

Новейшие достижения в разведке урановых месторождений

П.М. Барретто*

Даже в том случае, когда разведку минералов осуществляют опытные и хорошо знающие свое дело специалисты, этот промысел связан с большими денежными затратами, с высокой степенью риска и отнимает много времени. Говорят, что разведка — это сочетание искусства и науки: большинство проектов поисковых работ начинается с выдвижения общих идей и геологических концепций и включает проведение самых разнообразных работ в поле и лаборатории, начиная от простого осмотра местности и кончая детальным технико-экономическим обоснованием проекта.

Разведка месторождений урана не является исключением в этом плане; ее единственное преимущество состоит в том, что уран может быть обнаружен на расстоянии, поскольку он испускает гамма-излучение. Поэтому наиболее пригодными для разведки урана являются радиометрические методы. Развивающиеся страны, которые проявляют интерес к разведочным работам или которые уже начали осуществлять программы разведки месторождений урана, кроме тех проблем, которые изложены в общих чертах выше, сталкиваются с рядом других проблем:

- нехватка или трудности с набором необходимого числа квалифицированных специалистов для работы в поле и в лабораториях (нехватка рабочей силы);
- отсутствие достаточно развитой административной и технологической инфраструктуры, необходимой для проведения разведочных работ (отсутствие технологии);
- относительно небольшой бюджет для осуществления многолетней программы (отсутствие средств).

Поэтому весьма важно разумно использовать время и имеющиеся ресурсы для осуществления программы разведки. Это означает, что необходимо выбирать оптимальные методы получения требуемой информации и избегать ненужного дублирования усилий правительственных учреждений. Такое дублирование усилий при организации и проведении разведочных работ широко распространено в развивающихся странах. Есть примеры, когда три правительственные организации проводили геологические съемки одного и того же района.

Ввиду того, что объем, качество и пригодность геологической информации зависят от места проведения съемки, а также в силу того, что программы проведения разведочных работ могут отличаться по

своему размаху и целям, трудно рекомендовать какую-либо одну стандартную процедуру. Процедуры или последовательность действий, кратко изложенные ниже (рис. 1), предлагаются для районов, в которых разведочные работы производятся впервые. Если эти работы будут проводиться по определенной системе, то можно будет получить как геологическое описание, так и оценку потенциальных запасов минералов в данном районе с минимальными затратами и максимальной отдачей.

Радиометрическая съемка

При проведении разведки урановых месторождений наиболее эффективным методом является, несомненно, радиометрическая съемка. Действительно, сочетание метода аэrorадиометрической съемки с наземной разведкой обнаруженных аномалий и гамма-каротажем скважин привели к открытию большинства известных в настоящее время урановых месторождений. Радиометрическая съемка, в ходе которой измеряется общий уровень гамма-активности, или гамма-активность в конкретном месте, получила самое разнообразное применение. В соответствии с конкретным применением существует множество различных приборов, предназначенных для выполнения работ в поле и в лаборатории. Ниже приводится описание основных методов.

Аэrorадиометрическая съемка. Такая съемка производится на начальном этапе обследования больших площадей. Высокочувствительные детекторы гамма-излучений устанавливаются на борту вертолета или самолета (рис. 2). В ходе съемки радиоактивные аномалии обнаруживаются, регистрируются и оконтуриваются на картах для последующей проверки на земле. Съемку такой площади обычно ведут по сетке.

Несмотря на сравнительно высокие затраты на километр маршрута, гамма-спектрометрическая аэросъемка является экономически весьма эффективной. Если сравнивать общие затраты на полеты, составление карт, проведение оценок и работ по выбору мест для дальнейших поисков, то этот метод выгодно отличается от других методов. Данные спектрального анализа при их правильной оценке значительно сокращают объем дорогостоящей проверки на местности, необходимой для оценки результатов съемки (проверка на местности является необходимой частью съемки и часто более дорогостоящей в расчете на 1 км² или на аномалию, чем аэросъемка).

* Сотрудник Секции ядерных материалов и топливного цикла, Отдел ядерного топливного цикла МАГАТЭ.

