специальной электронной схемы, запуск которой происходил всякий раз при появлении одиночного импульса с любого из  $^3\text{He}$ -счетчиков. Если после прихода запускающего сигнала в течение 250 мкс наблюдался один, два или более последующих импульсов, происходила регистрация такого события с указанием его кратности /двукратное, трехкратное и т.д./. Большое значение для повышения надежности работы установок имела запись для каждого события интервалов времени между импульсами и номеров счетчиков, в которых были зарегистрированы нейтроны.

Для исключения фона, вызываемого космическими лучами, установки помещались в соляную шахту на глубину 1100 м водного эквивалента. При этом нейтронные детекторы были защищены системой счетчиков Гейгера-Мюллера, импульсы которых блокировали регистрацию нейтронов. Общий вид установок в соляной шахте, а также детектор в процессе сборки показаны на рис. 2 и 3.

В указанных условиях счет одиночных импульсов, обусловленный в основном альфа-распадом урана и тория, входящих в материалы  $^3\text{He}$ -счетчиков, составлял около 50 /час. Однако уже для двойных случайных совпадений уровень фона был настолько низким, что в течение ста суток не было зарегистрировано ни одного подобного события. Введение в чувствительный объем детектора образцов, которые исследовались в настоящей работе, практически не приводило к увеличению счета одиночных импульсов.

При выбранном методе наблюдения спонтанного деления эффективность его регистрации зависела от сред-

него числа мгновенных нейтронов деления  $\bar{\nu}$  и составляла от 15-30% ( $\bar{\nu}=2$ ) до  $\geq 50\%$  ( $\nu \geq 4$ ). Таким образом, при наличии в чувствительном объеме  $2 \cdot 10^{10}$  атомных ядер, испытывающих спонтанное деление с периодом полураспада  $10^9$  лет, скорость счета должна была составлять 5-10 событий в год. Для образцов весом 10 кг это соответствует концентрации  $10^{-15}$  грамма на грамм.

Калибровка аппаратуры производилась с помощью источников спонтанного деления  $^{238}\text{U}$  ( $\bar{\nu} = 1,99$ ),  $^{242}\text{Pu}$  ( $\bar{\nu} = 2,141$ ) и  $^{252}\text{Cf}$  ( $\bar{\nu} = 3,756$ ). Данные калибровок представлены в табл. 2. Они находятся во взаимном согласии друг с другом.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первая серия измерений была проведена с 9 кг насыщенной смолы. В течение 88-суточной экспозиции было зарегистрировано 42 события, главным образом двукратные и трехкратные /см. табл. 2/. Скорость счета, таким образом, составила почти 0,5 /сутки и была в три раза больше, чем при измерениях с образцами метеоритов<sup>1/</sup>.

Содержание урана в образцах определялось методом активации резонансными нейтронами в графитовой призме, в центре которой находилась система из урана и бериллия, облучаемая тормозным излучением микрофона с энергией электронов 15 МэВ. Количественное определение концентрации урана производилось по интенсивности характерных линий  $\gamma$ -спектров двух излучателей,  $^{239}\text{U}/23,5$  мин/ и  $^{239}\text{Np}/2,35$  дня/. В отдельном опыте проводилось выделение  $^{239}\text{Np}$  из представительных образцов смолы, облученных большим потоком нейтронов в ядерном реакторе. Для дополнительного контроля полученных данных применялся метод определения урана по трекам осколков вынужденного деления тепловыми нейтронами, которые наблюдались с помощью твердотельных детекторов.

По данным анализов, проведенных различными методами, было надежно установлено, что концентрация



Таблица 2

Тип эксперимента	Образец	Вес (кг)	Время (сутки)	ε (%)	Число событий с кратностью n				
					n=2	n=3	n=4	n=5	n=6
Наблюдение активности исследуемых образцов	Насыщенная смола	9	88	27	31	10	1	0	0
			10	38	28	14	1	0	1
	Минеральная фракция, смалта с 170кг смолы.	6	7	40	23	9	3	1	0
6			54	17	6	2	1	0	
Фоновые измерения	Без образца	0	10	27	0	0	0	0	0
			10	40	0	0	0	0	0
			20	54	0	0	0	0	0
	Оргстекло	10	50	38	0	0	0	0	0
			70	27	0	0	0	0	0
Запись - запись железа ***	15	16	27	0	0	0	0	0	
					26626	3085	220	23	0
					31251	4229	321	14	1
					19074	2939	246	12	0
					41522	8409	984	105	18
					77570	33296	7961	1258	130
					121	28	2	0	0
					3200	1431	388	64	7
					3967	2680	1159	298	84

\* Было зарегистрировано также 8 событий с кратностью 7 и 1 событие с кратностью 8.

