

*Природные ядерные
РЕАКТОРЫ (ФЕНОМЕН
ОКЛО)
и геоэкологические
следствия*

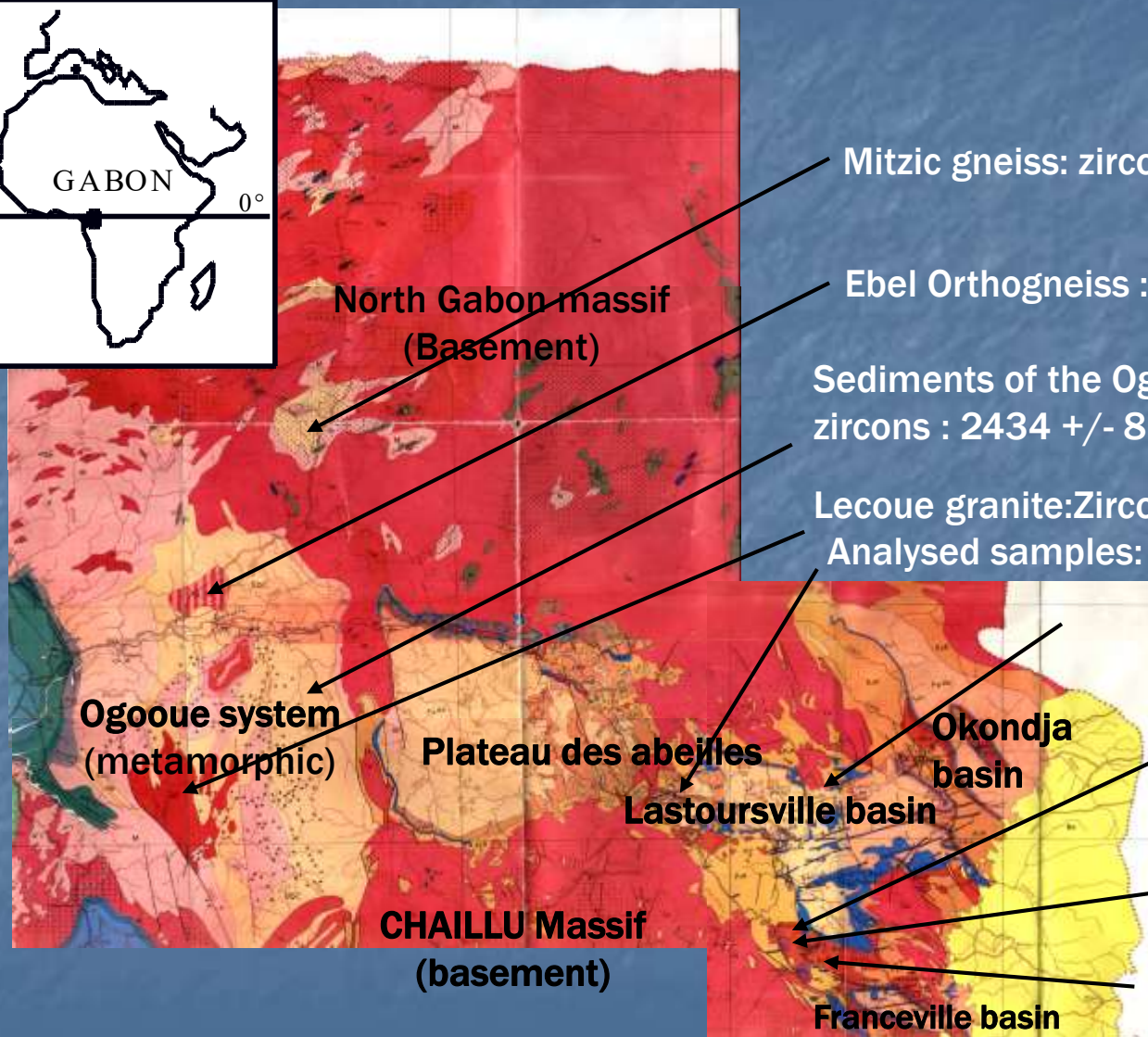
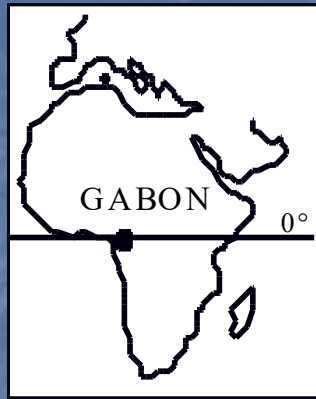
ПРИРОДНЫЕ РЕАКТОРЫ



На земном шаре сегодня достоверно установлен и тщательно изучен факт работы природного ядерного реактора, что было выявлено на месторождениях урана Окло, Богомбо (Габон) французскими исследователями в 1972 г. При переработке урановых руд было обращено внимание на весьма низкое содержание изотопов урана-235. Так при переработке 700 т. уранового концентрата дефицит изотопа ^{235}U составил 200 кг (Naudet Roger, 1975)



*Общие геологические и
минералого – геохимические
особенности
месторождений , на
которых зафиксированы
природные ядерные
реакторы
(Окло , Богомбо)*



