



УДК 621.039

А. А. Вальтер, академик НАН Украины В. Е. Сторижко,
А. В. Андреев, В. Н. Павлюк, А. И. Писанский

Природный источник высокообогащенного свинца-208 в Украине для ядерной энергетики

В рудопрооявлениях монацита на западе Кировоградской области установлена практически безурановая разновидность минерала возрастом 2 млрд лет, которая содержит ~10% тория и ~1% свинца чистотой 98% по 208 изотопу. Прогнозируется, что такой свинец является перспективным для использования в качестве теплоносителя в реакторах IV поколения без дополнительного изотопного обогащения. Описаны метод и результаты поисков такого сырья, приведены состав и структурная характеристика минерала, сделана оценка ресурсов.

Ключевые слова: свинец-208, торий, теплоноситель, рентгеновская флюоресценция, монацит.

Ядерная энергетика вступает в период создания реакторов IV поколения и реакторных систем с ускорителями ионов, в которых предусматривается использование новых эффективных теплоносителей.

В [1–3] показано, что свинец, сильно обогащенный 208-м изотопом, обладает неоспоримыми преимуществами перед другими теплоносителями. Этот материал имеет очень низкое значение поперечника захвата нейтронов и является слабым замедлителем нейтронов при упругом рассеянии во всей области реакторных энергий из-за его большого атомного веса и при неупругом рассеянии быстрых нейтронов — из-за высокого энергетического порога реакции возбуждения нуклида. Свинец-208 более безопасен по сравнению с легкими теплоносителями.

Прогнозируется, что применение ^{208}Pb в реакторах приведет к росту производства плутония и к трансмутации долгоживущих продуктов распада.

По сравнению со свинец-висмутовой эвтектикой свинец-208 имеет гораздо более низкую послеэксплуатационную токсичность и не требует расхода висмута, который с ростом его потребления может стать весьма дефицитным металлом.

Средняя природная распространенность изотопов свинца в настоящее время составляет: 1,4% ^{204}Pb ; 24,1% ^{206}Pb ; 22,1% ^{207}Pb ; 52,4% ^{208}Pb [4], что близко соответствует изотопному составу всех свинцовых руд и получаемого из них металла. Изотоп ^{204}Pb является

© А. А. Вальтер, В. Е. Сторижко, А. В. Андреев, В. Н. Павлюк, А. И. Писанский, 2015

первичным, сохранившимся со времени последнего нуклеосинтеза. Прочие изотопы свинца являются конечными продуктами цепочек распада радиоактивных семейств: $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ ($T_{1/2} = 703,8 \cdot 10^6$ лет); $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ($T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9$ лет); $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ лет).

Получение ^{208}Pb изотопа из природного свинца требует изотопного обогащения, что снижает его привлекательность из-за высокой стоимости процесса [5].

В [6, 7] обобщены данные о возможных природных источниках редких изотопов, образующихся в результате распада долгоживущих нуклидов и консервации продуктов распада в устойчивых минеральных матрицах. При благоприятном элементном составе минерала-хозяина процесс приводит к концентрации в естественных условиях некоторых изотопов в сильнообогащенном, чистом и даже в сверхчистом виде. Образующиеся изотопные продукты могут быть экстрагированы несложными химическими методами и использованы без дополнительного изотопного обогащения. Это значительно расширяет сферу применения таких естественнообогащенных изотопных продуктов и может представлять экономический интерес.

Накопление радиогенного изотопа ($C_{\text{рг}}$) определяется соотношением

$$C_{\text{рг}} = C_{\text{ра}}[\exp(\ln 2t/T_{1/2}) - 1],$$

где $C_{\text{ра}}$ — концентрация исходного радиоактивного нуклида; $T_{1/2}$ — период его полураспада; t — возраст минерала-хозяина [6].