\*\* Было зарегистрировано также 41 событие с кратностью 7 и 2 события с кратностью 8.

\*\*\* Химически чистый реактив.

урана в смоле составляла  $/2-3/ \cdot 10^{-8}$  г/г, то есть в исследуемом образце содержалось около  $5 \cdot 10^{15}$  атомов  $^{238}\text{U}$ . Поэтому фон от спонтанного деления урана не превышал одно событие за время измерений.

В дальнейшем были начаты опыты по повышению концентрации обнаруженной активности путем смыва различных химических элементов с насыщенной смолы. Для этой цели было взято 170 кг насыщенной смолы, которая промывалась последовательно различными элюентами: водой, 0,1М соляной кислотой и 2М растворами соляной, азотной и уксусной кислот. /Условия элюирования обрабатывались предварительно с помощью радиоактивных индикаторов. Показано, что для тяжелых элементов коэффициент извлечения близок к 90%/. Общий объем раствора после элюирования составил 2500 литров. Из раствора каждого элюента осаждались гидроксиды железа и затем фосфат железа. Общий вес сухих осадков составлял ~5 кг.

Активность спонтанного деления полученных продуктов измерялась с помощью нейтронных детекторов. Скорость счета событий деления от суммы всех осадков составила в среднем 5 /сутки. Это соответствует ~50% активности спонтанного деления исходной смолы. Числа зарегистрированных событий и их распределения по кратностям приведены в табл. 2.

Из распределений событий по кратностям, полученным при различных значениях эффективности регистрации одиночных нейтронов, можно оценить среднее число мгновенных нейтронов  $\bar{\nu}$ , если предположить, что величина  $\nu$  имеет нормальное распределение с определенной дисперсией  $\sigma^2$ . Оценка величины  $\bar{\nu}$  в значительной степени зависит от предположения о значении  $\sigma^2$  и увеличивается с уменьшением  $\sigma^2$ . По нашим оценкам, при  $\sigma^2 = 1,57$  /измеренное значение для  $^{252}\text{Cf}$  / среднее число нейтронов на акт деления для излучателя, содержащегося в смоле,  $\bar{\nu} \sim 4$ . Если, однако, предположить, что  $\sigma^2 = 2,6$ , наиболее вероятной оценкой для  $\bar{\nu}$  будет 2,5.

На рис. 4 показано распределение событий по кратностям, полученное суммированием результатов измерений, выполненных при различных значениях эффективности регистрации одиночных нейтронов /см. табл. 2/.