I. Этап планирования

II. Этап предварительной разведки (малая густота)

Площади с неизвестным возможным содержанием руд ($> 5000 \text{ км}^2$)

Масштаб карты: 1: 250 000 до 1: 100 000

Геологическое дешифрирование аэроснимков

Рекогносцировочная геология

(грубый счет, гамма-спектрометрия) съемка с воздуха,
съемка с автомашины

Геохимическая съемка: (0,1-1 проба/км²)

Тяжелые минералы, озерные отложения, вода

▶ Район, не представляющий интереса

III. Промежуточный этап (средняя густота)

Районы, представляющие интерес (200-2000 км²)

Масштаб карты: 1: 50 000 до 1: 25 000

Геологическое дешифрирование аэроснимков

Геологическое картографирование

Радиометрическая съемка:

съемка с воздуха (плотная), съемка с автомашины, наземная
съемка

Геохимическая съемка: (2-10 проб/км²)

Речные отложения, вода, почва, почвенный газ

Бурение по крупномасштабной сетке (1 скважина/2-5 км²) *

▶ Незначительные аномалии (зарегистрированные)

IV. Этап детальной съемки (высокая густота)

Значительные аномалии (2-20 км²)

Масштаб карты: 1: 10 000 до 1: 1000

Геологическое картографирование, изыскания, разведка
траншеями

Наземная радиометрическая съемка

Электромагнитная съемка (весьма низкая частота) или
другие виды съемки

Геохимическая съемка: (> 100 проб/км²)

Почва, почвенный газ, образцы пород

Систематическое бурение (1 скважина/км²) *

▶ "Ложные" аномалии (зарегистрированные)

V. Этап разведочно-подготовительных работ на месторождении

Разведочные работы

Детальное картографирование, разведка траншеями

Бурение по густой сетке

Минералогические и петрографические исследования

▶ Минеральное образование, эксплуатация которого экономически нецелесообразна (зарегистрированное)

Рудное месторождение

* Для месторождений типа песчаников

Рисунок 1. Последовательность работ при разведке урановых месторождений

Наземная радиометрическая съемка. Последующее изучение урановых аномалий на местности проводится с использованием портативных и переносных сцинтилляционных счетчиков или спектрометров, самописцев, скважинных зондов и эманометров (радоновых мониторов).

Сцинтилляционные счетчики используются для измерения гамма-излучения, испускаемого природными радиоактивными элементами, содержащимися

в породах (U, Th, K). В основном такие приборы используются для поиска радиометрических аномалий, что в конечном счете может привести к открытию урановых месторождений. Эти приборы характеризуются высокой эффективностью детектирования гамма-излучений, причем они обеспечивают высокую скорость счета и сравнительно низкий уровень статистических флуктуаций. Это позволяет обнаруживать даже небольшие изменения в концентрации радиоактивных элементов. Сцинтилляцион-

