

Генезис ореолов радиогенного свинца докембрийских урановых месторождений

А. В. ТАРХАНОВ, В. И. ЖУКОВА

УДК 550.8:553.495

Докембрийские урановые месторождения [1—5] являются исключительно благоприятными объектами для изучения возможности применения изотопного свинцового метода поисков. С одной стороны, это обусловлено длительностью существования урановых руд, обеспечивающей накопление больших масс радиогенного свинца, с другой — сложной послерудной геологической историей развития месторождений, что привело в ряде случаев к разобщению свинца и нераспавшейся части урана.

В настоящей работе рассматриваются соотношения свинца и урана в урановых минералах, рудах и вмещающих породах, форма нахождения радиогенного свинца, генезис его ореолов и возможности использования изотопных отношений свинца при поисках месторождений и оценке аномалий.

Абсолютный возраст месторождений урана, по данным многих исследователей, в том числе и по нашим (табл. 1), близок к 1800 млн. лет. Как показывают несложные расчеты, содержание свинца в минералах и породах этого возраста определяется формулой

$$Pb_p = 0,35U + 0,09Th + Pb_{\phi},$$

где U, Th — содержание в минерале или породе соответственно урана и тория; Pb_{ϕ} — фоновое содержание свинца в породе.

В рассматриваемых месторождениях в подавляющем большинстве проб фактическое содержание свинца не соответствует расчетному. Обычно в урановых минералах отмечается недостаток радиогенного свинца, а во вмещающих породах — его избыток. В урановых рудах отношение фактического содержания свинца к расчетному колеблется от 22 до 520%.

На одном из исследуемых месторождений основным урановым минералом является уранинит, в подчиненном количестве присутствует настуран. Уранинит, образующий более или менее равномерную вкрапленность в рудах, представлен грубозональными скелетными или реликтовыми кристаллами кубической или ок-

таэдрической формы. Размеры кристаллов — сотые и тысячные доли миллиметра. Настуран в основном концентрируется в маломощных карбонатных прожилках, образуя коллоидные корковые выделения или вкрапленность отдельных сферолитов. Вмещающие породы характеризуются чрезвычайно низкими фоновыми содержаниями урана ($> 0,0001\%$), тория ($> 0,0001\%$) и свинца ($> 0,001\%$).

Содержание тория в урановых рудах не превышает первых десятитысячных процента. В этом случае количество свинца в минералах и породах должно составлять 0,35% от имеющегося в них урана. Однако фактическое содержание свинца в уранинитах и настуранах значительно ниже (табл. 2) и по результатам анализов 27 проб составляет в среднем 73% от расчетного для возраста 1800 млн. лет. При этом распределение отношений содержаний по пробам следующее: 45% — одна проба, 57% — одна; 60—70% — три; 70—80% — восемнадцать; 92% — одна; 103% — одна проба. Таким образом, в среднем более четверти радиогенного свинца, накопившегося за 1800 млн. лет при распаде урана, было вынесено в результате каких-то геологических процессов.

Для окислов урана характерны повышенные значения отражательной способности (до 23%), микротвердости (до 950 $кГ/мм^2$), параметра элементарной ячейки a_0 (до 5,495 Å) и высокое содержание свинца (до 10—18%). Химическими, рентгеноструктурными, спектральными, термическими, минераграфическими и минералогическими исследованиями, проведенными совместно с Б. М. Еловым и Н. Г. Назаренко,

Изотопный состав свинца уранинитов и урановой руды

Таблица 1

Состав пробы	Pb ²⁰⁴	Pb ²⁰⁶	Pb ²⁰⁷	Pb ²⁰⁸	Pb ²⁰⁷ */Pb ²⁰⁶	Возраст, млн. лет
Уранинит	0,3	100	11,32	0,85	0,11	1800
Уранинит	0,057	100	11,64	1,74	0,11	1800
Уранинит	0,05	100	11,33	1,40	0,11	1800
Урановая руда	0,02	100	10,95	0,03	0,107	1750

* С поправкой на обыкновенный свинец [6].