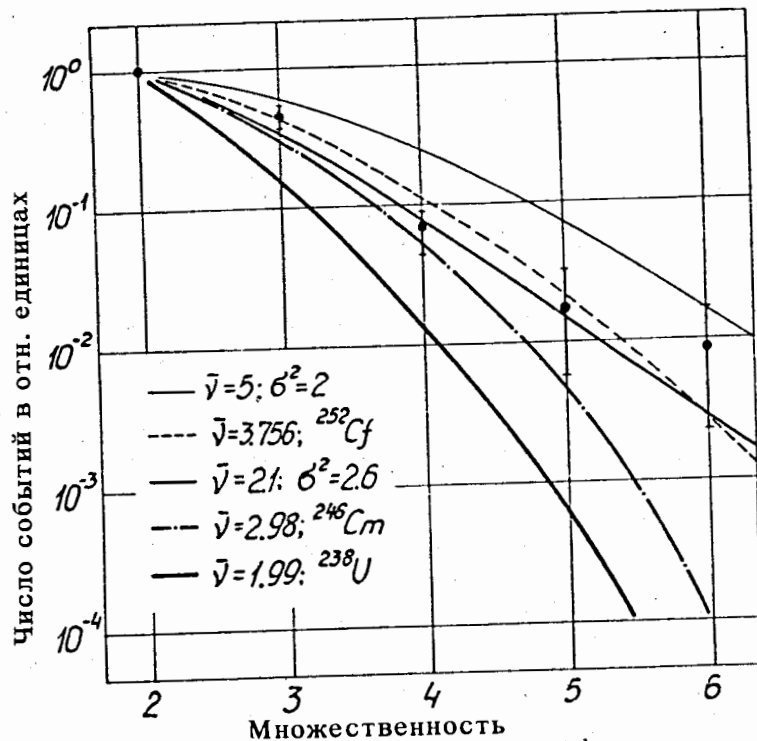


Рис. 4. Распределение зарегистрированных событий по кратностям для насыщенной смолы и продуктов смыва со 170 кг смолы. Черные точки с указанными статистическими ошибками соответствуют результатам, полученным суммированием данных измерений, выполненных при различных эффективностях регистрации одиночных нейтронов /  $\epsilon = 27\%$ ;  $38\%$ ;  $40\%$  и  $54\%$ /. На рисунке приведены также распределения по кратностям, соответствующие аналогичным измерениям для образцов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{246}\text{Cm}$  и  $^{252}\text{Cf}$ , а также для гипотетических излучателей спонтанного деления с  $\bar{\nu}=5$ ;  $\sigma^2=2$  и с  $\bar{\nu}=2,1$ ;  $\sigma^2=2,6$ . Распределение для  $^{252}\text{Cf}$  согласуется с данными калибровок /см. табл. 2/.

На этом же рисунке показаны распределения по кратностям, которые должны были наблюдаться в такой же серии измерений для спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ ,  $^{246}\text{Cm}$  и  $^{252}\text{Cf}$ , а также для гипотетических излучателей с  $\bar{\nu}=5$ ,  $\sigma^2=2$  и с  $\bar{\nu}=2,1$ ;  $\sigma^2=2,6$ . Экспериментальные распре-

деления по кратностям событий мало отличаются от того, что следует ожидать для  $^{252}\text{Cf}$ . Для объяснения наблюдаемого эффекта достаточно допустить примесь  $^{252}\text{Cf}$  в количестве одного атома на 5 г насыщенной смолы или  $2 \cdot 10^4$  атомов в осадках, полученных в результате смыва активности с 170 кг смолы.

Отметим, однако, что явление множественной эмиссии нейтронов наблюдалось в трех пробах смолы, взятых из различных частей колонны. Возможное загрязнение образцов изотопами Pu, Cm, Cf, которые применялись в здании нашей лаборатории в качестве циклотронных мишеней, контролировалось путем измерения альфа-активности проб. С этой целью нами проводилось химическое извлечение указанных элементов. Альфа-спектры полученных препаратов регистрировались с помощью кремниевых поверхностно-барьерных детекторов. В указанных условиях представлялось возможным обнаружение примесей техногенных трансурановых изотопов, характеризующихся отношением вероятностей альфа-распада и спонтанного деления  $\geq 200$ . Учитывая, что в крайнем случае отношение числа альфа-распадов к числу спонтанных делений в этих мишенях было не ниже  $10^5$ , можно установить предел уровня фона, обусловленного данным источником загрязнений: не более одного деления в 20 суток для всех образцов, представленных в табл. 2. Это означает, что счет от данного источника фона был более чем в 100 раз ниже, чем тот, который наблюдался на опыте. Для смеси техногенных трансурановых изотопов, которые могли попасть в челекенскую воду с атмосферными осадками, этот предел на три порядка ниже.

Однако нельзя считать исключенной полностью возможность объяснения наблюдавшегося эффекта спонтанного деления чрезвычайно малой примесью чистого изотопа  $^{252}\text{Cf}$ . Действительно, отношение вероятностей альфа-распада и спонтанного деления для этого изотопа равно  $\sim 30$  и находится ниже указанного предела обнаружения. Несмотря на то, что открытые чистые препараты  $^{252}\text{Cf}$  в помещении нашей лаборатории никогда не применялись, следует принимать во внимание возможность внесения такого загрязнения из посторонних источников.

