

# БОЖЕСТВЕННЫЙ реактор

Марина Смирнова

Ученые утверждали, что только человек способен создать ядерный реактор, однако природа оказалась более изощренной.

На страницах нашего журнала мы неоднократно обращались к актуальной теме безопасного хранения ядерных отходов (см. статью «Реакторы под спом» М. Вальда и «Человек против горы» С. Нависа, «В мире науки», №7 за 2003 г.). Однако мало кто знает, что задолго до того, как перед человечеством возникла данная проблема, природа по собственной инициативе поставила весьма любопытный эксперимент по длительному хранению отработанного топлива. Об этом удивительном феномене рассказал кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН Борис Иванович Омеляненко.

Представьте себе мир протерозоя (этот период называют также докембрием) 2 млрд. лет назад. Земля дика и пустынна, динозавры еще не попирают ее своей тяжелой поступью, робкая жизнь едва-едва затеплилась на суровой планете: в недрах девственных вод чуть шевельнулись первые бактерии и водоросли – прародители всего сущего.

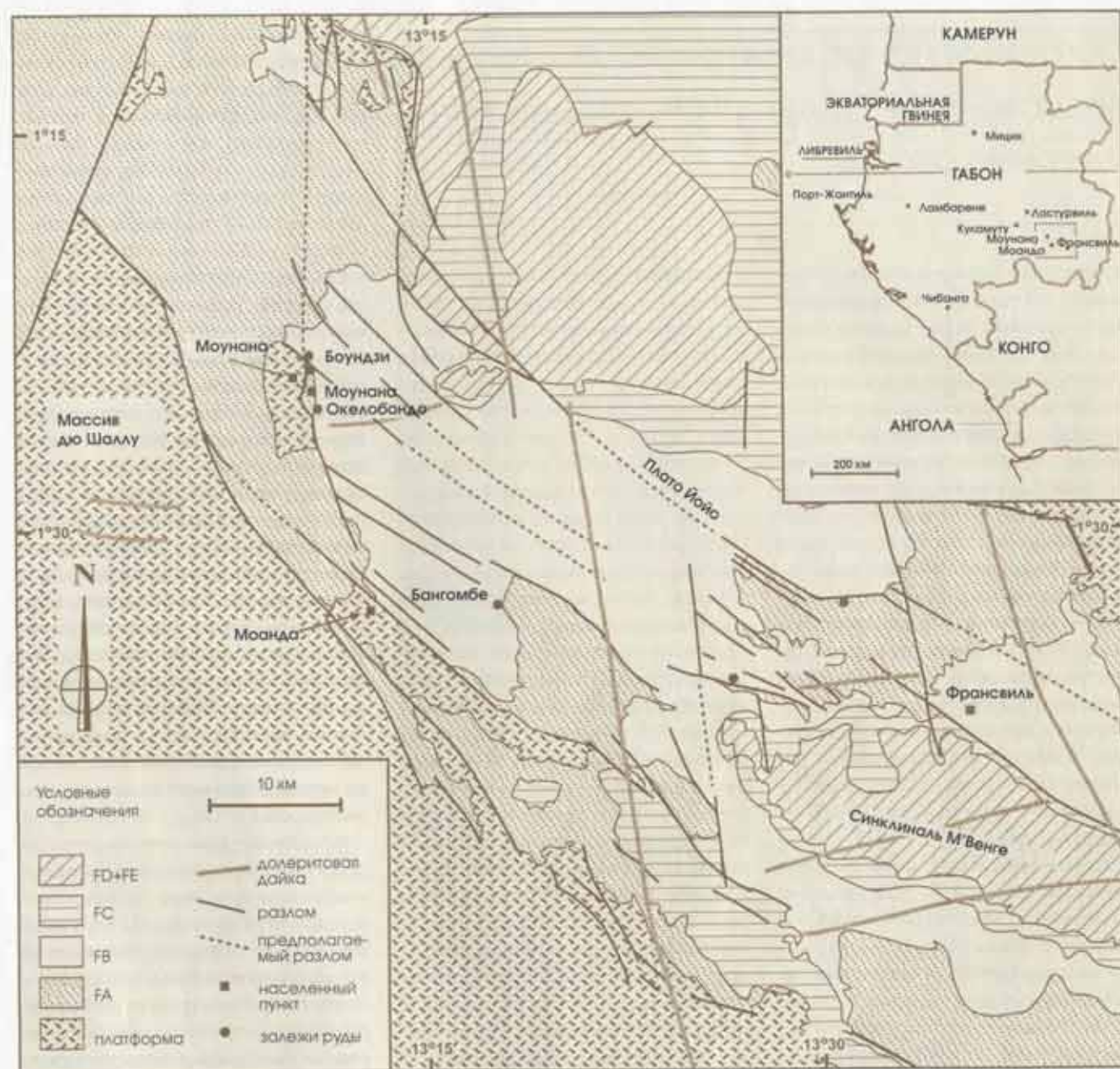
В те незамысловатые времена в той местности, которую люди потом назовут Африкой, Габоном, Окло, шел процесс, который мы привыкли отождествить с техническим прогрессом второй половины XX в. – работал природный ядерный реактор. Предтеча всей современной энергетики, он действовал на протяжении сотен тысяч лет,