Mitzi gneiss: zircons : 2838 +/- 11 Ma

Ebel Orthogneiss : zircons : 2789 +/- 25 Ma

Sediments of the Ogooué System:
zircons : 2434 +/- 8 Ma

Lecoue granite: Zircons 2042 +/- 8 Ma
Analysed samples: Bidoudouma

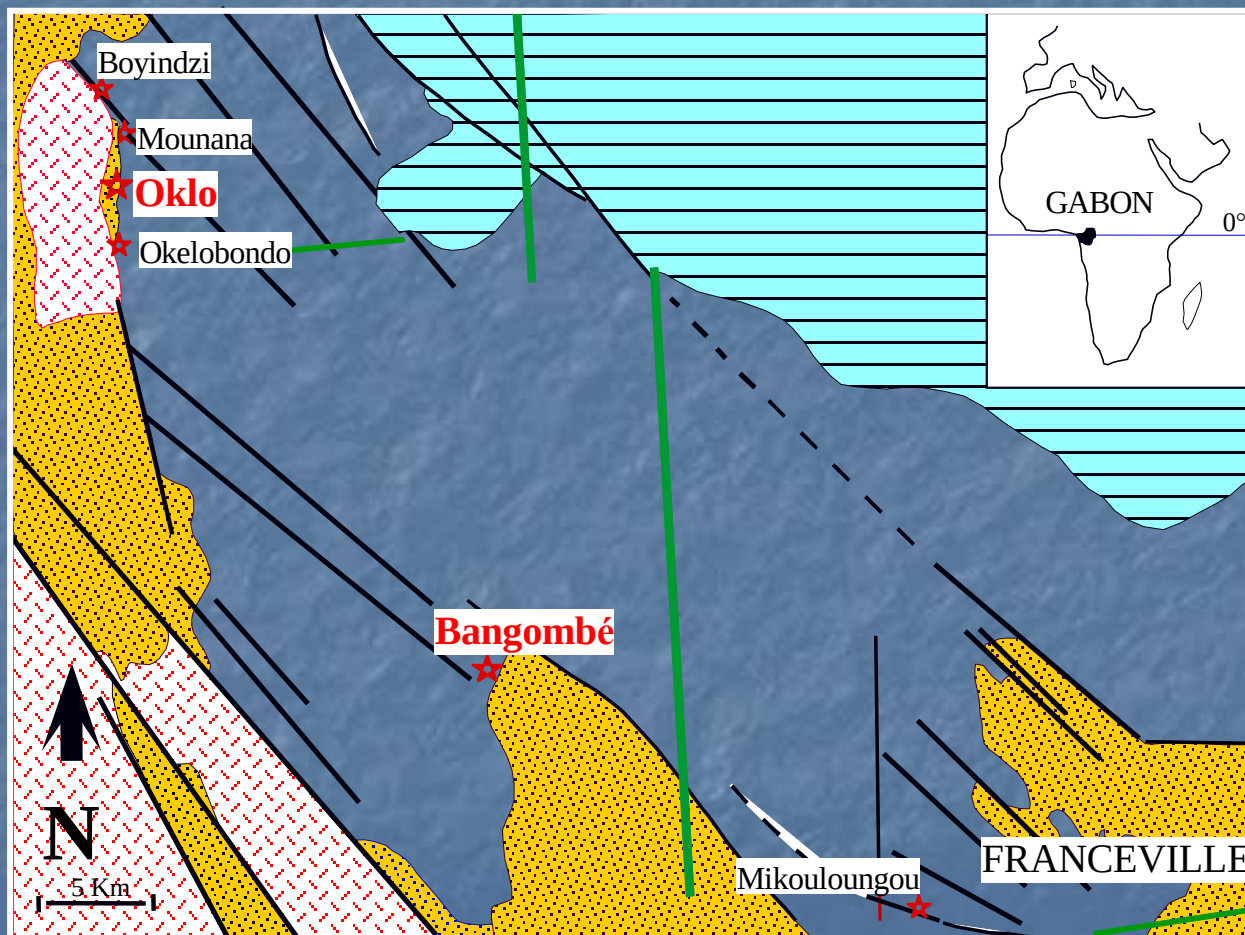
Volcanisme : N'Goutou
2143 +/- 143 Ma

Oklo : 2050 +/- 40 Ma
Reactors : 1950 +/- 50

Dolerite dyke:
Zircons:
860 +/- 39 Ma

Pb loss in uraninite
of Oklo reactors:
500 Ma

FRANCEVILLE BASIN



FA Formation



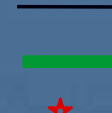
FC-FE Formation



Basement



FB Formation



Fault

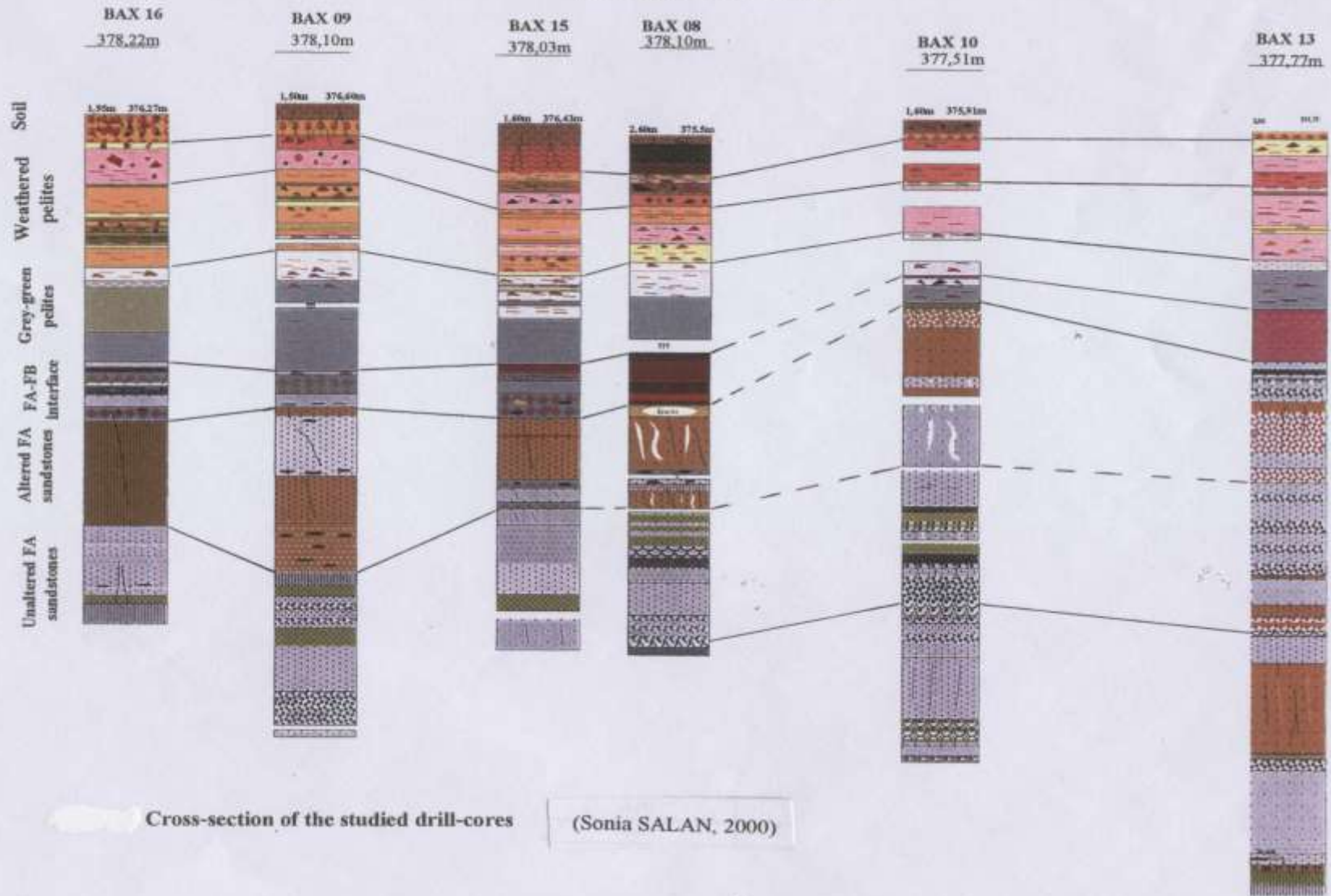


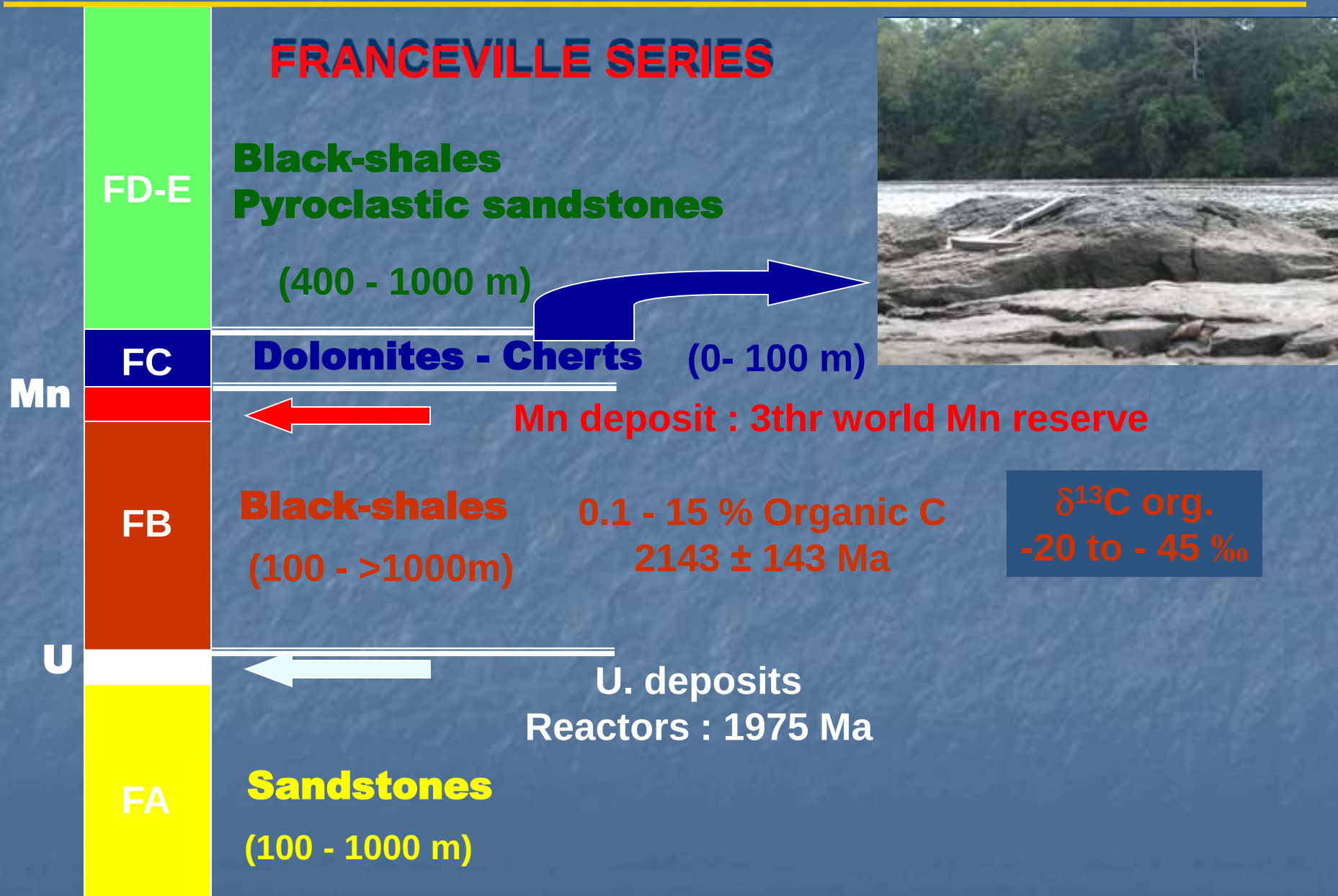
Dolerite dyke



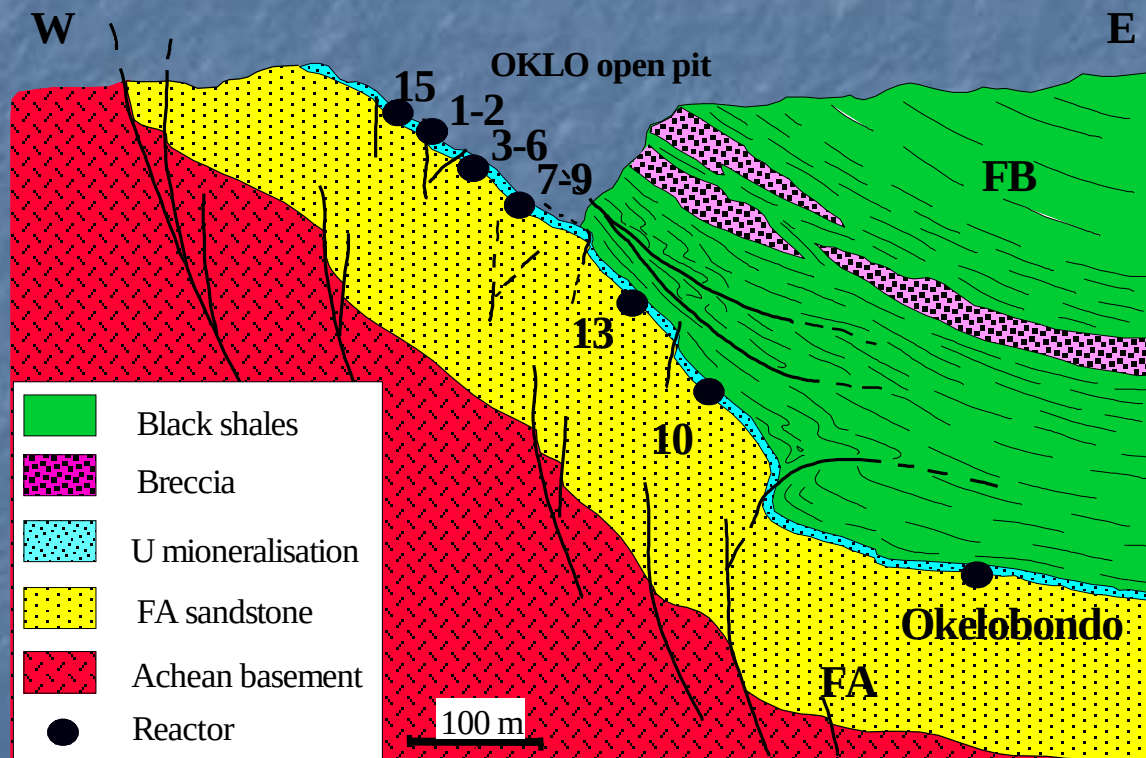
Uranium ore

Lithological Correlation





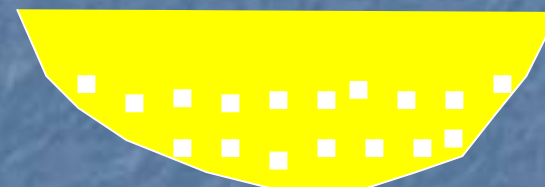
OKLO



Formation of U-deposits

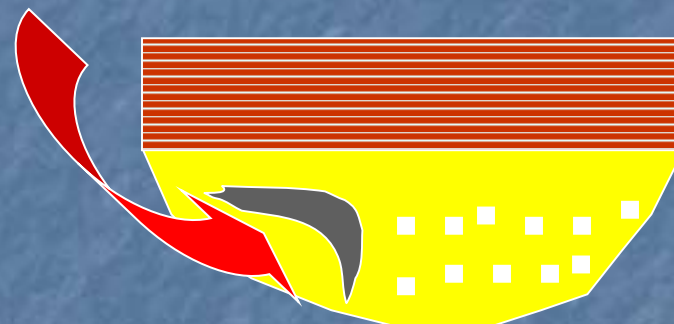
SEDIMENTATION - circa 2143 Ma

1. Detrital U

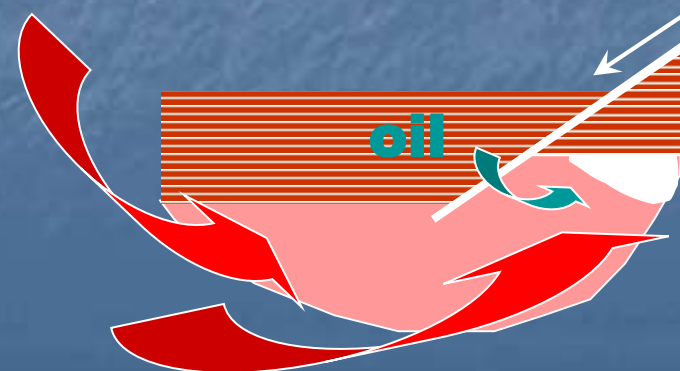


DIAGENESIS - 2050 Ma **Oxidised fluids**

2. Dissolution of U bearing Minerals and Migration



3. Precipitation in oil traps



OKLO deposit

Archean
basement

U

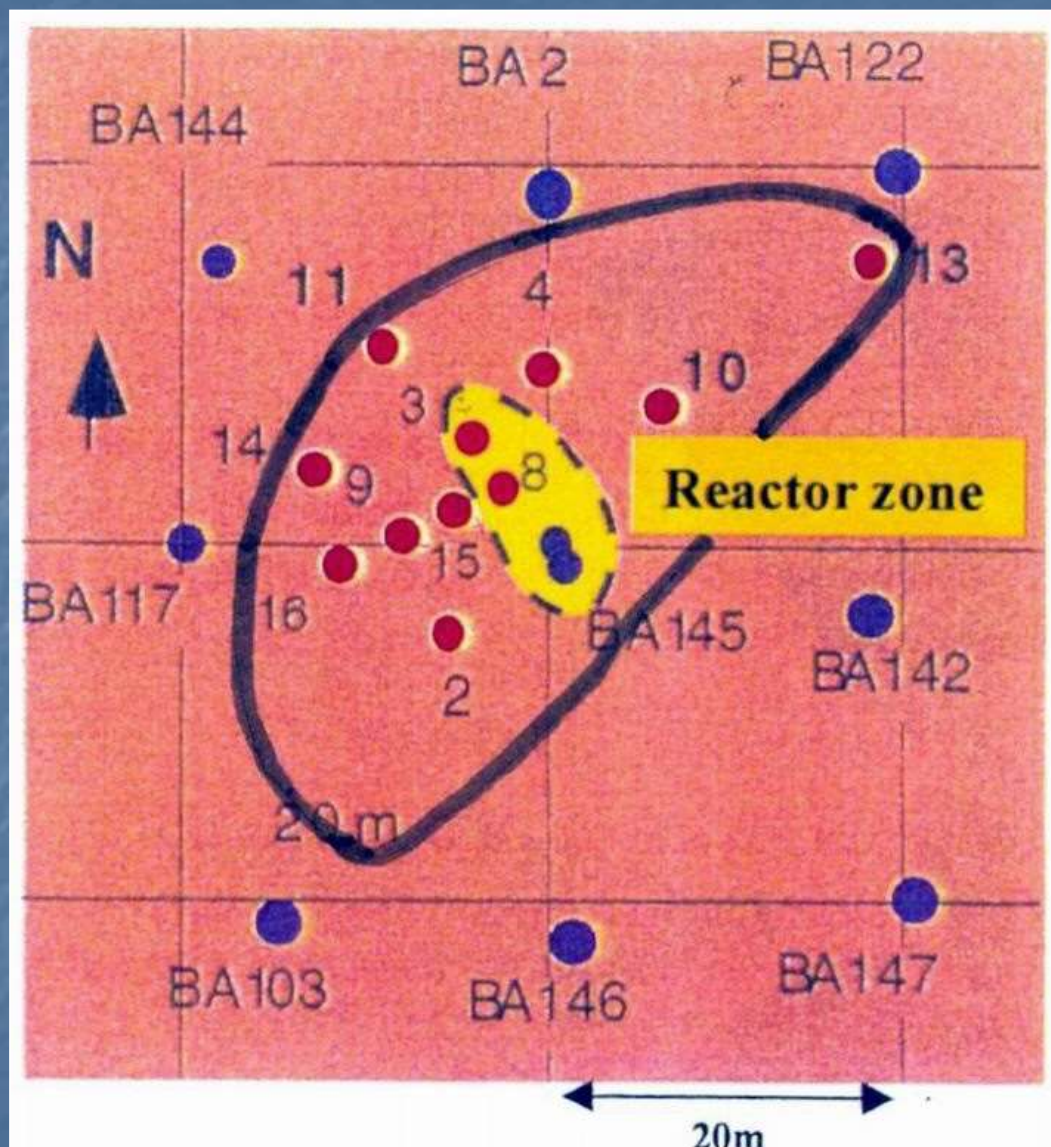
Black
shales

Sandstones

N



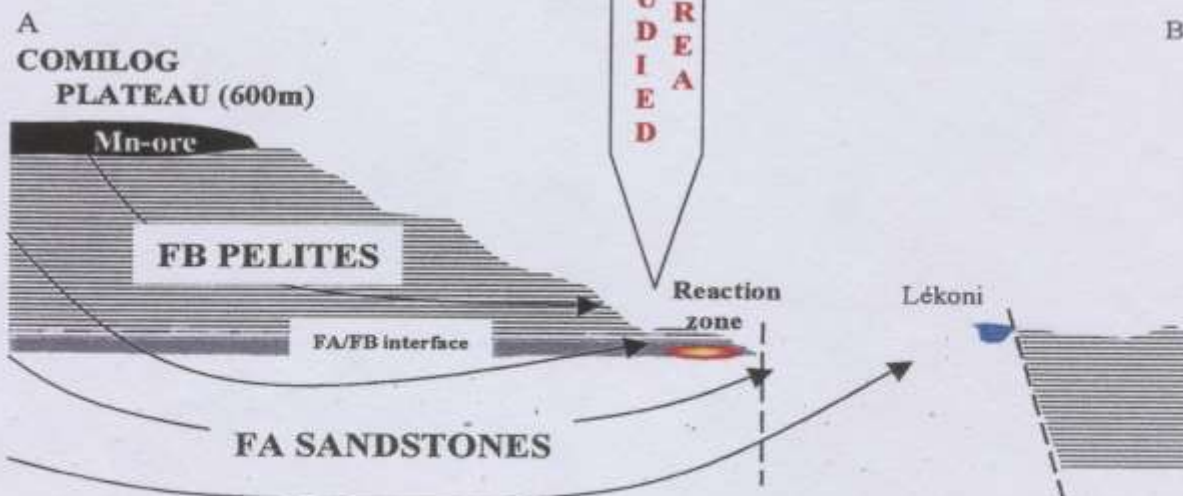
Схема размещения буровых скважин на месторождении Богомбо (Габон)



Выделена зона природного ядерного реактора и контур богатых руд.
(из диссертации Sonia Salan, 2000 г.)