Для накопления чистого изотопа должен реализоваться распад радиоактивного нуклида в течение геологически продолжительного времени в минерале, представляющем собой пространственно закрытую систему, изначально не содержащую элемента, к которому относится радиогенный изотоп, и не нарабатывающей других изотопов этого элемента в результате распада других нуклидов.

В связи с перспективами использования ^{208}Pb в ядерной энергетике возникает проблема прогнозирования, поиска, открытия и разработки месторождений высокообогащенного природного свинца-208.

Мы ставили задачу обнаружения в рудах Украины минерального носителя с очень высоким обогащением свинца по 208-му изотопу, перспективного для экономически целесообразного извлечения и использования без дополнительного изотопного обогащения.

Перспективными относительно чистого свинца-208 являются ториевые минералы значительного геологического возраста и, соответственно, их руды, не содержащие урана и первичного свинца [7].

Мы исходили из того, что Украинский кристаллический щит — древняя геологическая структура, занимающая около 1/3 территории Украины (рис. 1). Это регион, богатый рудами значительного геологического возраста, где встречены многочисленные проявления ториевого оруденения [8].

Как объект первоочередного изучения был выбран ортофосфат редких земель — монацит, имеющий идеальную формулу $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \dots)[\text{PO}_4]$, обычно содержащий значительное количество тория, входящего в структурную позицию церия.

Монацит является самым распространенным природным концентратором тория и редких земель. В то же время имеются данные о хорошей сохранности в структуре монацита радиогенного свинца, что позволяет эффективно использовать этот минерал для элементного датирования.



Рис. 1. Схема размещения проявлений монацита, изученных при поисках высокообогащенного свинца-208: I – Украинский щит; II – район развития изученных монацитовых россыпей Побужья; III – титано-циркониевые россыпи, содержащие монацит (1 – Малышевская; 2 – Тарасовская; 3 – Зеленоярская; 4 – Мокроялынская; 5 – Краснокутская); IV – россыпи коры выветривания, содержащие монацит (6 – Глуховецкая; 7 – Просьяновская); V – коренное проявление монацита Балка Корабельная (8); 6 – россыпное (а) и коренные проявления (б) безуранового монацита; 9 – Гайсинское; 10 – Табанское; 11 – Первомайское

Сравнительный кристаллохимический анализ структур монацита и фосфата свинца $Pb_3(PO_4)_2$ выявил [9] природу высокой емкости структуры монацита относительно атомов радиогенного свинца, которая составляет не менее половины катионных позиций Ce (Th) в минерале. Это и является, на наш взгляд, главной причиной хорошей сохранности радиогенного свинца в структуре монацита.

В случае монацита, изначально не содержащего свинца и урана, распад тория должен приводить к накоплению в минерале чистого ^{208}Pb .

В рудах месторождений Украины монацит в виде примесного компонента присутствует в мелкозернистых титано-циркониевых россыпях бассейна р. Днепр и в виде главного или одного из главных полезных компонентов в россыпях коры выветривания и аллювиальных россыпях преимущественно западной части Украинского щита (см. рис. 1). Здесь же известны и коренные проявления существенно монацитовых руд.

В монацитах разрабатываемых россыпей с учетом возраста минерала было оценено [7] содержание в свинце 208-го изотопа, которое составило от 60 до 88%.

В данной работе приведены результаты поиска монацита, высокообогащенного свинцом-208 в проявлениях коры выветривания и в коренных проявлениях в гранитоидных