то затухая, то вспыхивая вновь. Э. Ферми и П.Л. Капица утверждали, что только человек способен создать ядерный реактор, однако природа оказалась более изощренной. Человечество же «доросло» до ядерной энергетики всего 60 лет назад – первый реактор был построен в 1942 г.

Каков же механизм столь удивительного процесса? Нынешнее государство Габон покончит на древней гранитной плите, содержащей порядка  $4 \times 10^{-4}\%$  урана. Под неустанным действием воды и ветра гранит со временем рассыпался в прах, превращаясь в глину и песок, подземные воды, насыщенные кислородом, выщелачивали из них уран, несли его за собой и постепенно откладывали в осадочные толщи некоей впадины – вероятно, это могла быть дельта древней реки. Надо сказать, что уран в горных породах содержится в самых разнообразных «нишастых»: в виде собственно урановых минералов, изоморфных примесей в составе других минералов, отдельных атомов и их скоплений, в межзерновых швах и т.д. При этом уран охотно мигрирует вместе с водой, содержащей большое количество кислорода, т.е. в окислительной обстановке. И так, насыщенная кислородом вода пробирается сквозь толщу горной породы, вымывает из нее уран, увлекает его за собой и постепенно расходует содержащийся в ней кислород на окисление органики и двухвалентного железа. Когда запас кислорода

исчерпан, химическая обстановка в земных глубинах из окислительной превращается в восстановительную. На этом путешествие урана завершается – он отлагается в горных породах, накапливаясь на протяжении многих тысячелетий. Так природой были созданы ядерные залежи «котлы», в которых концентрация урана составила 40–60%.

Уран имеет несколько изотопов, причем основную массу составляет  $^{238}\text{U}$ , период полураспада которого ни много ни мало 4,5 млрд. лет. Однако для создания ядерного реактора необходим изотоп  $^{235}\text{U}$  с периодом полураспада 700 млн. лет. В современной руде его доля чрезвычайно мала – всего 0,7%, при этом для запуска ядерной реакции требуется около 3%  $^{235}\text{U}$ . Учитывая его период полураспада, легко подсчитать, что 2 млрд. лет назад, когда сформировалось месторождение Окло, содержание  $^{235}\text{U}$  составляло порядка 3,2–3,5%, т.е. именно столько, сколько нужно для самопроизвольного «включения» реактора без предварительного обогащения руды. Разумеется, для начала процесса важен ряд дополнительных условий. Прежде всего это наличие некоторого количества воды (12–15%), которая служит замедлителем нейтронов, образующихся при спонтанном делении урана, поскольку реакция может происходить только под воздействием медленных нейтронов. Требуется также пористая порода, обеспечивающая



Геологическая карта бассейна Франсвилль, демонстрирующая распределение отложений франсвилльских серий и положение большинства наиболее важных урановых месторождений.