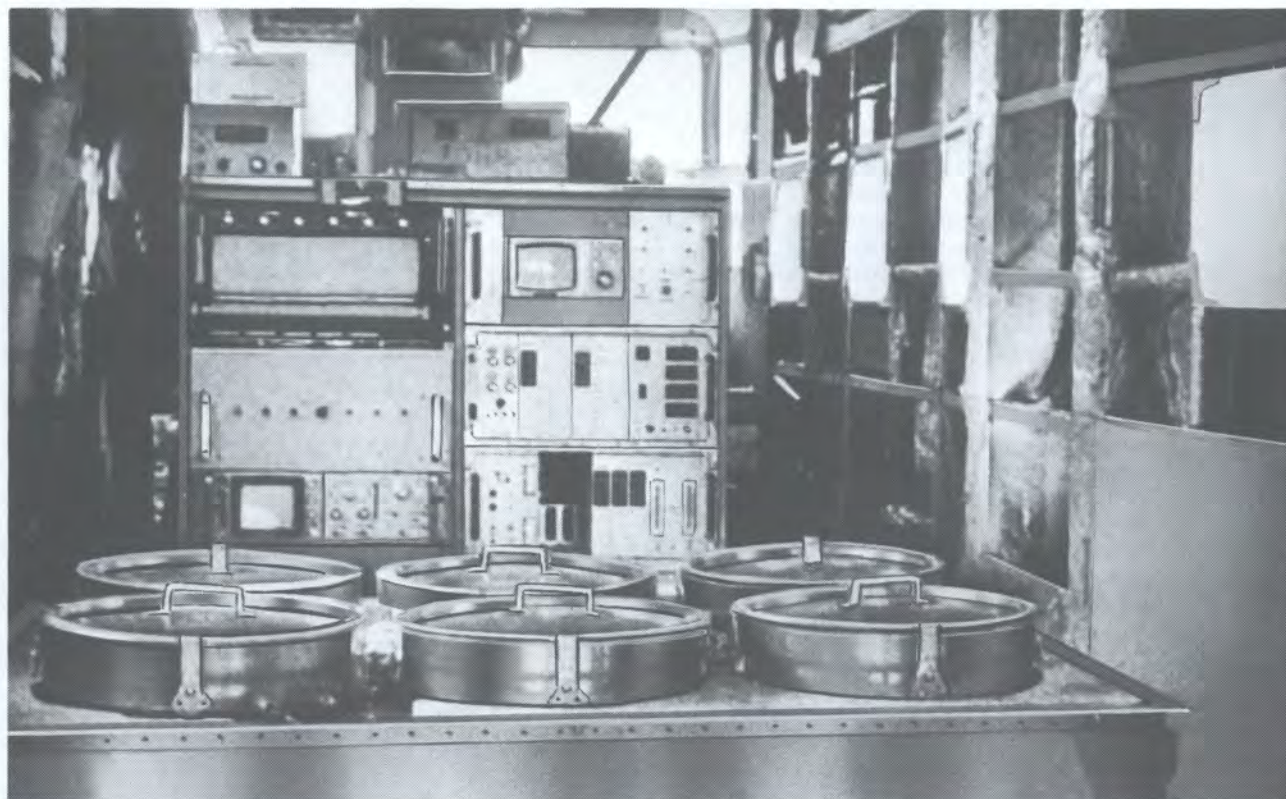


Рисунок 2. На переднем плане показана система гамма-спектрометрии для съемки с воздуха, состоящая из шести крупногабаритных Na I (TL)-детекторов. Эта система устанавливается на борту самолета, производящего съемку, вместе с соответствующей электронной аппаратурой, расположенной за детекторами.

Рисунок 3. Каротаж скважины в Пакистане. Рабочий стоит около аппаратуры для регистрации данных каротажа и ручной лебедки, используемой для опускания зонда в скважину, и держит в руках зонд.



ные счетчики чаще всего входят в состав полевого оборудования, используемого для разведки урановых месторождений; они применяются на всех самых различных этапах разведки в сочетании с геохимической или геофизической съемкой.

Сцинтилляционные счетчики могут быть установлены на подвижных лабораториях, предназначенных для проведения наземной радиометрической съемки с использованием автотранспортных средств. Такие съемки представляют собой весьма практичный метод разведки урана в том случае, когда имеется хорошо развитая сеть автомобильных и грунтовых дорог. Этот метод позволил обнаружить несколько месторождений.

Полевой спектрометр является усовершенствованным прибором, предназначенным для радиометрических измерений; он позволяет детектировать исключительно энергию гамма-излучения и, следовательно, радиоизотопы, являющиеся источником излучения. Таким образом, с помощью этого прибора можно определять относительные эквивалентные концентрации U, Th и K. Капитальные затраты на приобретение полевого спектрометра в несколько раз выше, чем затраты, требующиеся для покупки сцинтилляционного счетчика. К недостаткам полевых спектрометров следует отнести: более значительные по сравнению с крупномасштабными съемками затраты времени; трудности, испытываемые в связи с содержанием оборудования в надлежащем рабочем состоянии в отдаленных районах; необходимость проведения частых калибровок. Ценность полученных результатов, как правило, зависит от того, насколько правильно интерпретируются геологические и геохимические параметры конкретного района. Необходимо, чтобы на каждом данном этапе разведки принималось обоснованное решение относительно целесообразности проведения спектрометрии на местности.