Содержание урана, свинца и сульфидной серы в урановых минералах по данным химических анализов, вес. %

Таблица 2

Минералы	Уран	Свинец			Серя сульфидная	Отношение фактического общего содержания свинца к расчетному, %
		галенитный	негаленитный	расчетное содержание для возраста 1800 млн. лет		
Уранинит	53,99	3,88	10,56	18,9	0,6	75
Уранинит	57,59	Не опр.	18,65	20,3	Не опр.	92
Уранинит	40,45	4,98	5,03	14,1	0,77	71
Настуран	56,63	3,43	13,59	19,8	0,53	86
Настуран	65,96	11,64	1,75	23,0	1,80	57

в окислах урана установлены примеси кварца, карбонатов и галенита. Поскольку никаких других сульфидов в пробах не обнаружено, вся сульфидная сера считается связанной в галените. Однако фактическое содержание свинца в пробах значительно превышает количество, необходимое для образования галенита (см. табл. 2). Избыточный свинец (негаленитный свинец) скорее всего входит в кристаллическую решетку урановых минералов, повышая их физические параметры.

Для подтверждения высказанного предположения настуран с высоким содержанием негаленитного свинца прокаливался при температурах 500—1000° С на воздухе и в токе водорода и при 800° в вакууме. Нагревание на воздухе при 600° и выше способствовало образованию кубической фазы с параметром $a_0 = 5,60 \text{ \AA}$, идентичной соединению $PbUO_{4-x}$ [7].

По данным В. А. Киркинского [8], при взаимодействии окиси урана со свинцом галенита соединение $PbUO_{4-x}$ не образуется, что указывает на участие негаленитного свинца в образовании данной фазы в нашем случае. При прокаливании не возникает переходная фаза U_3O_8 , что также подтверждает данные о нахождении в образцах негаленитного свинца, который затрудняет переход структуры двуокиси урана в UO_3 даже при повышенных температурах.

Прокаливание в вакууме при 800° уменьшает параметр решетки от 5,495 \AA у исходной пробы до $5,44 \pm 0,01 \text{ \AA}$, что можно объяснить лишь выходом свинца из решетки минерала.

В токе водорода структура типа флюорита сохраняется вплоть до 1000°. При этом с повышением температуры до 600—700° параметр решетки постепенно уменьшается от 5,495 до 5,41 \AA . Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению параметра решетки до

5,435 \AA при 900—1000°. Результаты химических анализов показывают, что уже при 700° весь уран в пробе находится в четырехвалентном состоянии. Поэтому уменьшение параметра можно объяснить выходом из кристаллической решетки настурана находившегося там свинца, причем эта тенденция столь велика, что перекрывает рост параметра, обусловленный восстановлением урана и упорядочением кристаллической структуры в процессе нагревания. Присутствие на рентгенограммах, наряду с линиями двуокиси урана, линий элементарного свинца подтверждает правильность выводов.

Галенит в урановых минералах отмечается постоянно. В уранините он образует вкрапленность мельчайших кубических кристаллов (рис. 1), в настуране слагает самостоятельные волосовидные прожилки (рис. 2). Иногда встречаются прожилки галенита за пределами скоплений уранинита или настурана.

Содержание свинца в урановых рудах (табл. 3), как и в минералах, чаще всего не соответствует расчетному. В целом по некоторым рудным телам отмечается недостаток радиогенного свинца, но в отдельных пробах содержание свинца несколько раз превышает расчетное, что, вероятно, связано со значительным выносом урана.