беспрепятственный доступ воды, определенная концентрация самого урана и т.д. Работающий природный реактор постепенно нагревал вмещающие породы и осушал их, поскольку температура достигала нескольких сотен градусов. Вода испарялась, нарушались условия функционирования реактора, и он затухал. Когда порода остывала, вода вновь просачивалась и запускала ядерную реакцию. И так,

то вспыхивая, то угасая, реактор, мощность которого составляла порядка 25 кВт (что в 200 раз меньше, чем у самой первой атомной электростанции), горел порядка 500 тыс. лет.

Обнаружен данный феномен был в известной степени случайно. В 1972 г. в лабораторию французского урано-обогатительного завода Пьеррлатт (*Pierrelatte*) доставили партию сырья с месторождения Окло. Один из хими-

ков-аналитиков обратил внимание на «недостачу»: вместо положенных 0,7202%  $^{235}\text{U}$  его – о ужас! – оказалось всего 0,7171%. Для природы характерна стабильность изотопного состава различных элементов, которая унаследована от праматери, первичного вещества Вселенной. Изотопный состав элементов одинаков на всей планете, в любой ее точке, в любой породе. В природе, конечно, происходит

## Погасший природный реактор дает уникальную возможность судить о том, как человечеству захоронить ядерные отходы.

процессы фракционирования изотопов, но для тяжелых элементов это не характерно, поскольку разница в массах столь ничтожна (допустим, между  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ), что ее недостаточно для того, чтобы данные изотопы разделились в ходе каких-либо геохимических процессов. А на Окло наблюдался очень необычный, нехарактерный изотопный состав урана. На тот момент это казалось невероятным и породило массу самых диковинных гипотез: одни утверждали, что месторождение было заражено отработанным топливом инопланетных космических аппаратов, другие считали, что Окло – ядерный могильник древних цивилизаций и т.д. Однако в конце концов ученые пришли к выводу, что единственное разумное объяснение – существование в древние времена естественного ядерного реактора.

Всего в данном районе около 20 подобных месторождений – их называют реакторными зонами. Окло – наиболее известное из них. Удивительно, но нигде в мире ничего подобного больше не обнаружено, хотя по некоторым сведениям следы похожего реактора найдены в Австралии, которая в далекие времена составляла с Африкой единое целое. Вероятно, 2 млрд лет назад в Габоне сложилась совокупность уникальных условий для запуска естественного реактора. На Земле известны урановые месторождения того же возраста, где ничего похожего не происходило.

Возможны ли такие процессы сегодня? Специалисты утверждают, что нет: миллионы лет продолжался процесс распада  $^{235}\text{U}$ , и теперь его количества уже недостаточно для самопроизвольного начала цепной реакции.

Сейчас на Окло добывается уран. Рудные тела, расположенные ближе

к поверхности, добывают карьерным методом, те, что находятся на глубине, – горными выработками. Но погасший реактор представляет практический интерес еще с одной точки зрения: он дает уникальную возможность судить о том, как человечеству захоронить ядерные отходы, как они будут вести себя в недрах Земли, поскольку природные и технологические процессы во многом протекают одинаково. Опыт Окло свидетельствует о том, что на глубине более 100 м в восстановительных условиях (т.е. при отсутствии свободного кислорода) практически все продукты ядерных реакций сохранились в пределах рудных тел. Переместились только наиболее подвижные из них, такие, как цезий, йод и др. Дело в том, что ядерное топливо почти на 98% состоит из уранинита ( $\text{UO}_2$ ), все остальные вещества (плутоний, америций, технеций, нептуний и др.) являются продуктами его распада, при этом все они остаются в пределах кристаллической решетки уранинита, который служит матрицей для всех компонентов, в том числе для радиоактивных. Таким образом, для длительного сохранения в земле ядерных отходов необходимо поддерживать восстановительные условия. Изучение феномена Окло позволило исследовать поведение различных компонентов в условиях захоронения и составить соответствующую таблицу. Так, выявлено, что такие элементы, как цезий, торий, плутоний, америций, кобальт, редкие земли, нептуний, в основном удерживаются на месте, рубидий и стронций локально перераспределяются, а криптон уходит и т.д. Пример Окло наглядно демонстрирует, что в восстановительной химической обстановке,