Studied boreholes



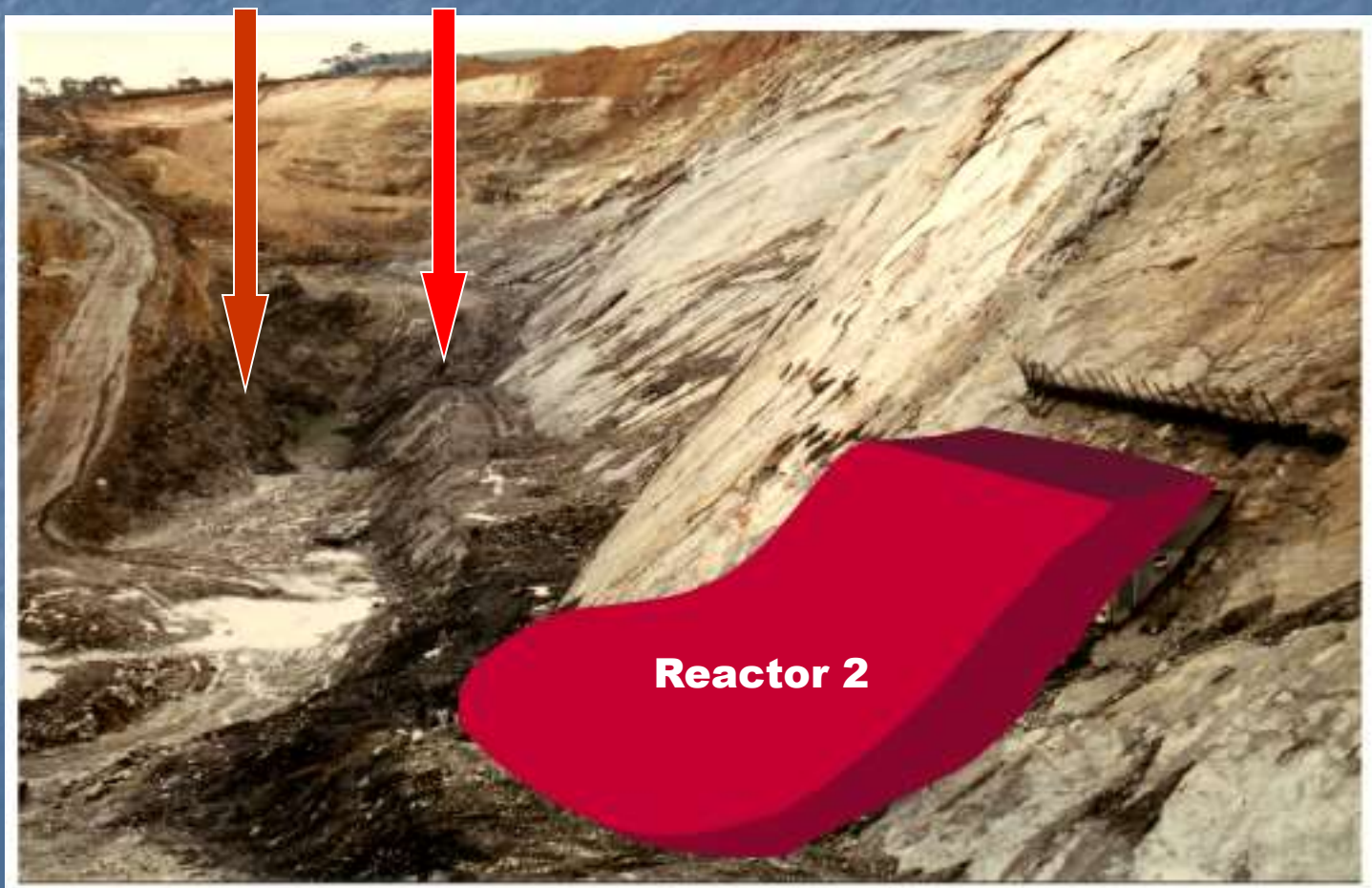
Conceptual hydrological model (according to Gurban et al., 1996)

(Sonia SALAN, 2000)

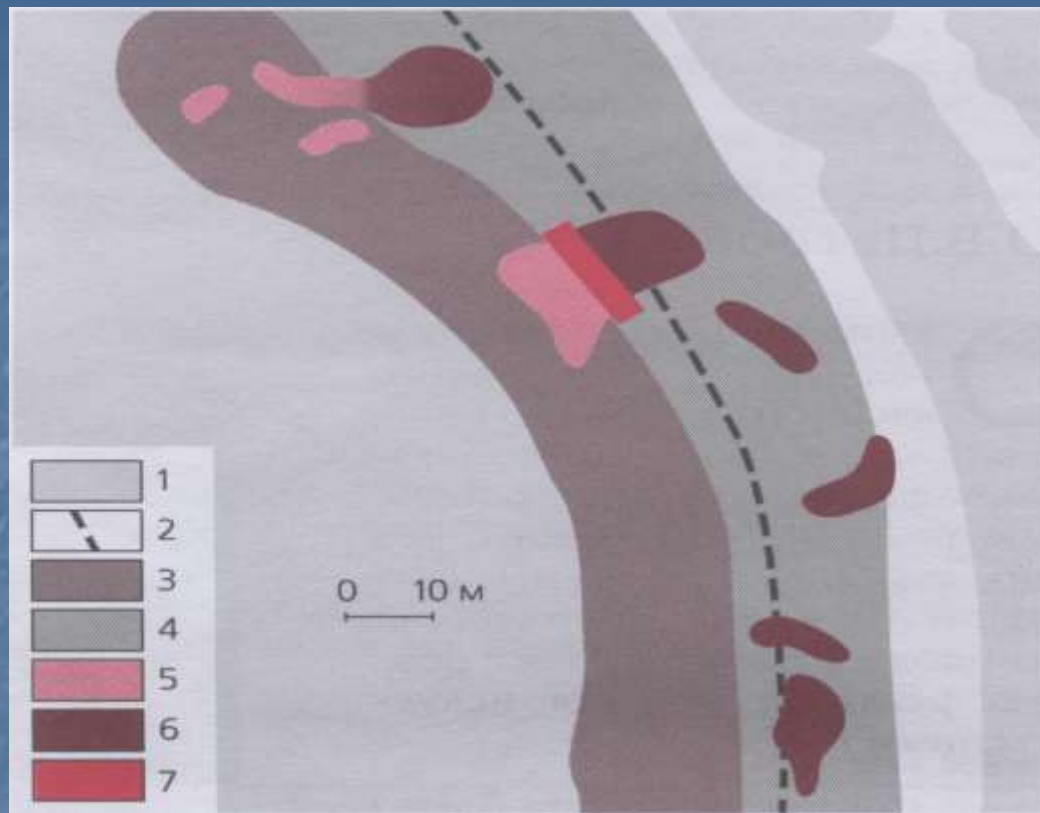
OKLO - OPEN PIT

Black shales

Mineralized
layer



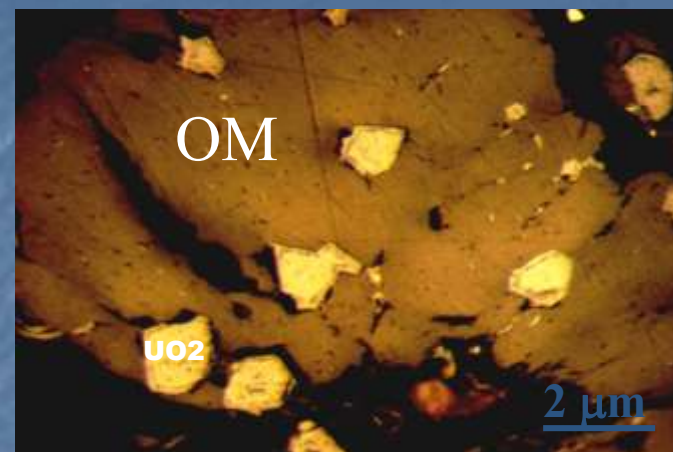
S



Расположение активных зон реактора Окло.

- 1 - песчаник, 2-граница добытой руды,
- 3- склон карьера, 4 -дно карьера,
- 5 - уничтоженная часть реактора,
- 6 - разведанная часть реактора,
- 7 - участок, предназначенный для сохранения.

SF 24 OKLO



Fracturation hydraulique

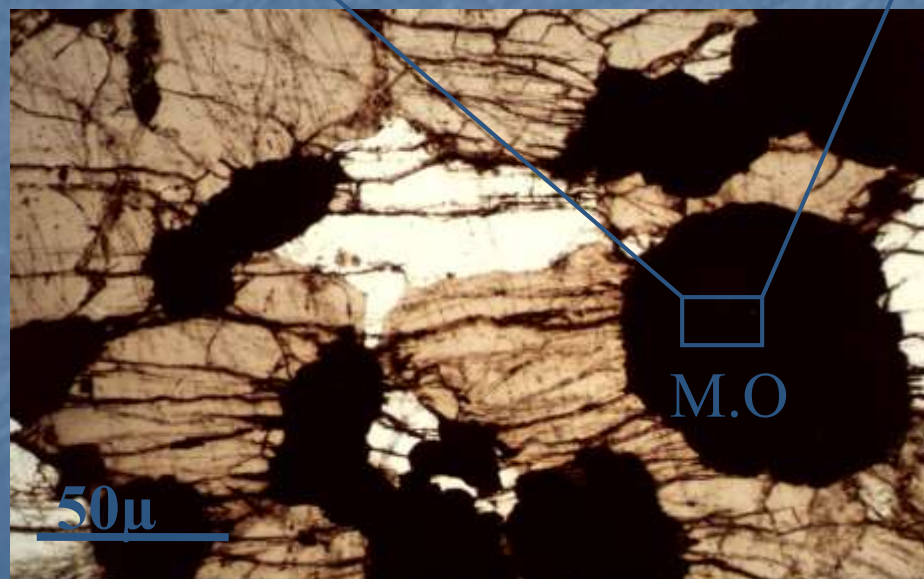


Таблица 4

Содержание некоторых микроэлементов в урановых рудах из реакторной зоны 10 (Hidalgo Holliger, 1998) и место их отбора.

	1400	1469	1480	1485	1492	1640	1700
Rb	0.0900 (2)	6.74 (5)	1.06 (2)	1.40 (2)	8.94 (14)	1.84 (3)	
Sr	247 (1)	89.1 (5)	162 (2)	114 (1)	112 (1)	14.3 (2)	
Zr	2840 (23)	1150 (34)	11600 (92)	4540 (46)	1780 (33)	108 (2)	600 (8)
Ru		200 (4)	71.6 (12)	195 (4)	306 (3)		
Rh		38.0 (9)	14.0 (3)		50.5 (9)		
Pd		26.9 (9)	11.1 (3)		37.2 (7)		
Te		34.5 (3)	12.4 (2)		48.8 (5)		
Cs	0.321 (5)	12.5 (3)	6.02 (7)	14.8 (4)	30.4 (4)	11.1 (3)	
Ba	247 (2)	453 (4)	290 (2)	322 (3)	574 (4)	822 (4)	
La	199 (2)	99.6 (8)	70.0 (5)	119 (1)	210 (2)	1.82 (1)	13.5 (1)
Ce	225 (2)	231 (1)	109 (1)	313 (3)	453 (2)	10.1 (1)	65.1 (5)
Pr	38.8 (6)	95.8 (9)	42.7 (6)	110 (3)	170 (2)	0.533 (5)	3.60 (2)
Nd	224 (2)	357 (2)	144 (1)	382 (1)	575 (4)	1.95 (2)	14.9 (1)
Sm	38.9 (3)	67.9 (5)	23.8 (1)	67.6 (4)	112 (1)	0.431 (3)	3.32 (3)
Eu	2.38 (1)	5.96 (2)	3.19 (2)	6.53 (2)	9.63 (9)	0.121 (1)	0.932 (8)
Gd	42.8 (3)	10.8 (2)	3.87 (4)	15.3 (3)	18.9 (2)	0.317 (4)	2.78 (4)
Tb	3.87 (5)	1.41 (3)	0.565 (7)	1.51 (1)	1.98 (3)	0.0587 (9)	0.369 (7)
Dy	15.8 (2)	6.04 (3)	2.49 (2)	5.63 (3)	9.32 (8)	0.321 (4)	1.73 (2)
Ho	2.78 (4)	1.71 (5)	1.19 (3)	1.97 (3)	2.52 (5)	0.0642 (7)	0.320 (3)
Er	5.69 (4)	3.71 (2)	3.28 (5)	4.28 (4)	5.83 (4)	0.128 (2)	0.665 (7)
Tm	0.672 (8)	0.327 (6)	0.285 (5)	0.442 (8)	0.602 (12)	0.0188 (7)	0.0776 (9)
Yb	3.90 (3)	1.84 (1)	1.67 (4)	2.43 (1)	3.96 (3)	0.0916 (9)	0.567 (7)
Lu	0.643 (3)	0.934 (9)	0.876 (11)	1.19 (2)	1.71 (3)	0.0228 (4)	0.102 (4)
Bi	0.371 (15)	21.7 (7)	6.55 (14)	4.50 (9)	23.6 (6)	0.00686 (12)	0.113 (5)
Th	328 (10)	805 (12)	168 (4)	253 (5)	918 (9)	0.358 (7)	2.04 (4)

Number in parentheses are standard deviations of the last digits indicated.