Во вмещающих метасоматически измененных породах фиксируются ореолы радиогенного свинца, которые прослеживаются над рудными телами более чем на 200 м. При этом ширина ореола значительно превосходит мощность рудных тел (рис. 3). Распределение свинца в ореолах крайне неравномерное. На рис. 3 границы полей изоконцентраций проведены по преимущественной встречаемости тех или иных содержаний. На самом деле даже в поле концентраций 0,1% и более содержание свинца в ряде проб не превышает нескольких тысячных про-

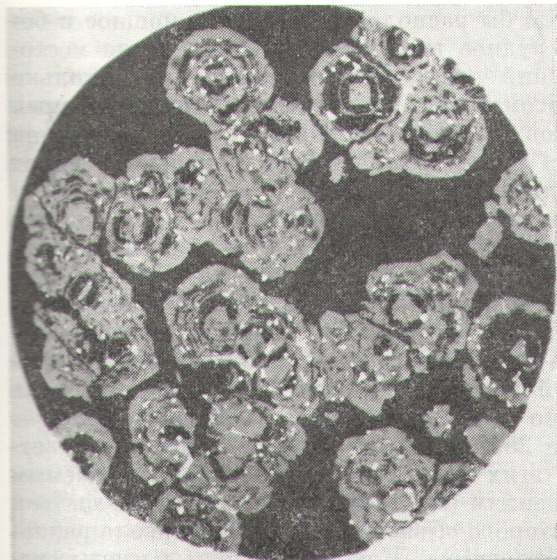


Рис. 1. Вкрапленность галенита (белое) в зональных кристаллах уранинита.

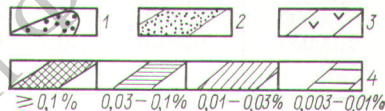
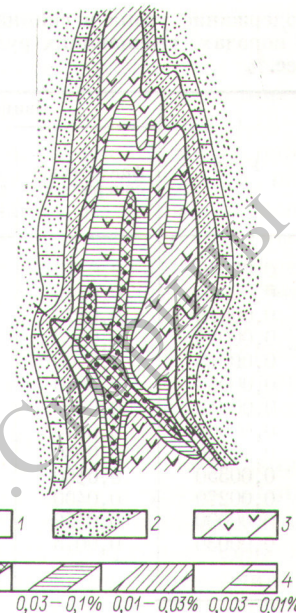
цента. Форма нахождения свинца в ореолах достоверно не установлена, однако, несомненно, часть его находится в форме галенита. Об этом свидетельствуют постоянные находки линзочек этого минерала (мощностью до 1 см) в метасоматитах, окаймляющих рудные тела. Содержание урана в ореолах значительно ниже содержания свинца (табл. 4); последнее в десятки раз превышает количество свинца, которое могло накопиться при распаде урана за 1800 млн. лет. Тем не менее, по данным изотопных исследований, подавляющая часть свинца является ради-



Рис. 2. Выделения галенита (белое) в настуране.

Рис. 3. Схема строения ореола радиогенного свинца вокруг рудного тела (разреза):

1 — урановые руды; 2 — метаморфические породы; 3 — метасоматиты; 4 — содержание свинца.



огенной как в валовых пробах, так и в галенитах, отобранных в пределах ореолов (табл. 5). Примечательно, что отношение Pb^{207}/Pb^{206} с поправкой на обыкновенный свинец, соответствующей возрасту метаморфизма руд (400—600 млн. лет), колеблется от 0,11 до 0,128.

Содержание урана и свинца в урановых рудах, усл. ед.

Таблица 3

Уран	Свинец		Отношение фактического содержания свинца к расчетному, %
	фактическое содержание	расчетное содержание для возраста 1800 млн. лет	
240 *	60	84	71,5
200 **	60	70	86
2500	880	880	100
96	20	34	59
54	12	18	67
600	640	210	320
136	20	48	42
72	16	26	62
108	36	38	95
240	440	84	520
36	4	12	33
560	800	196	410
98	8	34	23,6
294	160	102	157
242	94	146	66
528	40	1840	22
280	600	182	330

* Среднее по 21 пробе из одного рудного тела.
 ** Среднее по 30 пробам из руд месторождения.