свойственной глубоким недрам Земли, урановая руда или продукты ядерной реакции могут сохраняться в течение миллиардов лет. За это время те элементы, чья жизнь коротка, распадаются, остаются только «долгожители», период полураспада которых сопоставим с возрастом нашей планеты. Например, период полураспада таких высокорadioактивных элементов, как  $^{137}\text{Cs}$  (цезий) и  $^{90}\text{Sr}$  (стронций), составляет всего 30 лет. Если их поместить в глину, где нет водного потока, и зацементировать, то через 500 лет от них практически ничего не останется. При этом никакого заражения почвы не произойдет, поскольку радиоактивные элементы могут проникнуть через водоупорный слой только путем диффузии, а это чрезвычайно медленный процесс.

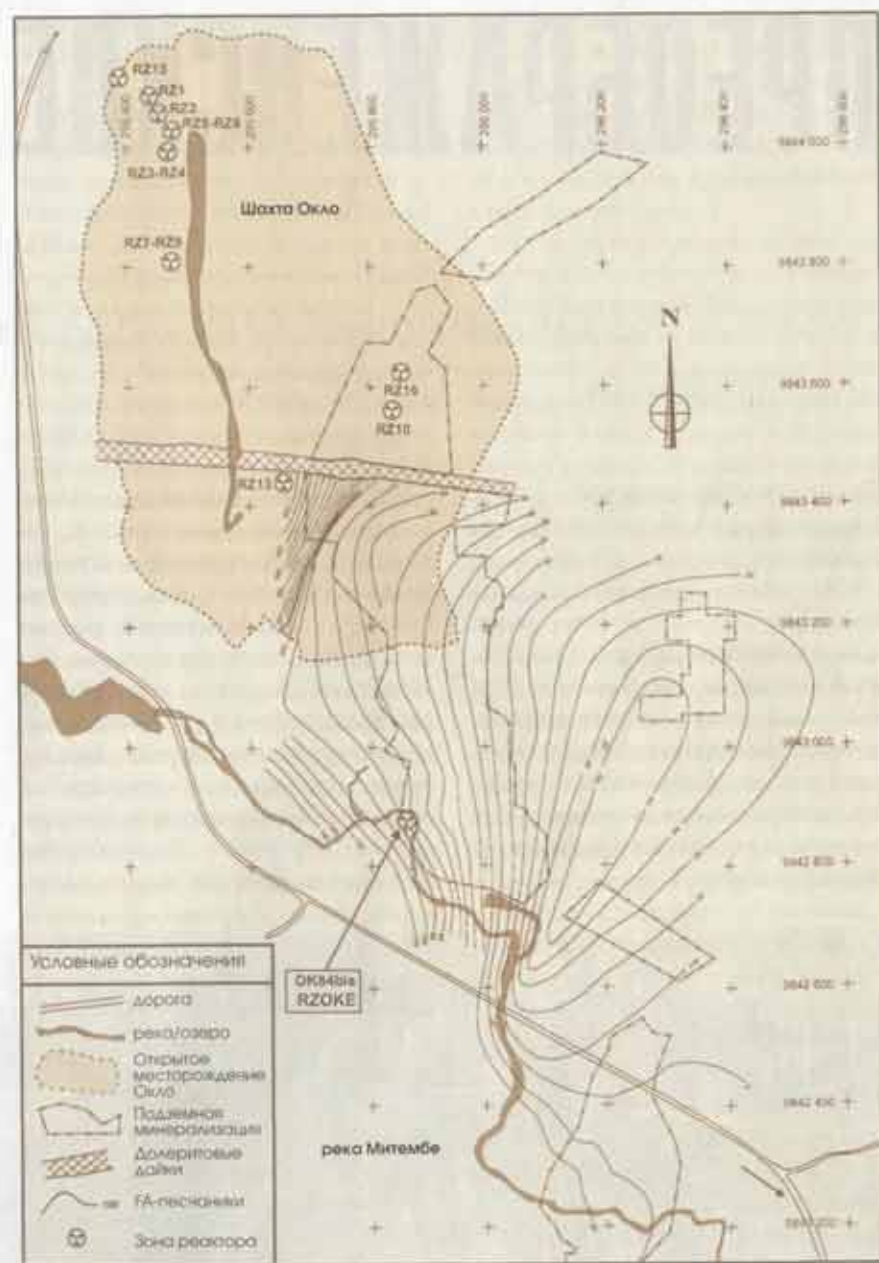
Погребение радиоактивных отходов осуществляется следующим образом: в остеклованном виде их помещают в канистру (чаще всего из нержавеющей стали), которую устанавливают в специально вырытой в горной выработке ячейке, пространство между породой и канистрой заполняется глиной (бентонитом), сверху отверстие цементируется и запечатывается, горная выработка заполняется каменной крошкой и обломками камней. Таким образом токсичные радиоактивные вещества сохраняются в восстановительной среде. Для захоронения лучше всего подходит коренные кристаллические породы в тектонически стабильных районах, например, на Кольском полуострове, в Карелии, в Сибири, в Забайкалье, на Алдане, на Курской магнитной аномалии и т.д. В случае землетрясения вероятность разрушения канистры крайне мала, поскольку она достаточно прочна, а глинистый материал вокруг нее