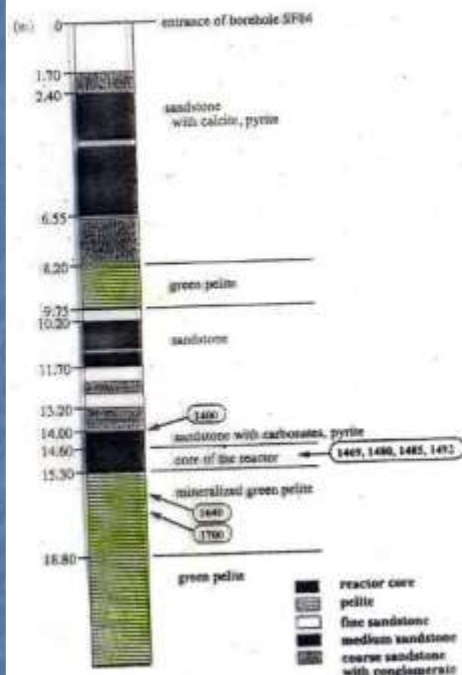


Table
Chemical compositions (weight percentage) of metallic aggregates
in SD37-S2/CD, reactor 13

No.	Pb	Ru	Rh	Te	U	As	S	Total
1	39.57	34.77	5.22	2.99	0.15	6.45	6.95	96.10
2	59.02	20.47	2.54	1.65	< 0.01	3.60	9.60	96.88
3	38.87	32.69	4.50	3.15	0.33	8.26	7.63	95.43
4	38.45	37.11	4.90	2.77	0.49	7.06	6.97	97.75
5	48.98	24.22	3.43	2.47	< 0.01	7.26	9.50	95.86
6	54.09	23.49	3.48	1.85	< 0.01	4.40	9.62	96.93
7	43.69	30.89	4.88	1.90	0.23	7.02	7.91	96.52
8	40.63	31.78	6.23	3.61	0.35	7.81	7.31	97.72
9	38.44	37.02	5.13	2.51	0.27	5.31	6.75	95.43
10	46.59	26.69	4.29	2.77	0.09	8.53	8.86	97.82
11	37.43	38.52	4.94	1.88	0.20	6.74	6.80	96.51
12	54.39	16.94	2.23	2.09	3.38	5.15	11.11	95.29
13	29.29	37.91	5.07	3.54	0.30	11.44	6.24	93.79
14	56.94	19.41	2.84	1.77	0.06	4.21	9.61	94.84
15	32.48	38.20	6.61	2.88	0.30	9.16	6.21	95.84
16	32.84	39.77	6.53	2.53	0.17	8.65	6.22	96.71
17	31.28	37.81	5.69	3.68	0.20	11.25	6.33	96.24
18	31.61	37.32	5.87	3.01	0.21	11.29	6.08	95.39
19	40.97	29.90	4.97	3.19	0.23	6.01	8.87	94.14
20	40.18	32.77	1.72	3.11	1.05	5.30	8.53	92.66
21	27.03	43.63	4.07	3.11	0.38	12.19	6.05	96.46
22	32.66	41.09	3.68	2.66	0.36	8.15	7.00	95.60
23	35.39	37.92	5.51	3.71	0.28	8.03	6.88	97.72
24	28.20	31.17	5.22	4.20	2.61	15.23	6.86	93.49
25	42.72	31.87	4.74	1.86	0.09	6.97	7.53	95.78
26	42.51	30.74	4.13	1.82	0.38	7.06	7.17	93.81
27	21.03	37.34	4.45	4.02	0.51	13.64	5.63	86.62
28	34.61	37.67	5.31	2.23	0.42	7.70	6.06	94.00
29	34.40	35.53	5.32	2.47	0.25	10.45	6.87	95.29
30	27.08	41.30	5.83	3.10	0.32	11.63	5.95	95.21
31	37.33	30.70	5.07	2.80	0.08	10.16	7.78	93.92
32	51.02	26.45	2.96	2.64	0.03	4.47	8.91	96.48
33	31.72	35.43	5.48	3.06	0.26	10.70	6.46	93.11
34	36.60	33.52	4.77	3.26	0.18	9.26	7.24	94.83
35	42.59	35.51	3.30	2.05	0.38	4.70	7.53	96.06
36	40.54	33.81	4.81	2.32	0.30	6.23	7.26	95.27
37	36.96	39.22	5.19	2.47	0.24	8.26	6.76	99.10
38	44.81	32.38	3.26	2.51	0.30	5.33	8.41	97.00
39	29.07	40.40	6.10	2.95	0.23	11.69	5.64	96.08
40	43.54	31.50	5.52	2.15	0.28	5.66	7.98	96.63
41	38.88	38.90	4.52	2.40	0.30	4.99	7.37	97.36

The uncertainties of the analytical values are less than 1% for Pb, Ru, As and S, and less than 5% for Rh, Te and U.

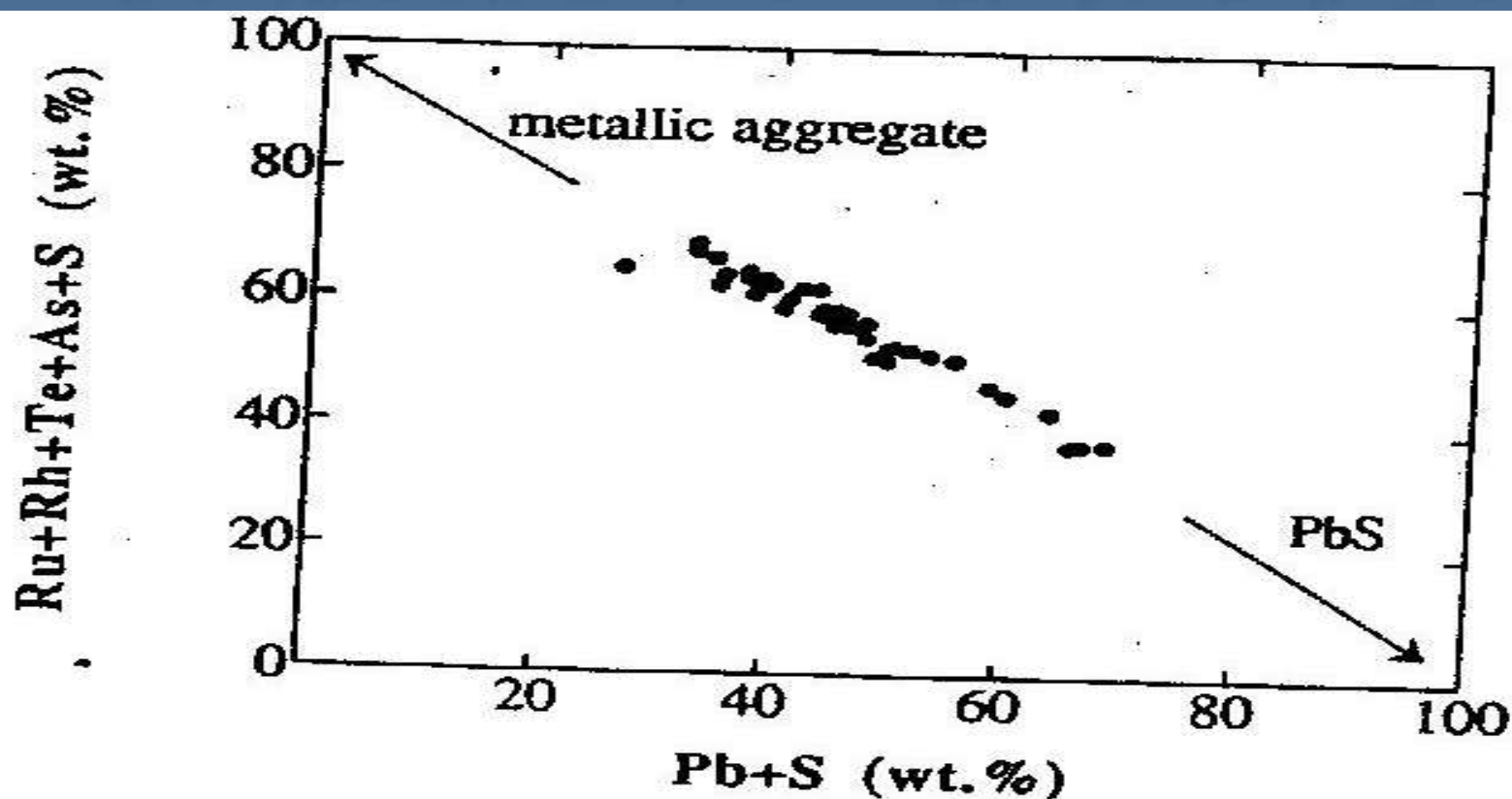


Fig. Two components diagram of micro metallic aggregates in SD37-S2/CD at reactor 13. Chemical components of the aggregates are assumed to two members, PbS and Ru-Rh-Te-As-S (weight percentage).

« Normal layer »



1m

OKLO - Réacteur 2



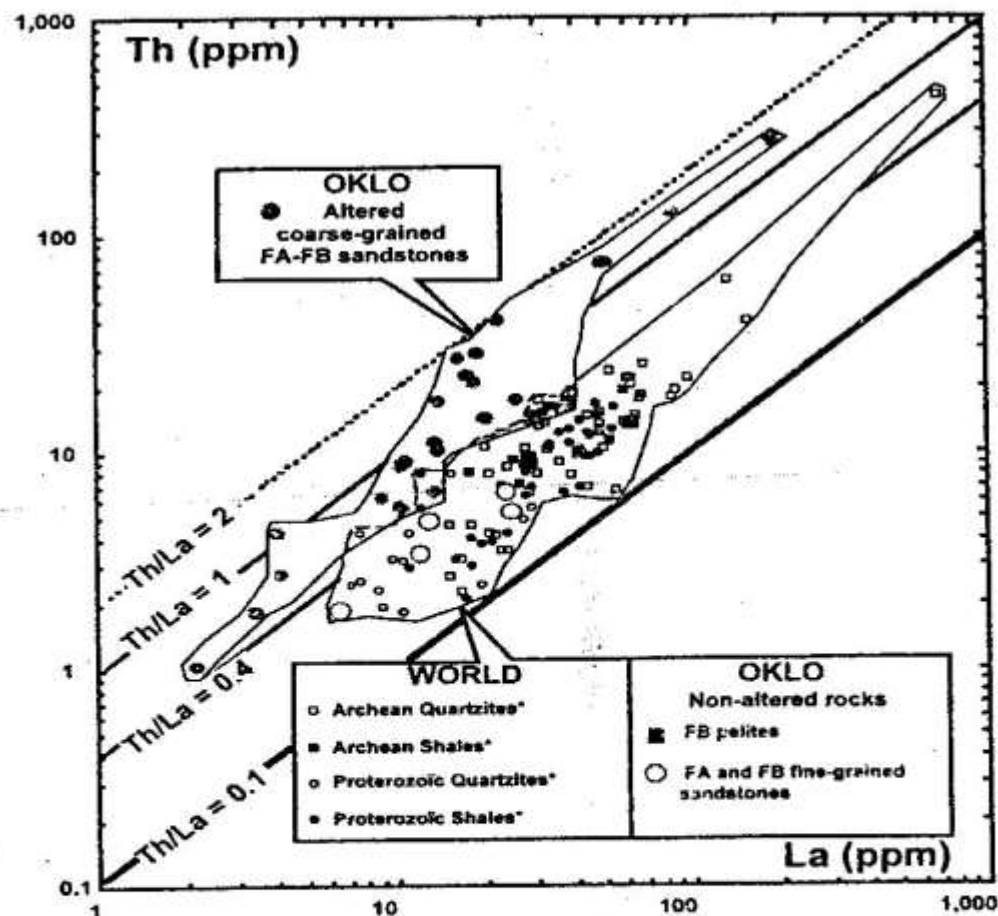
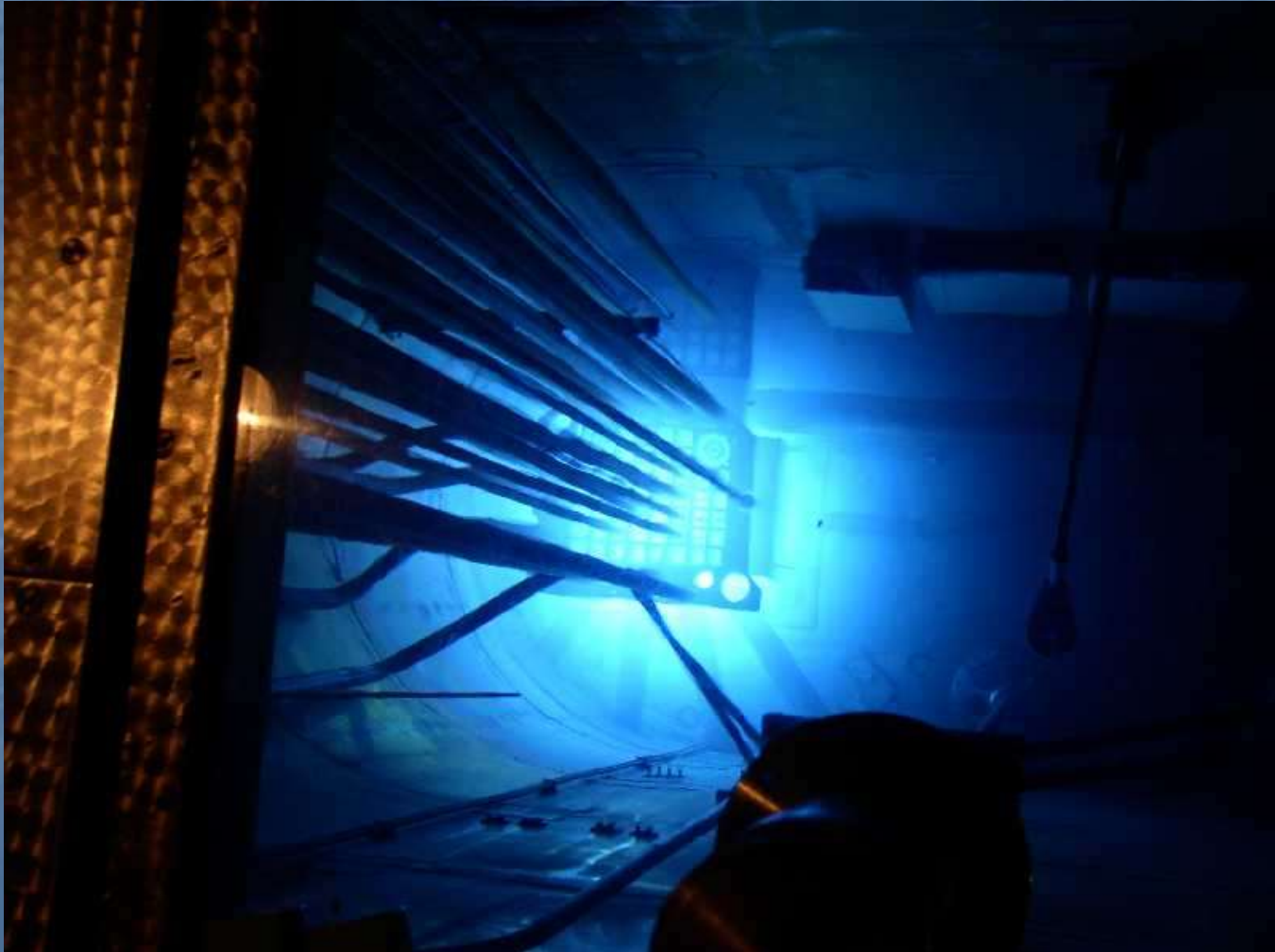