Содержание урана и свинца в породах, вмещающих рудные тела, * вес. %

Таблица 4

Уран	Свинец		Отношение фактического содержания свинца к расчетному, %
	фактическое содержание	расчетное содержание для возраста 1800 млн. лет	
0,00060	0,0110	0,00020	5500
0,00036	0,0240	0,00013	18500
0,00018	0,0170	0,00006	28000
0,00054	0,0490	0,00019	26000
0,00018	0,0100	0,00006	17000
0,00063	0,0070	0,00022	3500
0,00018	0,0090	0,00006	15000
0,00360	0,0570	0,00130	4400
0,00180	0,0530	0,00060	8800
0,00350	0,0160	0,00120	1300
0,00270	0,0400	0,00950	4200
0,00090	0,0150	0,00030	5000
0,00030	0,0075	0,00010	7500

* Пробы отбирались в пределах ореолов свинца.

но было бы располагаться весьма мощное и богатое рудное тело. Однако рудные тела месторождений данного типа локализуются только в метасоматитах, а в пределах рассматриваемых ореолов наблюдается лишь самая начальная стадия метасоматического изменения пород (дорудная).

При втором предположении, зная возраст месторождения и задаваясь возрастом продуктивной толщи, можно рассчитать [6] отношение Pb^{207}/Pb^{206} в радиогенном свинце, ореол которого вокруг рудных тел образовался одновременно с месторождением. Если возраст продуктивной толщи 2000 млн. лет, это отношение должно быть равно 0,22; 2300 млн. лет — 0,26 и 2500 млн. лет — 0,29. Явное несоответствие этих значений фактически наблюдаемым отношениям (см. табл. 5) заставляет отказаться и от второго объяснения генезиса ореола радиогенного свинца. Как показывают расчеты, наиболее характерные для ореолов свинца отношения Pb^{207}/Pb^{206} (0,122—0,128) могли получиться лишь при отделении радиогенного свинца 400—600 млн. лет назад от урановых руд с абсолютным возрастом 1800 млн. лет. В пользу такого предположения свидетельствует и постоянный недостаток радиогенного свинца в урановых минералах и части урановых руд. Возможность миграции радиогенного свинца из урановых минералов была подтверждена экспериментальным путем А. И. Тугариновым [6], а также приведенными выше результатами наших опытов по нагреванию настурана.

Процесс выноса свинца из урановых минералов можно связывать или с одним из этапов тектонической деятельности, который проявился в образовании многочисленных разрывных нарушений и внедрении даек основных и ультраосновных пород, или с формированием нижнепалеозойской коры выветривания. Конкретная роль каждого из этих процессов в послерудной истории урановых месторождений и связанное с ними изменение минерального состава руд и вмещающих пород в настоящее время не выяснены и должны стать предметом специального изучения. Однако какими бы ни были причины миграции свинца, она обусловила образование значительных по размерам ореолов повышенных концентраций радиогенного свинца. Существование этих ореолов, несом-

Можно высказать следующие предположения о генезисе ореолов радиогенного свинца: 1) свинец образовался *in situ* при радиоактивном распаде урана, нераспавшаяся часть которого была впоследствии вынесена за пределы ореолов; 2) ореолы свинца образовались одновременно с урановыми рудами за счет радиогенного свинца, вынесенного вместе с ураном из какой-либо древней толщи, обогащенной ураном; 3) ореолы возникли за счет радиогенного свинца, вынесенного из урановых руд по прошествии некоторого времени после их образования.

Первое предположение маловероятно, так как, судя по размерам ореола радиогенного свинца, в верхней части месторождения долж-

Изотопный состав свинца галенитов и пирита

Таблица 5

Состав проб	Pb^{204}	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}	$Pb^{207}*/Pb^{206}$
Пирит	0,340	100	17,46	—	0,126
Галенит **	0,020	100	13,04	0,58	0,128
	0,110	100	13,77	4,20	0,122
	0,100	100	14,19	4,87	0,126
	—	100	12,41	2,20	0,124

* Данные А. И. Тугаринова [6].
** С поправкой на обыкновенный свинец возраста 400 млн. лет.