(бентонит) служит своеобразным амортизатором. Кроме того, как показали исследования японских специалистов, чем глубже могильник, тем меньше сказывается землетрясение. Опасность заключается в другом: смещение пластов земли может изменить движение подземных вод и нарушить восстановительные условия, необходимые для длительной консервации радиоактивных веществ. Поэтому захоронения следует осуществлять вне зон сейсмической активности.

С точки зрения геохимии подходящие условия для хранения ядерных отходов – на дне Черного моря, где отсутствует кислород, вода содержит большое количество сероводорода (следовательно, в наличии восстановительная среда), а опасность катаклизма, в результате которого произойдет поднятие дна или осушение моря, ничтожно мала. Справедливости ради следует сказать, что это только теория, и хоронить ядерные отходы в нашем единственном теплом море никто не собирается.

Радиоактивные отходы погружаются на столь большую глубину, что они не представляют опасности ни для людей, ни для растений, ни для животных. Конечно, обыватель страшится неведомой угрозы, кроющейся за словом «радиация». Поэтому во Франции, например, людей стараются убедить в том, что их жизни и здоровью ничто не нанесет вреда: в местах захоронения разбирают цветники, организуют экскурсии, в том числе школьникам и т.д. Однако движение «зеленых» против ядерной энергии настолько сильно, что Германия намерена отказаться от ее использования после того, как существующие станции отработают свой срок. Во Франции же, наоборот, более 87% вырабатываемой энергии приходится на атомные электростанции.

Многие проблемы и мифы, связанные с утилизацией радиоактивных отходов, достались нам в наследство со времен «холодной войны». В погоне за наращиванием вооружений и увлекшись идеей победы любой ценой над «гидрой империализма», мы в ослепле-



Карта месторождения Окло-Окелобондо в Моуна, на которой показаны места расположения естественных реакторов.

нии своем безразсудно пренебрегали вопросами экологии и безопасности, сливая ядовитые отходы в водоемы, среди наиболее известных – река Теча и озеро Карачай в Челябинской области. Однако если рассуждать здраво, ядерное производство не более опасно, чем любой другой вид деятельности – при условии соблюдения необходимых и разумных мер безопасности и наличия научного подхода к решению возник-

ших проблем. Окло предоставляет уникальную возможность ознакомиться с результатами поставленного самой природой эксперимента по хранению отработанного ядерного топлива и сделать соответствующие выводы. Не стоит игнорировать и тот факт, что жизнь на Земле зародилась и благополучно развивалась на фоне естественных ядерных процессов, характерных для Вселенной. ■