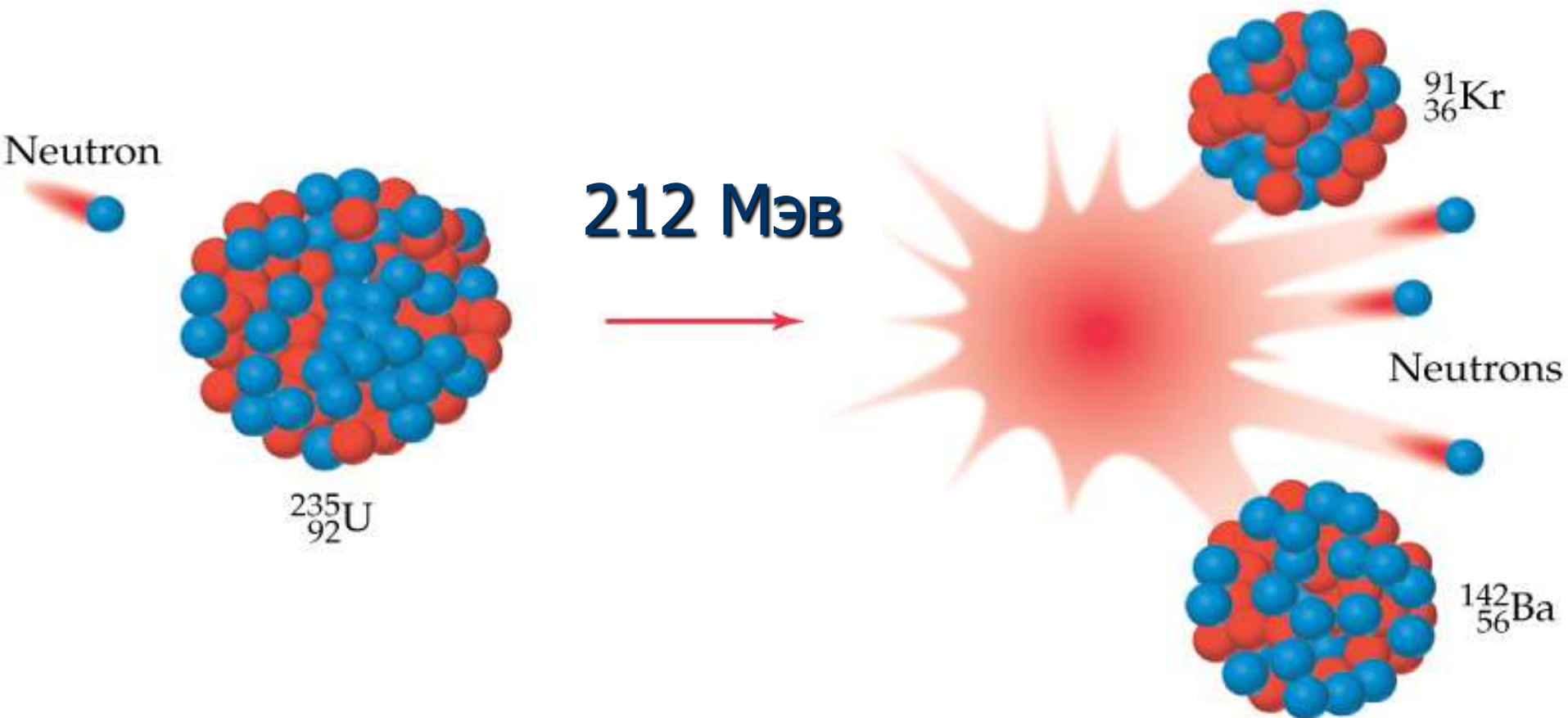
Fig. Comparison of the Th/La ratios between coarse-grained silicified sandstones of the FA and FB formations, shales and fine-grained sandstones from the Franceville basin (present study) and quartzites and shales from several Archean and Proterozoic sedimentary basin. * Data are taken from a compilation of Ribeiro (1999), Mc Lennan and Taylor (1979), Mc Lennan et al. (1995), Gibbs et al. (1986), Fayek and Kyser (1997) and Fedo et al. (1996). [Régis Mathieu e.a., 2004].

*Причины
возникновения
природной цепной
ядерной реакции*

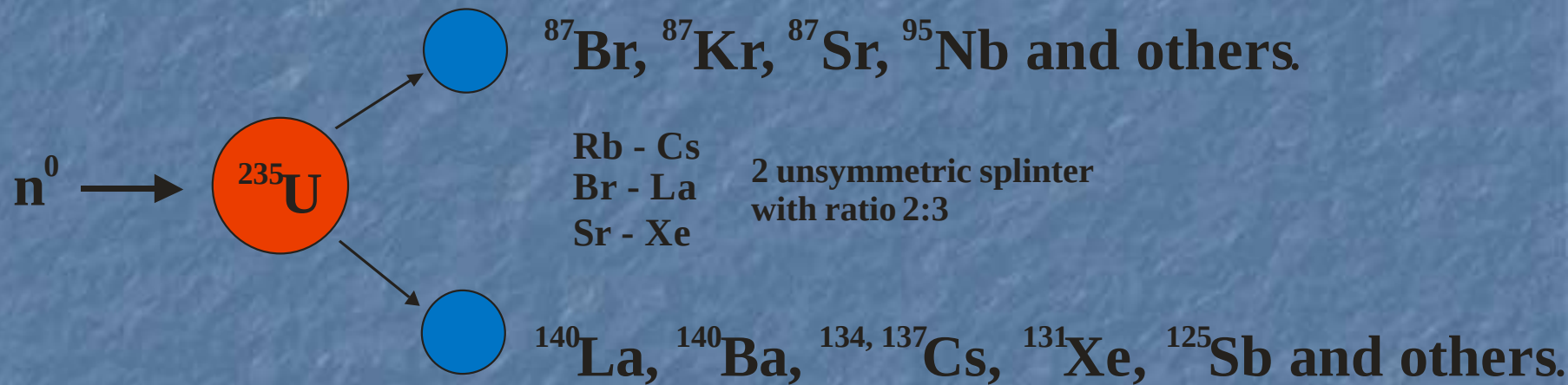
Luminescence of water in the zone of nuclear reactor at working



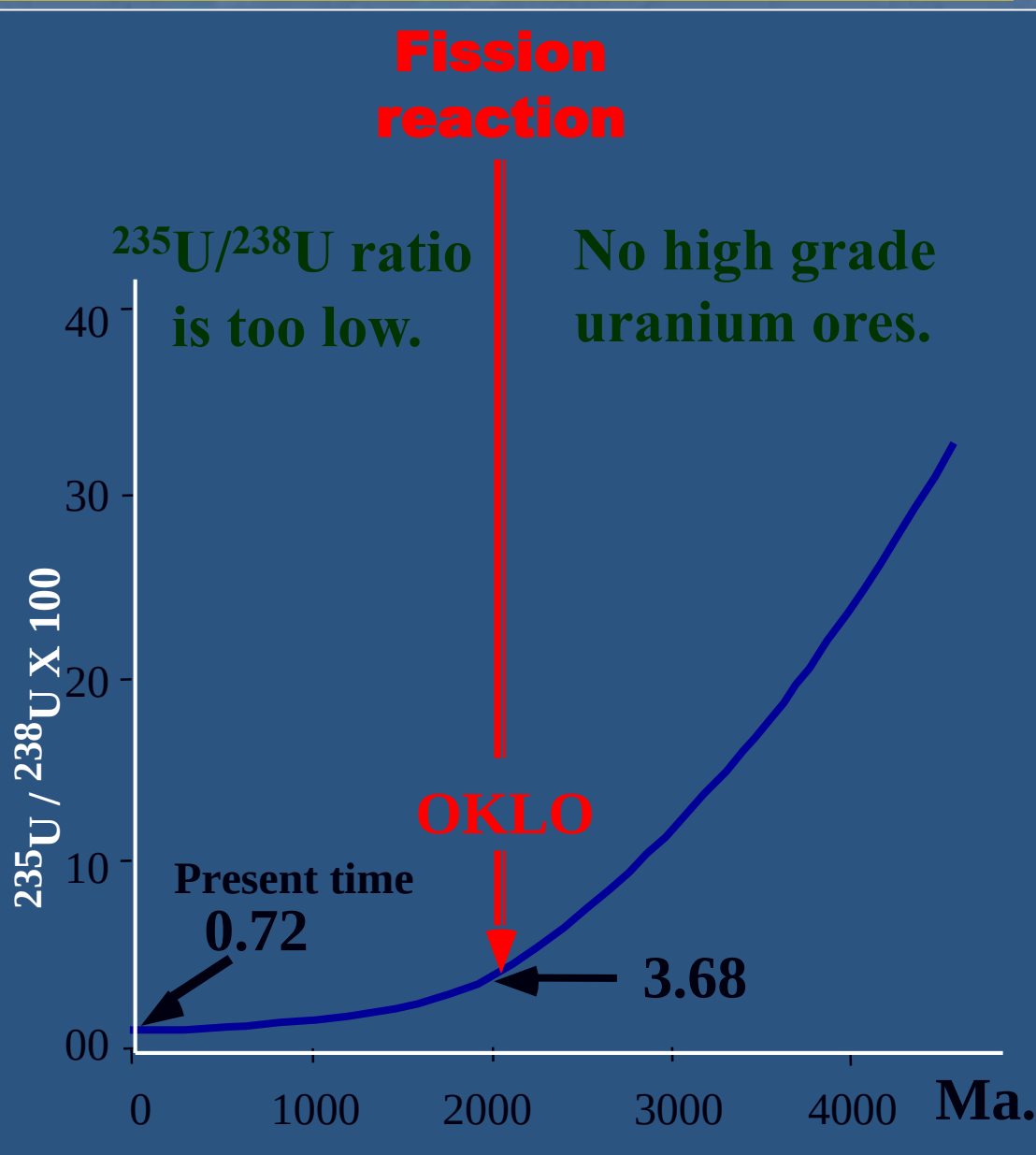
Образование осколочных радионуклидов



Scheme of division of isotope ^{235}U



Criticality imply
- high U content
- high ^{235}U content



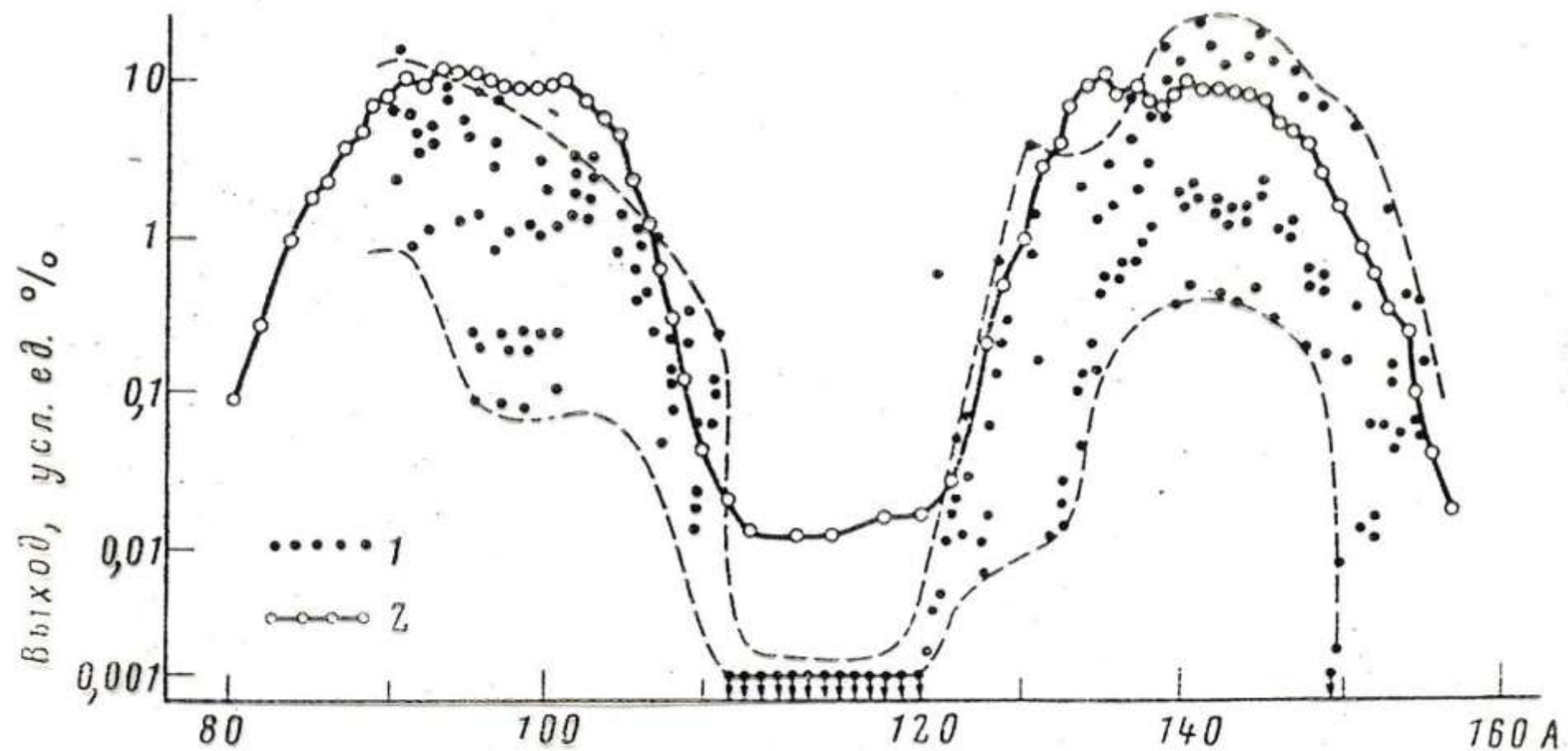


Рис. 4.8 Сопоставление относительной распространенности химических элементов в месторождении Окло (1) и кривой выхода осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами (2).