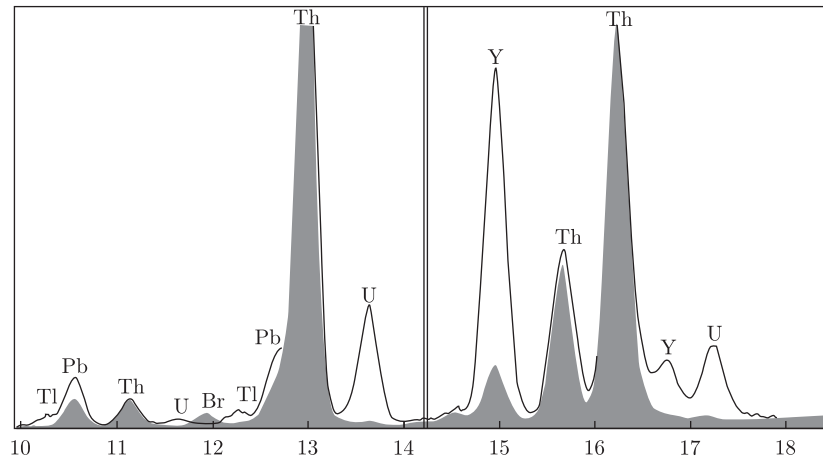


Рис. 2. Фрагменты рентгенофлуоресцентных спектров монацитов с соотношением уран/торий 0,0356 (линия) и 0,005 (залитый спектр)

породах Побужья. Первые положительные результаты, полученные в этом направлении, приведены в [10]. Материалом для исследования послужили шлиховые пробы рыхлых пород и протолочек коренных пород, отобранные при поисково-съёмочных работах Правобережной геологической экспедицией под руководством одного из авторов (В. Н. Павлюк).

Изначально рыхлые или измельченные породы после сепарации зерен по размерам (+0,5; 0,5–0,25 и –0,25 мм) были разделены на тяжелые и легкие фракции в бромформе плотностью 2,9 г/см³, а затем — по магнитным свойствам.

Монацит концентрируется (до 80%) в тяжелой электромагнитной фракции, содержание монацита в исходных пробах колеблется от 0,01 до 2%.

К настоящему времени опробован монацит 35 проявлений, расположенных в левобережье Южного Буга в полосе 150 × 40 км, вытянутой вдоль долины реки (см. рис. 1).

Для выбора разновидностей монацита, высокообогащенных 208-м изотопом свинца, использовался рентгенофлуоресцентный метод определения U/Th отношения как с помощью обычной процедуры анализа весовых количеств, так и при помощи оригинальной методики анализа единичных зерен.

Данные по отдельным зернам использовались для оценки колебаний состава монацитов и показали, как правило, высокую равномерность значений уран-ториевого отношения в монацитах в пределах отдельных проб, размер которых составлял 0,5–1 мм по оси зерна или по длине бороздовых проб коренных выходов.

Принцип отбраковки образцов монацита по спектрам иллюстрирует рис. 2.

В целом уран-ториевое отношение в монацитах опробованных проявлений колебалось от 0,18 до 0,0006 и незначительно — в пределах отдельных проявлений. Более тщательно исследовались пробы с U/Th отношением 0,005 и менее, что отвечает, без учета исходной примеси свинца, чистоте ²⁰⁸Pb выше ~97,5%.

На твердотельном масс-спектрометре МИ-1304 выполнена масс-спектрометрия свинца для проб пяти коренных и россыпного проявления монацита с низким содержанием урана (табл. 1).

В среднем для россыпного проявления в коре выветривания и пяти пунктов коренных проявлений высокообогащенного ²⁰⁸Pb монацита средняя изотопная чистота свинца-208 со-

ставила 97,96%. Исходя из данных [3], можно предположить, что она окажется достаточной для прямого использования такого свинца в качестве теплоносителя.

Причиной изотопного загрязнения свинца-208 в изученных монацитах является вхождение в минерал при кристаллизации примеси урана и первичного (исходного) свинца. Количество такого свинца можно оценить по концентрации ^{204}Pb в проанализированных образцах (см. табл. 1). Средняя концентрация 204-го изотопа в свинце 2 млрд лет назад во время кристаллизации изученных образцов монацита была оценена, в результате расчета изменения этой величины во времени, в 1,54%. При этом возраст Земли был принят в соответствии с современными представлениями как $T = 4,56$ млрд лет (гомогенная Земля), а изотопные отношения в свинце на то время были подобраны такими ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9,31$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10,87$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 29,20$), чтобы соответствовали современному изотопному составу свинца и урана ($^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137,8$) [4].