Возможные загрязнения изотопом  $^{252}\text{Cf}$  должны тщательно рассматриваться всеми экспериментаторами, которые намерены проводить работы по поискам и концентрированию спонтанно делящихся сверхтяжелых элементов.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, из всей совокупности полученных данных следует, что в исследованной нами геотермальной воде полуострова Челекен, как и в исследовавшихся ранее метеоритах, обнаружена активность спонтанного деления, во много раз превышающая активность спонтанного деления урана.

Результаты многих тщательных экспериментов, проведенных ранее с целью поисков СТЭ, позволяют исключить предположение о происхождении наблюдаемого эффекта за счет радиоактивного распада какого-либо изотопа одного из известных элементов /изомерия или запаздывающее деление/. Действительно, в процессе поисков СТЭ<sup>1/2</sup>-6/ предпринимались попытки наблюдения

редких событий спонтанного деления в целом ряде образцов, обогащенных платиновыми металлами, тяжелыми элементами от ртути до висмута, редкими землями, а также рядом более легких элементов. В одном из экспериментов<sup>1/2</sup>, например, нами исследовались образцы свинца весом до 100 кг. В этих экспериментах, проведенных при высоком уровне чувствительности для образцов, содержащих указанные элементы в качестве главных компонент, были получены отрицательные результаты.

По нашему мнению, спонтанно делящийся нуклид, обнаруженный в гидротермах Челекена, так же как и нуклид, наблюдавшийся ранее<sup>1/</sup> в метеоритах, принадлежит к области СТЭ. Мы считаем необходимым провести дополнительные и еще более тщательные физические и химические эксперименты для получения данных о таких характеристиках нового нуклида, как его порядковый номер, массовое число и особенности спонтанного деления.

Несмотря на малые концентрации этого нуклида  $/3 \cdot 10^{-14} \text{ г/г}$  в насыщенной смоле и в ~15 раз больше в осадках, полученных от смыва с 170 кг смолы/, представляется возможным провести эти эксперименты с применением высокочувствительных методов, а также определить некоторые его химические свойства. Это позволит, как мы надеемся, проводить работу по его извлечению с большей эффективностью и избирательностью.

Авторы выражают свою искреннюю признательность за полезные и стимулирующие дискуссии проф. Л.М. Лебедеву, результаты многолетних исследований которого с челекенскими геотермальными источниками позволили сконцентрировать усилия на этом объекте; О.Константинеску, М.Константинеску, А.Адамеку, принимавшим участие в изучении свойств насыщенной смолы; Е.Л. Журавлевой, В.П. Перелыгину, Л.П. Кулькиной за помощь в проведении анализов образцов. Авторы благодарят Л.В. Пашкевич, проведшую работу по написанию английского варианта настоящей статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. ЯФ, 1977, 26, с.449.
2. Флеров Г.Н. и др. ЯФ, 1974, 20, с.472.
3. Flerov G.N. In: Proc. Int. Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Nashville, USA, 1974, v.2, p.459.
4. Ter-Akopian G.M. In: Proc. the 4th Int. Symp. on Transplutonium Elements, Baden-Baden, 1975, p.359.
5. Herrmann G. Inorganic Chemistry, 1975, ser. 2, v.8, Radiochemistry, ed. A.G. Maddock, p.221.
6. Stephan C. e.a. J. de Phys., 1975, 36, p.105.
7. Звара И. и др. ЯФ, 1977, 26, с.455.
8. Келлер О.Л. Радиохимия, 1975, 17, с.609.
9. Fricke B. Structure and Bonding, 1975, 21, p.89.
10. Чубурков Ю.Т., Лебедев Л.М. Радиохимия, 1974, 16, с.524.
11. Чубурков Ю.Т. и др. Радиохимия, 1974, 16, с.827.
12. Лебедев Л.М., Баранов Н.Н., Никитина И.Б. Геохимия, 1971, 7, с.823.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 июля 1978 года.