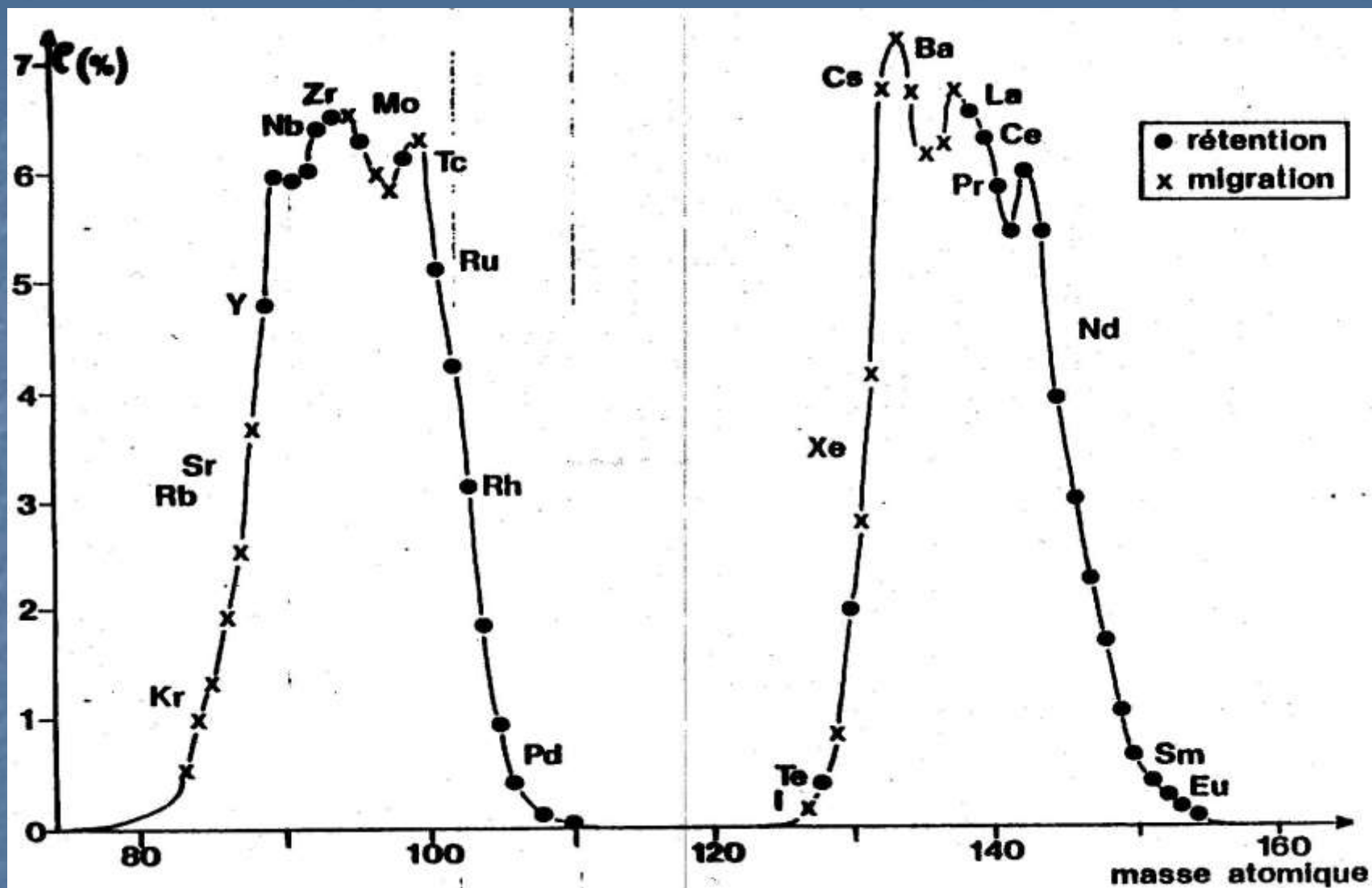
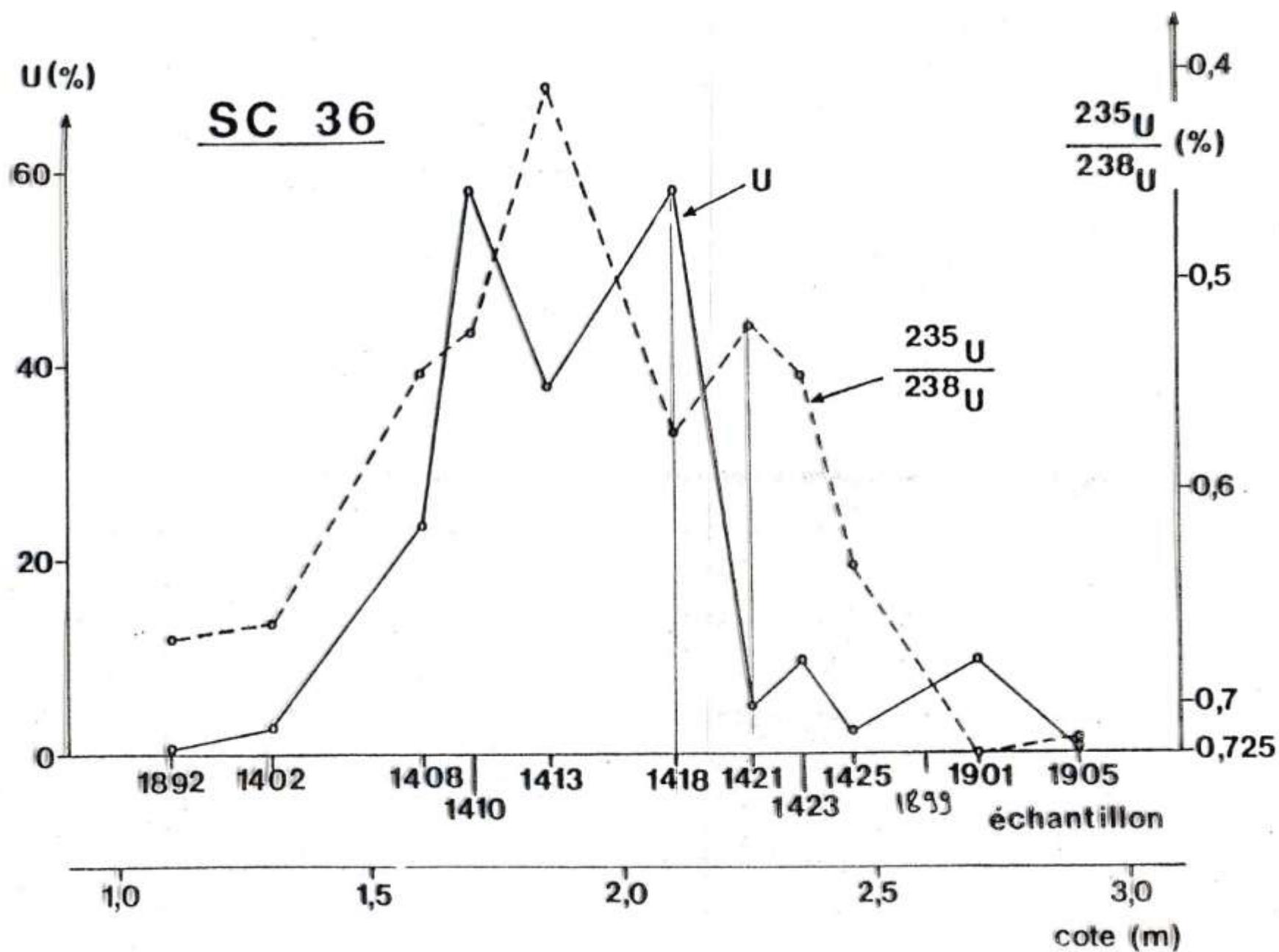


Figure 89 - Comportement des produits de fission dans les réacteurs d'Oklo.



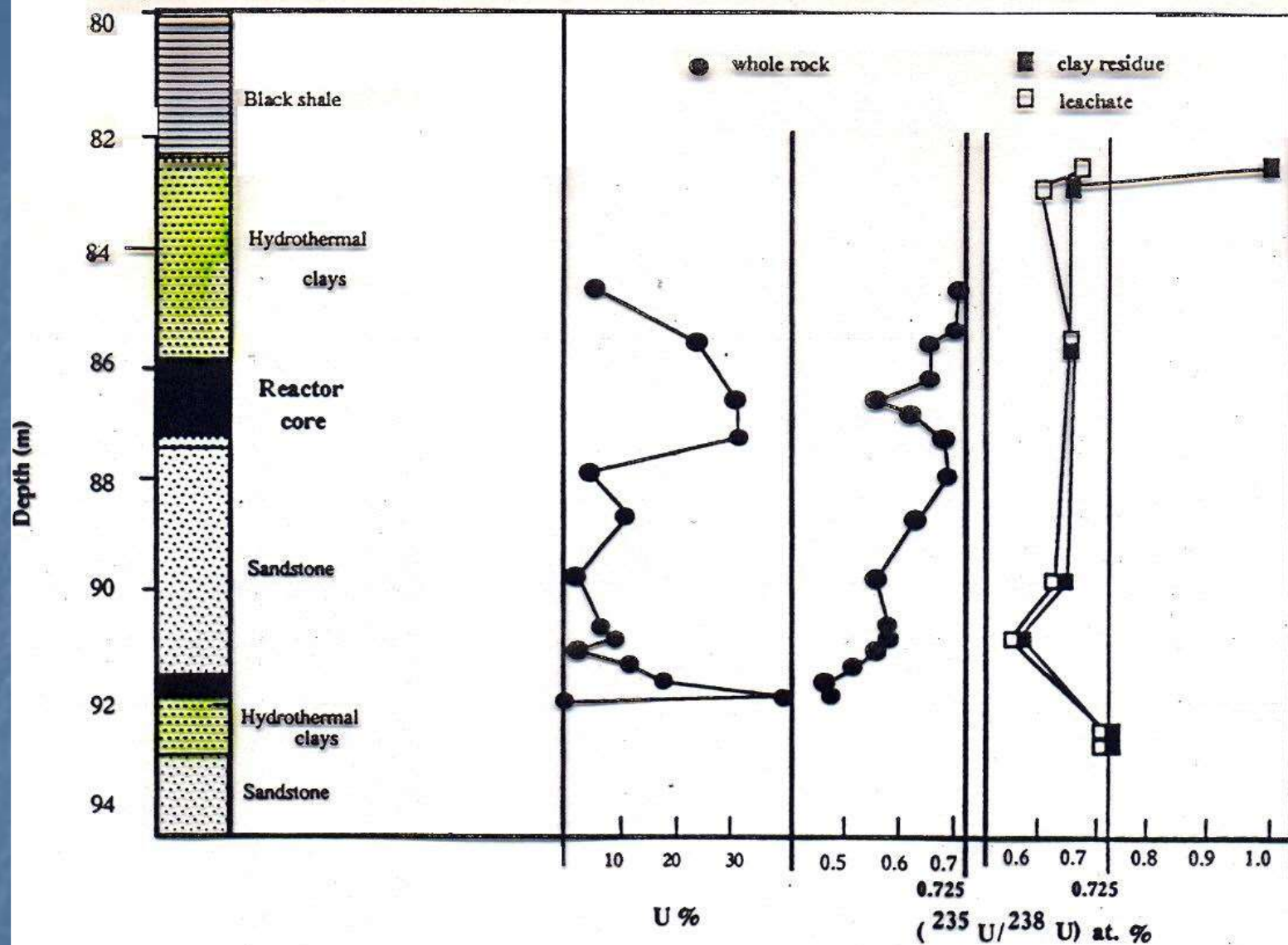


Рис. 4.12 Состав пород, вмещающих природный ядерный реактор и некоторые характеристики урановых руд (по R. Bros e.a., 1993).