Вычисленная первичная концентрация урана составляла в момент кристаллизации в разных из исследованных образцов от 740 до 220 мг/кг, а концентрация исходного свинца — (27–117) мг/кг. При таких величинах примеси урана и первичного свинца в монаците вносят сравнимый вклад в загрязнение свинца-208. Так, вклад урана в загрязнение свинца-208 в образце 674 составил 0,86%, а первичного свинца — 0,45% при суммарной изотопной чистоте 98,696%.

Общий элементный состав безуранового монацита приведен в табл. 2.

Безурановый монацит, содержащий чистый изотоп ^{208}Pb , по внешним признакам и макроскопическим свойствам не отличается от обычных разновидностей этого минерала. Мо-

Таблица 1. Изотопный состав свинца и возраст монацитов, высокообогащенных свинцом-208

Образец	Измеренные отношения изотопов свинца			Рассчитанный изотопный состав свинца, %				Возраст t , млрд лет*
	204/206	207/206	208/206	204	206	207	208	
21	0,001	0,144	46,289	0,002	2,108	0,303	97,586	2,104
22	0,001	0,132	48,508	0,002	2,014	0,266	97,718	1,929
2224	0,00115	0,13990	47,242	0,00238	2,06682	0,28916	97,6416	2,017
674-2	0,001365	0,14372	86,686	0,00155	1,13855	0,16364	98,6963	2,030
854-4	0,000520	0,13129	51,504	0,00099	1,89985	0,24943	97,8497	2,016
1315-II	0,00038	0,12968	57,226	0,00065	1,71362	0,22222	98,0635	2,021

Примечание: *Возраст вычислен по соотношению радиогенных изотопов $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ с поправкой на изотопный состав свинца, вошедшего в структуру минерала при кристаллизации.

Таблица 2. Элементный состав монацита, высокообогащенного 208-м изотопом свинца % (мас.)

Образец	Si	P	Ca	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Pb	Th	U	Y
21 ($n = 1$)	0,63	12,24	0,94	13,45	24,72	1,23	8,92	0,38	0,18	0,843	8,94	0,072	0,770
22 ($n = 1$)	0,66	12,20	0,98	13,13	24,17	1,21	9,30	0,37	0,19	0,942	9,60	0,030	0,558
674 ($n = 10$)	0,78	11,68	0,38	13,68	23,81	2,48	7,28	0,019	н. о.	0,997	8,86	0,017	0,429
σ	0,07	0,28	0,06	0,99	0,47	0,61	0,47	0,007		0,153	1,05	0,008	0,068
854 ($n = 17$)	0,97	11,41	0,55	12,26	23,01	3,12	8,00	0,16	0,49	1,00	11,67	0,060	0,717
σ	0,12	0,42	0,08	0,62	0,68	0,22	0,26	0,14	0,18	0,27	2,29	0,011	0,211
1315 ($n = 17$)	0,92	11,59	0,75	11,25	22,02	3,05	8,66	0,24	0,51	0,84	8,10	0,052	0,52
σ	0,05	0,37	0,09	0,53	0,56	0,21	0,17	0,22	0,17	0,06	0,67	0,013	0,065
2224_4 ($n = 5$)	0,40	12,73	1,20	9,40	22,70	3,18	9,13	0,017	н. о.	0,84	8,45	0,059	0,447
σ	0,02	0,19	0,06	0,39	0,23	0,21	0,42	0,012		0,09	1,23	0,017	0,079

Примечание: Pb, Th, U определены рентгенофлуоресцентным методом, остальные элементы — методом электронного микрозондирования.