ненно, должно использоваться при поисках урановых месторождений, тем более что для этого не требуется больших дополнительных затрат. Исходя из применяемой в настоящее время методики поисков и разведки месторождений, можно наметить следующую последовательность операций при выявлении и оценке аномалий радиогенного свинца:

1. По данным спектрального полуколичественного анализа из всех металлометрических проб, отобранных на изучаемой площади, выбираются пробы, содержание свинца в которых в три раза и более превышает содержание урана и одновременно превышает фоновое содержание свинца в породах.

2. Содержание свинца в отобранных пробах контролируется одним из доступных количественных методов анализов, например полярографическим, после чего устанавливается окончательное количество проб для изучения изотопного состава свинца.

3. По данным относительно дешевого изотопного спектрального анализа валовых проб выбираются пробы, содержащие преимущественно радиогенный свинец, которые и наносятся определенными условными знаками на соответствующие карты и разрезы, что позволяет определить интенсивность и размеры ореолов радиогенного свинца.

4. Для генетической характеристики ореолов в нескольких пробах, выбранных с учетом всех имеющихся геологических данных, определяется содержание урана, тория, свинца и проводится масс-спектрометрический анализ изотопного состава свинца.

При интерпретации полученных данных следует иметь в виду, что интенсивные и значительные по размерам ореолы радиогенного свинца могут быть связаны только с относительно крупными концентрациями урана, однако не каждое крупное урановое месторождение непременно должно иметь значительный по размерам ореол свинца. К тому же не каждый ореол из-за исключительно неравномерного содержания в нем свинца может быть выявлен металлометрическим опробованием. Для урановых месторождений с абсолютным возрастом 1800 млн. лет изотопный состав радиогенного

свинца с учетом поправки на обыкновенный свинец и радиогенный, образованный *in situ* при распаде урана, характеризуется отсутствием или исключительно низким содержанием Pb^{208} и отношением Pb^{207}/Pb^{206} , равным 0,12—0,13. Следует отметить, что в исследуемых районах есть торий-урановые рудопроявления, образование которых связано с калиевым метасоматозом гранита и пегматитов. Абсолютный возраст урановых и ураносодержащих минералов этих рудопроявлений около 2000 млн. лет. Естественно ожидать, что 400—600 млн. лет назад в них также проходил процесс, который, как и на изученных нами месторождениях, привел к образованию ореолов радиогенного свинца. Как показывают расчеты, для свинца таких ореолов должно быть характерно отношение Pb^{207}/Pb^{206} , равное 0,14—0,15, а также повышенное содержание Pb^{208} , что позволяет достаточно надежно отличать их от ореолов, связанных с более перспективными месторождениями возраста 1800 млн. лет. Таким образом, можно считать, что докембрийские урановые месторождения являются наиболее благоприятными объектами для применения изотопного свинцового метода при поисках месторождений данного типа.

Поступила в Редакцию 3/VIII 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. М., Атомиздат, 1960.
2. Петров Р. П., Карпенко В. С., Мещерский Ю. А. О месторождениях урана в железорудных формациях докембрия. М., Атомиздат, 1969.
3. Казаков В. С., Кузменко А. В., Руткевич Н. С. В сб. «Геология и вопросы генезиса эндогенных урановых месторождений». М., «Наука», 1968.
4. Жукова В. И. В сб. «Месторождения урана, зональность и парагенезисы». М., Атомиздат, 1970, стр. 5.
5. Чернецова К. Н. Там же, стр. 34.
6. Тугаринов А. И. Геологу — о методах определения абсолютного возраста горных пород. М., Гостеолтехиздат, 1961.
7. Frondel C., Varnes I. Acta Cryst., 11, No. 8, 562 (1958).
8. Киркинский В. А. В кн. «Материалы по генетической и экспериментальной минералогии». Т. IV. Новосибирск, «Наука», 1966, стр. 30.