Таблица 4.12

Аномальные соотношения изотопов некоторых элементов в месторождении Окло (Республика Габон, Африка)

Изотопное отношение	Нормальное значение	Значение при делении тепловыми нейтронами		Проба		
		^{235}U	^{238}U	№ 1	№ 2	№ 3
$\frac{^{90}\text{Zr}}{^{91}\text{Zr}}$	4,582	0,988	0,8621	$2,5 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,4$
$\frac{^{95}\text{Mo}}{^{97}\text{Mo}}$	1,662	1,030	0,9661	$1,1 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,2$
$\frac{^{101}\text{Ru}}{^{99}\text{Ru}}$	1,342	0,8227	0,9836	$1,2 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,3$
$\frac{^{106}\text{Pd}}{^{105}\text{Pd}}$	1,229	0,406	0,768	$0,65 \pm 0,12$	$0,79 \pm 0,16$	$0,70 \pm 0,14$
$\frac{^{108}\text{Pd}}{^{105}\text{Pd}}$	1,202	0,0604	0,375	$0,22 \pm 0,04$	$0,28 \pm 0,06$	$0,18 \pm 0,04$
$\frac{^{110}\text{Pd}}{^{105}\text{Pd}}$	0,5313	0,025	0,111	$0,16 \pm 0,03$	$0,16 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,02$
$\frac{^{107}\text{Ag}}{^{109}\text{Ag}}$	1,055	6,0	2,0	$3,5 \pm 0,7$	$4,0 \pm 0,8$	$3,6 \pm 0,7$
$\frac{^{124}\text{Te}}{^{130}\text{Te}}$	0,1337	0,008	—	$0,0031 \pm 0,0006$	$0,0044 \pm 0,0008$	Не опр.
$\frac{^{125}\text{Te}}{^{130}\text{Te}}$	0,2027	0,0181	0,0431	$0,015 \pm 0,003$	$0,019 \pm 0,004$	$0,011 \pm 0,002$
$\frac{^{126}\text{Te}}{^{130}\text{Te}}$	0,542	0,0362	0,0863	$0,018 \pm 0,003$	$0,025 \pm 0,005$	$0,022 \pm 0,005$
$\frac{^{128}\text{Te}}{^{130}\text{Te}}$	0,9375	0,1812	0,337	$0,18 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,04$	$0,11 \pm 0,02$

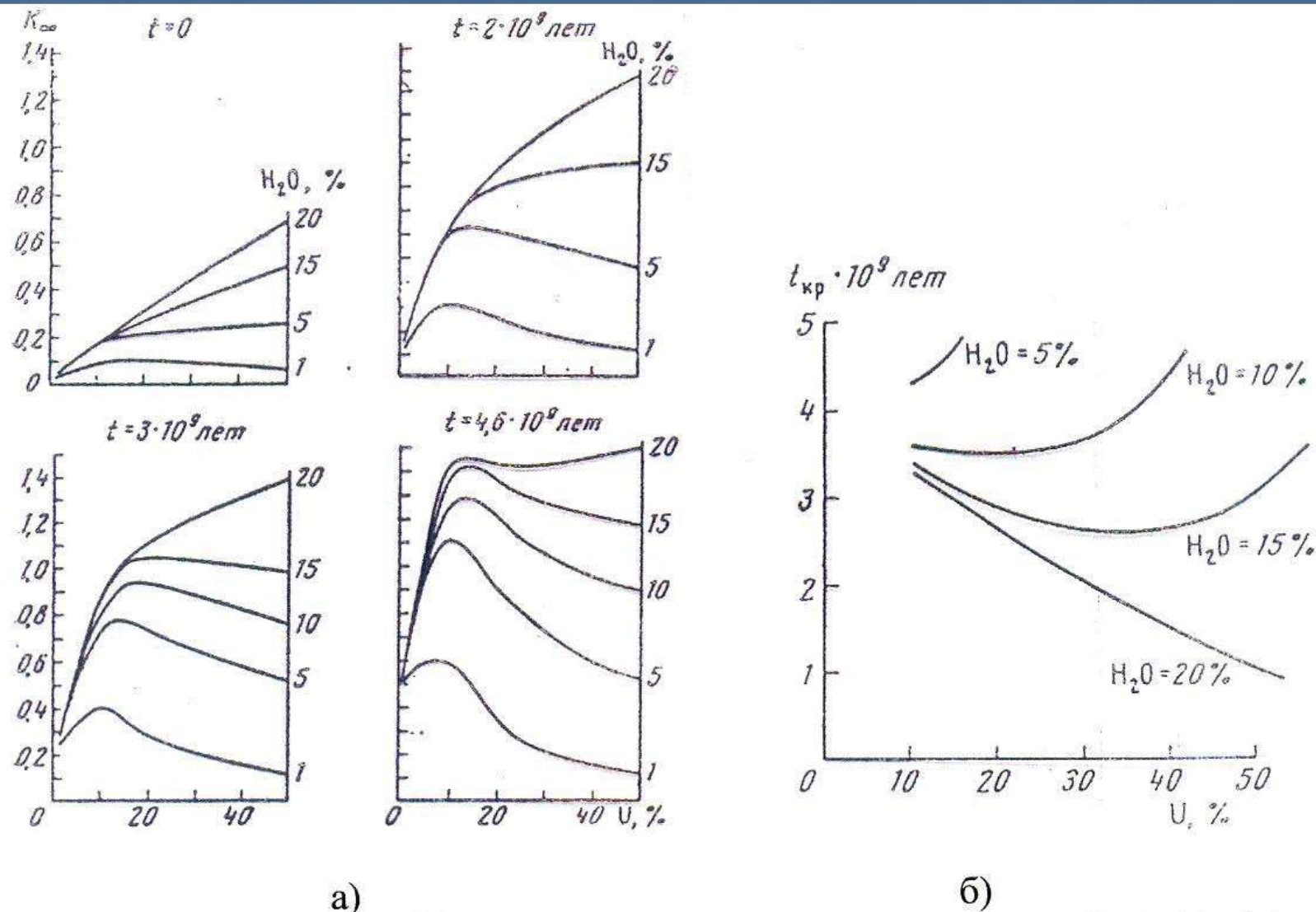


Рис. 4.9 Зависимость коэффициента размножения тепловых нейтронов (а) в бесконечно большом рудном теле, критического возраста месторождения (б) от концентрации в нем урана и воды (по Шуколюкову Ю.А. и др., 1985)

REACTOR 1 to 6

600 to 700 x 10³ kg of U participated to the fission reactions

607 kg of ²³⁵U are now missing

5 x 10³ kg of ²³⁵U undergone fission

16 500 MW yr energy - Temperature : 300 - 500 °C

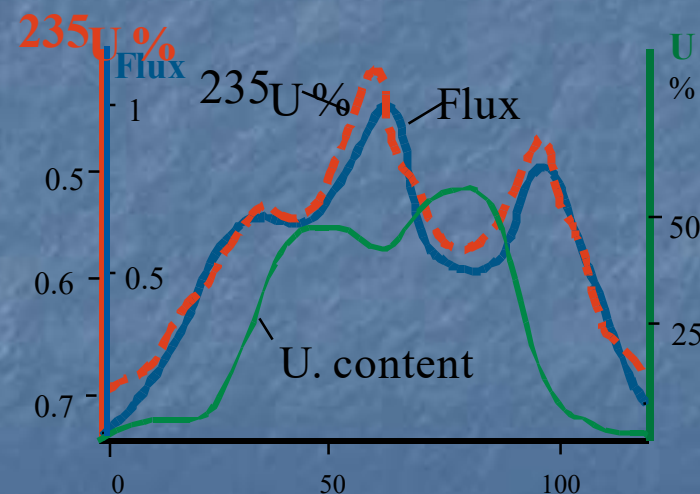
REACTOR 2

Fluence : 10²¹ n/cm² 1.45

C : restitution factor 0.39

Number of fission vs
present time U content 3.3

Duration : 10³ years 620



Depth in the bore-hole SC36 (cm)

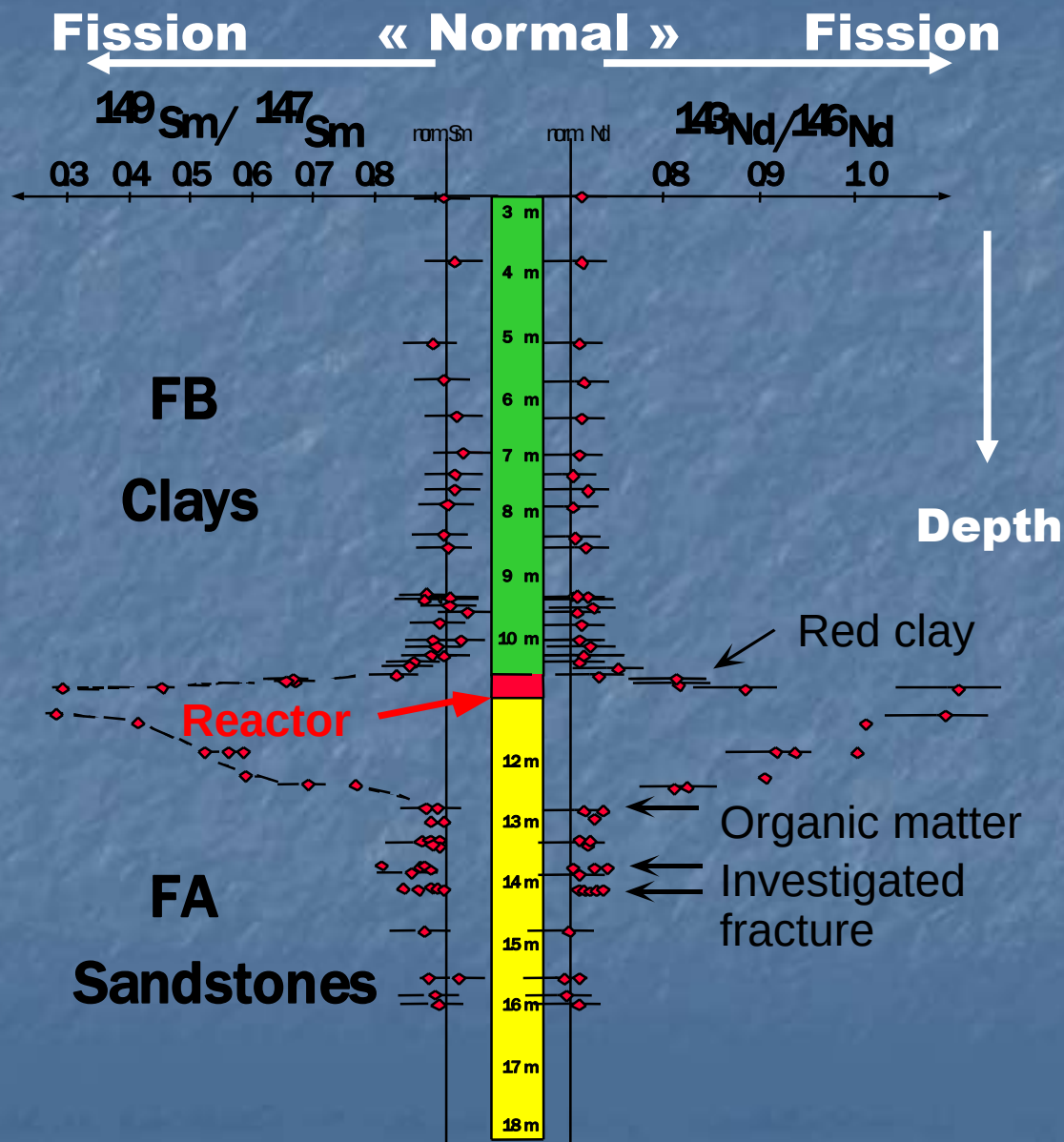
Reactor 2

- Для запуска природного ядерного реактора были необходимы , как минимум , следующие условия :
 - 1)наличие чрезвычайно богатых урановых руд (более 20 %) масса. Критическая масса руды 1 куб. м ;
 - 2)отсутствие в рудах элементов , поглощающих нейтроны (гадолиний и др.) ;
 - 3) возраст руды более 2 миллиардов лет;
 - 4) наличие природных материалов ,способных замедлять нейтроны (вода , углерод) ;

Радиоэкологические следствия из опыта изучения природных ядерных реакторов

Element	Reactor core		Edge of the reactor	
	Uraninite	Inclusions	Clays	Others
Xe	+			
Kr	+			
I129	+			
Cs137	Ba137			
Rb	+			
Sr90	90Zr			
Ba	+			
Cd				
Ag	+	Pd107		
Mo	+	+		
Tc99	Ru99	Ru99	Ru99	
Ru	+	-	-	?
Rh	+	-	-	?
Pd	+	-	-	?
Y	+		-	
Nb	?			
Zr	+		-	Heavy.miner/Oxide
Te	+	-		
Sb125	Te125		Te125	
Sn126	Te126		Te126	
REE light	+		-	apatite
Pb	+			galena
Bi209	Np237			
Th	+		+	Heavy miner.
U	+		+	apatite
Np	209Bi			
Pu	U235/U238		+	apatite