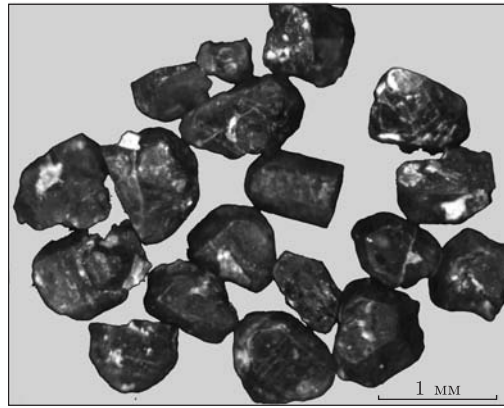


Рис. 3. Идиоморфные зерна наиболее чистого по ^{208}Pb безуранового монацита, обр. 674

нацит кристаллизуется в моноклинной сингонии, пространственная группа — $P2_1/n$. Параметры элементарной ячейки изученных образцов безуранового монацита соответствуют типичным для этого минерала значениям: $a_0 = (6,75 \pm 0,07) \text{ \AA}$; $b_0 = (7,059 \pm 0,09) \text{ \AA}$; $c_0 = (6,46 \pm 0,08) \text{ \AA}$; $\beta = (104,06 \pm 0,08)^\circ$; $V = (299,2 \pm 0,4) \text{ \AA}^3$.

Высокообогащенный свинцом-208 монацит образует достаточно чистые частично ограниченные зерна размером 0,2–1 мм, окрашенные в желтовато-коричневый цвет. Хорошо окристаллизованные зерна имеют изометричный (пирамидальный) или короткопризматический габитус (рис. 3).

Полученные данные позволили сделать прогноз распространенности и вероятных экономических показателей разработки в Украине монацита, сильнообогащенного свинцом-208.

О практическом значении для получения свинца, высокообогащенного 208-м изотопом, могут свидетельствовать некоторые разновидности монацита разрабатываемых россыпей: крупнейшей Самотканской (Мальшевской) и Волчанской. Благодаря заметному парамагнетизму монацит при существующей мощности рудника может попутно извлекаться при разработке россыпи в количестве порядка 100 т в год, что примерно соответствует 3,5 т тория и 0,5 т свинца, обогащенного 208 изотопом. Сейчас монацит рассматривается как вредная радиоактивная примесь и не извлекается.

Состав монацита Мальшевской россыпи в смысле содержаний U, Th, Pb и изотопии свинца для целей датирования хорошо изучен в работе [11] и иллюстрируется табл. 3.

Однако главную ценность представляют впервые установленные нами безурановые монациты Побужья, которые, очевидно, могут рассматриваться как сырье для твердотельных теплоносителей, не требующее дополнительного изотопного обогащения.

Таблица 3. Содержание тория, урана, свинца и изотопия свинца монацитов Мальшевской россыпи по данным работы [11]

Средние значения из 224 рентгенофлуоресцентных определений			Изотопия свинца в монаците по данным масс-спектрометрического анализа средней пробы, % (отн.)				Среднее значение по 70 пробам, обедненным ураном. Элементы представлены в % (мас.), изотопы свинца — в % (отн.) (расчетные данные)					
Th	U	Pb	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	U	Th	Pb	Изотопия свинца		
										^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
3,52	0,23	0,30	0,04	13,1	1,43	85,42	0,06	3,63	0,33	3,8	0,4	95,7

Наиболее хорошо изучено Табановское проявление коренных руд, расположенное на юго-востоке Кировоградской области. Район имеет развитую транспортную инфраструктуру. Коренные породы обнажаются в скалах высотой 15–20 м в обрывистом правом берегу долины р. Ятрань и вскрыты карьером. На остальной площади они обычно перекрыты 10–15 м рыхлых суглинков и корой выветривания. Рудами являются гранитные пегматиты и пегматоидные граниты, залегающие в виде круто падающих жил, преимущественно СЗ простирания, установленной мощностью до 6 м. Протяженность рудной зоны составляет 4,5 км при средней мощности 50 м. Содержание монацита в пегматитах составляет 1,3–2,7%. Кроме того, пегматиты содержат в среднем 0,5% циркона, 0,27% ильменита, 0,5% граната, 0,5% апатита. Общие прогнозные ресурсы проявления оценены в 12 млн т руды, содержащей 300000 т монацита, т. е. в 27 тыс. т тория, 180 тыс. т редких земель и 2,8 тыс. т свинца-208 чистотой 97,7%.