Радиометрический каротаж буровых скважин. В результате наземного излучения урановых аномалий некоторые районы могут быть объявлены бесперспективными с точки зрения наличия запасов урановых руд или заслуживающими проведения детальной разведки. Если принимается решение в пользу проведения дальнейшей разведки, то в большинстве случаев требуется радиометрическая информация о слоях, залегающих под поверхностью. Такую информацию получают с помощью каротажа буровых скважин и путем исследования бурового шлама или кернов.

В ближайшие годы частными и правительственными организациями в соответствии с планами работ по разведке урана будут пробурены десятки миллионов метров скважин. Обычно затраты на бурение составляют от 50 до 80% стоимости программы проведения разведочных работ, и, возможно, эффективное бурение имеет более важное значение с точки зрения эффективности разведки урановых месторождений, чем все другие, отдельно взятые виды разведочных работ.

При каротаже буровых скважин в ствол скважины опускается детектор гамма-излучений (зонд),



Рисунок 4. Исследование буровых колонок и отбор проб в Саскачеване, Канада. В целом этот метод является более дорогостоящим, чем каротаж скважин.

который регистрирует радиоактивность (рис.3). Этот метод позволяет геофизику-разведчику быстро и экономично получить максимальное количество информации о слоях, расположенных под поверхностью, при этом производятся отбор проб и их оценка *in-situ*, литологическое определение, стратиграфическая корреляция, а в случае более сложных программ каротажа определяются петрофизические параметры, такие, как плотность, влажность и различные геохимические данные. Часто проведение каротажа может обеспечивать значительное снижение стоимости буровых работ, так как он позволяет получать необходимые данные из более дешевых скважин без отбора керна или из скважин, пробуренных ранее для других целей. Как правило, каротаж скважин дает более представительные и объективные данные при меньших затратах времени и более низких расходах, чем описательный каротаж, отбор проб и анализ кернов или шлама. Стоимость многопараметрового геофизического каротажа буровых скважин лишь в редких случаях превышает 10% общей стоимости буровых работ (рис.4).

Буровые работы и методы каротажа также представляются весьма важными с точки зрения оценки и разработки месторождений, а также контроля за качеством руды на различных этапах добычи урана.

Ввиду большого спроса на информацию о методах каротажа МАГАТЭ готовит к изданию справочник по каротажу буровых скважин при разведке



Рисунок 5. Измерение газообразного радона в почве.

урановых месторождений, предназначенный для государств-членов. Это будет доступный, содержащий новейшие сведения по технологии каротажных работ справочник; ожидается, что справочник выйдет из печати к концу 1981 года.

Радоновые съемки. Этот метод основан на измерении уровня содержания радона, радиоактивного газа, присутствующего в почве, породах и воде. Радон характеризует наличие урана, в то время как источником гамма-излучения в природной окружающей среде могут быть другие элементы семейства урана. Радоновые измерения могут использоваться для индикации урана, залегающего на глубине от 5 до 50 м, тогда как детектированию гамма-излучения может препятствовать покрывающая порода толщиной 0,5 м.

В полевых условиях находят применение такие приборы, как эманометры, называемые также детекторами радона (рис.5); эти приборы используются для определения аномальных концентраций радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) и их непосредственных продуктов распада. Данный метод позволяет проводить различие между радоном и тороном и затем производить измерения независимо от фонового гамма-излучения. Для измерения концентрации радона имеется несколько типов приборов; все они основаны на принципе регистрации альфа-частиц, испускаемых в процессе распада газообразного

радона (^{222}Rn) и его превращения в твердый полоний (^{216}Po).

За последнее время этот метод детектирования был усовершенствован. В одной из модификаций метода регистрируются повреждения (следы), оставляемые альфа-излучением на диэлектрических детекторах (трековые детекторы). В другой модификации используется кремниевый детектор с поверхностным энергетическим барьером (альфа-детектор); в третьей модификации (коллекторный метод) измеряется "активный осадок", образующийся в результате распада радоновых продуктов, накапливающихся на миниатюрном и тонком алюминизированном майларовом диске (альфа-плата).

В прошлом году появился еще один метод детектирования радона. Он был разработан в Южной Африке и получил название "роак", что является акронимом термина "радон на активированном угле". Этот метод основан на поглощении радона активированным углем; содержащийся в угле радон измеряется с помощью сцинтилляционного детектора, помещенного в свинцовый экран. Методика, применяемая в поле для работы с "роак-цилиндрами", идентична методике, которая используется при работе с трековыми детекторами.