**Behavior of
fission products and
Actinides at Oklo**



BANGOMBÉ

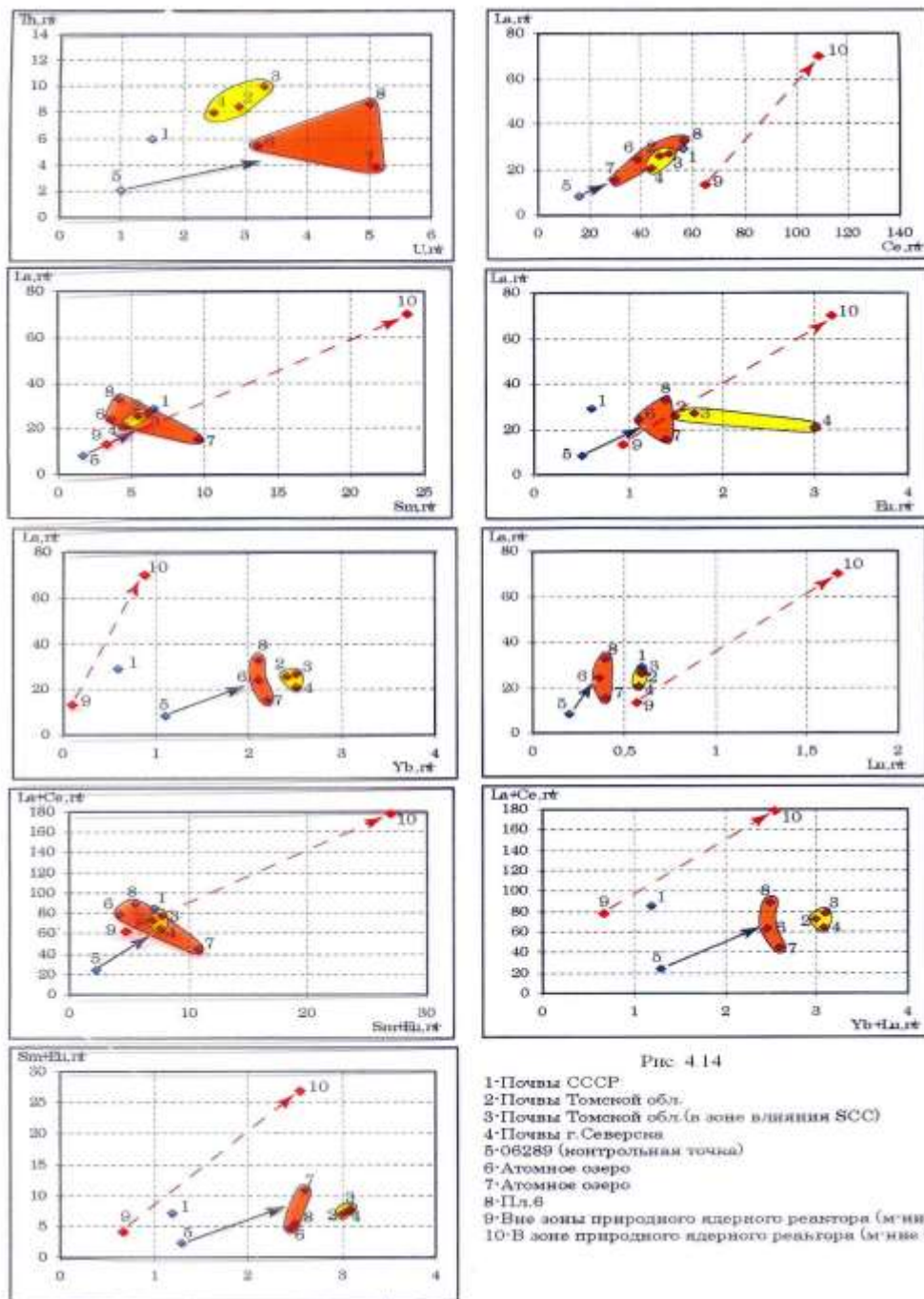
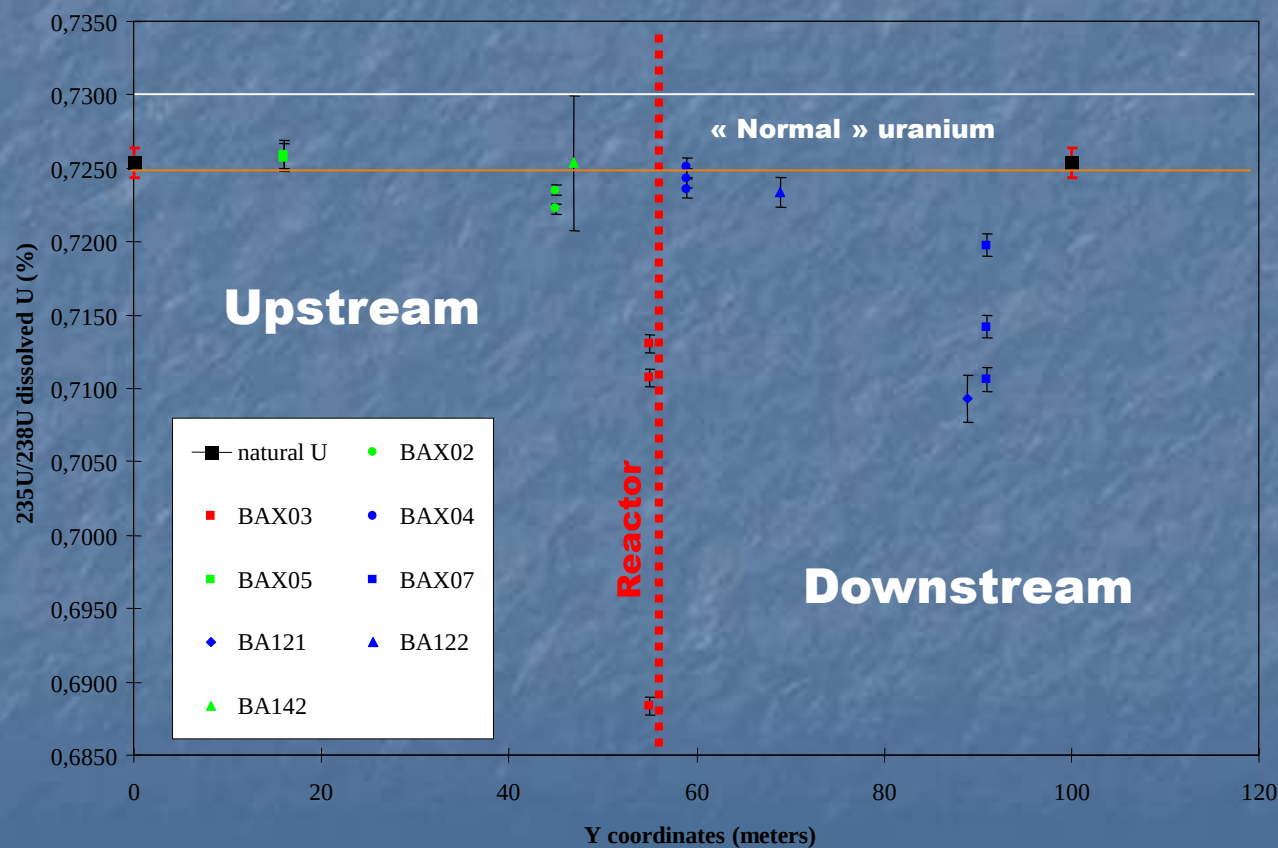


Рис. 4.14

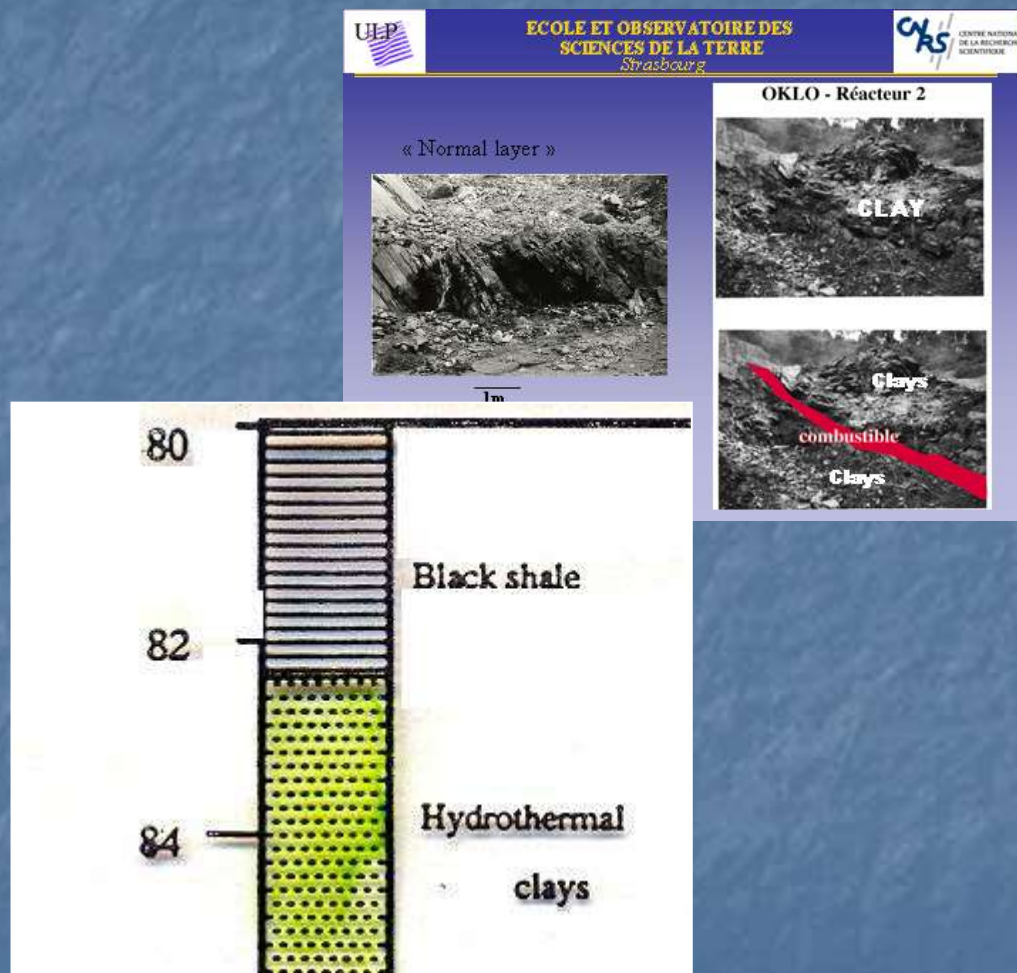
Bangombé

$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotopic ratio In groundwater



Основные выводы

■ На примере изучения природных ядерных реакторов можно утверждать, что долговременное захоронение радиоактивных отходов возможно. Природа надежно их упаковала в глинистую рубашку, что не позволило осколочным элементам далеко распространиться.



- Тем самым подтвержден тезис, что природа мудра и знает лучше нас ,что нужно делать.

Необходимо учиться наблюдать за природой и при принятии решений учитывать её опыт.

- Элементный состав руд из зоны реактора свидетельствует , что радиоактивные отходы , образующиеся при переработке ядерного топлива являются месторождениями благородных металлов (техногенные месторождения Pd, Rh и др.)

Таблица 4.13

Содержание некоторых микроэлементов в урановых рудах из реакторной зоны 10 (Hidaka, Holliger, 1998) и место их отбора.



	1400	1469	1480	1485	1492	1640	1700
Rb	0.0900 (2)	6.74 (5)	1.06 (2)	1.40 (2)	8.94 (14)	1.84 (3)	
Sr	247 (1)	89.1 (5)	162 (2)	114 (1)	112 (1)	14.3 (2)	
Zr	2840 (23)	1150 (34)	11600 (92)	4540 (46)	1780 (33)	108 (2)	600 (8)
Ru		200 (4)	71.6 (12)	195 (4)	306 (3)		
Rh		38.0 (9)	14.0 (3)		50.5 (9)		
Pd		26.9 (9)	11.1 (3)		37.2 (7)		
Te		34.5 (3)	12.4 (2)		48.8 (5)		
Cs	0.321 (5)	12.5 (3)	6.02 (7)	14.8 (4)	30.4 (4)	11.1 (3)	
Ba	247 (2)	453 (4)	290 (2)	322 (3)	574 (4)	822 (4)	
La	199 (2)	99.6 (8)	70.0 (5)	119 (1)	210 (2)	1.82 (1)	13.5 (1)
Ce	225 (2)	231 (1)	109 (1)	313 (3)	453 (2)	10.1 (1)	65.1 (5)
Pr	38.8 (6)	95.8 (9)	42.7 (6)	110 (3)	170 (2)	0.533 (5)	3.60 (2)
Nd	224 (2)	357 (2)	144 (1)	382 (1)	575 (4)	1.95 (2)	14.9 (1)
Sm	38.9 (3)	67.9 (5)	23.8 (1)	67.6 (4)	112 (1)	0.431 (3)	3.32 (3)
Eu	2.38 (1)	5.96 (2)	3.19 (2)	6.53 (2)	9.63 (9)	0.121 (1)	0.932 (8)
Gd	42.8 (3)	10.8 (2)	3.87 (4)	15.3 (3)	18.9 (2)	0.317 (4)	2.78 (4)
Tb	3.87 (5)	1.41 (3)	0.565 (7)	1.51 (1)	1.98 (3)	0.0587 (9)	0.369 (7)
Dy	15.8 (2)	6.04 (3)	2.49 (2)	5.63 (3)	9.32 (8)	0.321 (4)	1.73 (2)
Ho	2.78 (4)	1.71 (5)	1.19 (3)	1.97 (3)	2.52 (5)	0.0642 (7)	0.320 (3)
Er	5.69 (4)	3.71 (2)	3.28 (5)	4.28 (4)	5.83 (4)	0.128 (2)	0.665 (7)
Tm	0.672 (8)	0.327 (6)	0.285 (5)	0.442 (8)	0.602 (12)	0.0188 (7)	0.0776 (9)
Yb	3.90 (3)	1.84 (1)	1.67 (4)	2.43 (1)	3.96 (3)	0.0916 (9)	0.567 (7)
Lu	0.643 (3)	0.934 (9)	0.876 (11)	1.19 (2)	1.71 (3)	0.0228 (4)	0.102 (4)
Bi	0.371 (15)	21.7 (7)	6.55 (14)	4.50 (9)	23.6 (6)	0.00686 (12)	0.113 (5)
Th	328 (10)	805 (12)	168 (4)	253 (5)	918 (9)	0.358 (7)	2.04 (4)

- Знания об уровнях накопления редко-земельных элементов и их отношениях в зоне природного ядерного реактора и вне его позволяют выявить новые геохимические индикаторы для оценки воздействия предприятий ядерного топливного цикла