К югу от Табановского проявления сделаны находки бузурановых монацитов (пробы 2224, 1315, 854, 764), расположенные в полосе примерно $13,5 \times 6$ км, вытянутой в северо-западном направлении к северу от г. Первомайск (между пунктами 10 и 11 на рис. 1). Здесь монацит также приурочен к пегматоидным гранитам, но масштабы проявлений не установлены.

Россышное оруденение с бузурановым монацитом установлено в бассейне р. Собь (район с. Чечелевка) и относится к проявлениям коры выветривания. Здесь под рыхлыми осадками в интервале глубин 3–50 м обнаружена гранитная дресва, содержащая 44 г/т бузуранового монацита (см. рис. 1, точка 9). Расположенные севернее россыпи характеризуются монацитом с низким обогащением по 208-му свинцу. Россыпи к югу от указанного пункта в направлении Табановского проявления остались неопробованными.

Приведенные первые результаты исследования распространенности в рудах Украины монацита — носителя свинца, сильно обогащенного ^{208}Pb , показывают, что выявление месторождений свинца такого типа является вполне реальной задачей.

Возможность организации добычи такого монацита в значительной мере, на наш взгляд, зависит от определения путей использования всех полезных компонентов минерала и, прежде всего, тория. Необходимо решить вопросы использования этого элемента и (или) его безопасного длительного хранения. В связи с заявленными в разных странах перспективами создания ториевых энергетических реакторов использование тория выглядит вполне реальным. При принципиальном решении этого вопроса возникнет также вопрос использования достаточно мощного источника редкоземельных элементов, высвобождающихся при переработке монацита.

Добыча валового монацитового концентрата при разработке мелкозернистых титано-циркониевых россыпей, например, Малышевской в Украине, почти не потребует дополнительных затрат и ее себестоимость в первом приближении может быть принята примерно равной себестоимости добычи цирконового концентрата ~ 1 \$ США/кг. Стоимость гидрометаллургического выделения свинца из монацита по аналогии со сходными процессами может быть оценена в ~ 24 – 30 \$ США/кг.

Хотя средний состав свинца россышного монацита недостаточно обогащен 208-м изотопом (см. табл. 3), существует вероятность разработки простого метода разделения монацита по флотационным, магнитным или другим свойствам с выделением низкоурановой фракции минерала.

Вполне реальной выглядит возможность добычи бузуранового монацита из охарактеризованных выше коренных и россышных проявлений Побужья, имеющих значительный

потенциал для наращивания ресурсов. Их освоение потребует более тщательных экономических оценок капитальных и эксплуатационных затрат, которые, однако, обещают быть благоприятными в связи с близостью руд к поверхности Земли и развитой инфраструктурой региона.

В настоящее время выявлены коренные проявления (гранитные пегматиты и пегматоидные граниты) таких руд и проявление в коре выветривания. С достаточной степенью достоверности можно утверждать, что потенциал установленного рудного района, по крайней мере, в несколько раз превышает данные, приведенные выше для Табанского проявления.

Имеющиеся результаты позволяют прогнозировать возможность организации экономически целесообразного производства свинца-208 с изотопной чистотой ~98% на уровне сотен тонн в год.

Авторы благодарны Л. М. Степанюку за содействие в выполнении масс-спектрометрических определений.

Цитируемая литература

1. *Khorasanov G. L., Blokhin A. I., Valter A. A.* New Coolant from Lead Enriched with the Isotope Lead-208 and Possibility of Its Acquisition from Thorium Ores and Minerals for Nuclear Energy Needs // Nuclear reactors, 2012. – 338 p. Chapt. 4. – P. 58–70.
2. *Khorasanov G. L. and Blokhin A. I.* Some Advantages in Using Lead-208 as Coolant for Fast Reactors and Accelerator Driven Systems // Application of stable lead isotope Pb-208 in nuclear power engineering and its acquisition techniques. Ed. G. L. Khorasanov. – New York: Nova Science, 2013. – 184 p. Chapt. 1. – P. 1–19.
3. *Shmelev A. N., Kulikov G. G., Apse V. A., Chekin A. A., Kulikov E. G.* Radiogenic Lead with Dominant Content of ^{208}Pb : New Coolant, Neutron Moderator and Reflector for Innovative Nuclear Facilities // Ibid. Chapt. 3. – P. 43–97.
4. *Parrington J. R., Knox H. D., Breneman S. L. et al.* Nuclides and Isotopes. Sixteen Edition. – Lockheed Martion Corporation, 2002. – 89 p.
5. *Смирнов Ю. А., Борисович В. Д., Сулаберидзе Г. А.* Оценка удельных затрат на получение изотопа свинец-208 на газовых центрифугах при использовании различного сырья // Теорет. основы хим. технологии. – 2012. – 46, № 4. – С. 463–469.
6. *Valter A. A., Storizhko V. E., Dikiy N. P., Dovbnaya A. N. et al.* Nuclear-Analytical and Mineralogical Principles and Techniques for Prediction and Investigation of the Native-Pure Rare Isotope Occurrence // Problems of atomic science and technology. – 2005. – No 6(45). – P. 142–146.
7. *Вальтер А. А.* Два доповнення до ядерної мінералогії // Записки Укр. мінерал. тов-ва. – 2011. – 8. – С. 24–29.
8. *Анисимов В. А., Кузьмин А. В., Макивчук О. Ф., Михницкая Т. П., Рябенко В. А.* Ториеносность Украинского кристаллического щита и его склонов // Геолог. журн. – 2007. – № 7. – С. 51–58.
9. *Valter A. A., Podbereskaya N. V., Ponevchinsky V. V., Pisansky A. I.* Pure ^{208}Pb isotope in monazite: crystal chemical and practical aspects // III Intern. Conf. “Crystallogenesi and mineralogy”. – September 27 – October 1. – 2013. – Novosibirsk, Russia. Abstract volume (Compiled and edited by T. B. Bekker, K. D. Litasov, N. V. Sobolev). – P. 59–60.
10. *Valter A. A., Khorasanov G. L., Storizhko V. E., Andreev A. V., Kramchenkov A. B., Pavljuk V. N. Pisansky A. I., Ponevchinski V. V.* Investigation of Possibilities for Production of Radiogenic Lead Highly Enriched with 208 Isotope from Thorium Ores of Ukraine // Proceedings of Forth Conference “Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear Technologies (Editor-in-Chief G. I. Toshinsky)” (HLMC-2013). – Obninsk: SSC RF – IPPE, 2013. – 2. – P. 364–372.
11. *Андреев А. А.* Возраст, геохимические особенности и возможные источники происхождения монацита территории Украины. – Дис. ... канд. геол. наук. – Киев, 2011. – 190 с.

References

1. Khorasanov G. L., Blokhin A. I., Valter A. A. Nuclear reactors, 2012, Chapter 4: 58–70.
2. Khorasanov G. L., Blokhin A. I. Application of stable lead isotope Pb-208 in nuclear power engineering and its acquisition techniques, New York: Nova Science, 2013: 1–19.
3. Shmelev A. N., Kulikov G. G., Apse V. A., Chekin A. A., Kulikov E. G. Application of stable lead isotope Pb-208 in nuclear power engineering and its acquisition techniques, New York: Nova Science, 2013: 43–97.
4. Parrington J. R., Knox H. D., Breneman S. L. et al. Nuclides and Isotopes. Sixteen Edition. Lockheed Martion Corporation, 2002, **89**: 5.
5. Smirnov Yu. A., Borisevich V. D., Sulaberidze G. A. The Theoretical Bases of Chemical Technology, 2012, **46**, No 4: 463–469 (in Russian).
6. Valter A. A., Storizhko V. E., Dikiy N. P., Doubnya A. N. et al. Problems of atomic science and technology (PAST), 2005, No 6(45): 142–146.
7. Valter A. A. Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society, 2011, **8**: 24–29 (in Ukrainian).
8. Anidsimov V. A., Kuzmin A. V., Makivchuk O. F., Mihnitckaya T. P., Ryabenko V. A. Geological J., 2007, No 7: 51–58 (in Ukrainian).
9. Valter A. A., Podbereskaya N. V., Ponevchinsky V. V., Pisansky A. I. III Internat. Conf. “Crystallogenesi and mineralogy” September 27–October 1, 2013, Novosibirsk, Russia. Abstract volume (Compiled and edited by T. B. Bekker K. D. Litasov N. V. Sobolev): 59–60.
10. Valter A. A., Khorasanov G. L., Storizhko V. E., Andreev A. V., Kramchenkov A. B., Pavljuk V. N., Pisansky A. I., Ponevchinski V. V. Proceedings of Forth Conference “Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear Technologies (Editor-in-Chief G. I. Toshinsky)” (HLMC-2013), Obninsk: SSC RF–IPPE, 2013, **2**: 364–372.
11. Andreev A. A. Monazite: age, geochemical peculiarities and possible source of origin on the territory of Ukraine, Ph.D. Thesis, Kiev, 2011 (in Russian).

*Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы
Киевский национальный университет
им. Тараса Шевченко
Правобережная экспедиция Украинской
геологической компании, с. Фурсы, Киев. обл.*

Поступило в редакцию 04.12.2014

**А. А. Вальтер, академік НАН України В. Ю. Сторіжко, О. В. Андреев,
В. Н. Павлюк, А. І. Писанський**

Природне джерело високозбагаченого свинцю-208 в Україні для ядерної енергетики

*Институт прикладної фізики НАН України, Суми
Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
Правобережна експедиція Української геологічної компанії, с. Фурси, Київ. обл.*

В рудних проявах монациту на заході Кіровоградської області встановлено практично безурановий різновид мінералу віком 2 млрд років, що містить ~10% торію і ~1% свинцю чистотою 98% за 208 ізотопом. Прогнозується, що такий свинець є перспективним для використання як теплоносія в реакторах IV покоління без додаткового ізотопного збагачення. Описано метод і результати пошуків такої сировини, наведено склад і структурні характеристики мінералу, зроблено оцінку ресурсів.

Ключові слова: свинець-208, тоорій, теплоносії, рентгенівська флуоресценція, монацит.

A. A. Valter, Academician of the NAS of Ukraine **V. Ye. Storiszko**, **A. V. Andreev**,
V. N. Pavljuk, **A. I. Pisansky**

Natural source of highly enriched lead-208 in Ukraine for nuclear power industry

Institute Applied Physics of the NAS of Ukraine, Sumy

Taras Shevshenko National University of Kiev

Right-bank Expedition of Ukrainian Geological Company, Fursy, Kiev region

In monazite ore deposits on the west of the Kirovograd area, the variety of the mineral by an age of 2 billion years practically without uranium, which contains ~10% of thorium and ~1% of lead with cleanliness of 98% on 208 isotope is established. It is predicted that such lead may be a perspective coolant for reactors of the IV generation without additional isotope enrichment. The method and results of searching for such raw material are described, the content of elements and structural characteristics of the mineral are presented, and the estimation of its resources is done.

Keywords: lead-208, thorium, coolant, X-ray fluorescence, monazite.