Трековый метод и метод счета альфа-частиц обладают преимуществом по сравнению с эманометрическим методом, которое заключается в том, что в первом случае исключаются изменения сигнала во времени, наблюдаемые во многих окружающих средах. Кроме того, в этом случае отпадает необходимость вывозить сложное электронное оборудование в поле.

Конечная цель радиометрических методов состоит в том, чтобы обеспечить правильный выбор мест, наиболее благоприятных для проведения дальнейших разведочных работ, таких, как бурение или разведка траншеями.

Геохимическая съемка

Геохимические методы могут применяться для съемки площадей различных размеров. Эти методы съемки можно подразделить на съемку с малой густотой отбора проб (рекогносцировка) 0,1-2 проб/км²; съемку со средней густотой отбора проб (промежуточный этап) 10-20 проб/км² и съемку с большой густотой отбора проб (детальная съемка) 200 проб/км². Предварительные исследования должны показать, возможно ли вообще применение геохимических методов. Они также должны дать информацию, необходимую для планирования и проведения обычной съемки. Прежде чем начинать осуществление какой-либо программы систематической разведки, необходимо провести ориентировочную съемку или предварительное изыскание для того, чтобы выбрать метод, который должен быть применен.

Предварительные изыскания должны проводиться всякий раз, когда это возможно, на участках, имеющих минерализацию, по своему типу сходную с той, которая является объектом поиска, и располагающихся как можно ближе к площади съемоч-

ных работ. Когда это невозможно, ориентировочные данные можно получить путем исследования других районов, имеющих сходные геологические и климатические условия.

Съемки с малой густотой отбора проб (масштаб 1 : 250 000-1 : 25 000) проводятся для того, чтобы выбрать наиболее благоприятные участки в пределах большого района без их точного оконтуривания. Опыт показал, что воды и речные отложения (рис. 6) широко разветвленной гидрографической сети полностью пригодны для проведения этого вида разведки. Интервал отбора проб определяется во время ориентировочной съемки так, чтобы ореолы рассеяния в гидрографической сети, окружающей месторождение среднего значения, были бы представлены по крайней мере тремя аномальными образцами.

Съемки со средней густотой отбора проб (масштаб 1 : 20 000-1 : 50 000). Цель этого промежуточного этапа состоит в том, чтобы обнаружить и определить происхождение поверхностных аномалий в пределах интересующих участков, оконтуренных в ходе съемки с малой густотой отбора проб. Эта цель достигается путем увеличения густоты отбора проб до 10-20 проб/км². В то же самое время делается попытка связать аномалию с геологией, стратиграфией и тектоникой местности. Пробы воды и речных отложений отбираются из всех рек и ручьев в зоне аномалии. Там, где это возможно, в дополнение к пробам, отобранным из скважин, берутся пробы из ключей и родников. Если геология района аномалии известна недостаточно хорошо, необходимо получить больше геологической информации об аномальных зонах. Если даже такая промежуточная разведка только изредка обнаруживает урансодержащие руды, она тем не менее позволяет значительно сузить границы интересующего участка, дать оценку его потенциала и лучше понять происхождение геохимической аномалии. Затем можно выбрать оптимальный метод проведения дальнейших изысканий: геохимический, радиометрический или геофизический.

Съемка с большой густотой отбора проб (масштаб 1 : 5000-1 : 500). Цель съемок с большой густотой отбора проб состоит в том, чтобы обнаружить предполагаемые источники аномалий и (или) определить границы простирающиеся известных или ассоциирующихся рудных тел и дать оценку результатов радиометрической съемки. Вообще говоря, цель этого этапа заключается в том, чтобы провести различие между аномалиями, образовавшимися в результате присутствия руд, разработка которых экономически целесообразна, и теми аномалиями, происхождение которых объясняется наличием руд, экономически непригодных для разработки, или другими причинами. На этом этапе предпочтение отдается геохимической разведке, в частности, в тех местах, где существует значительное выветривание или где имеются покрывающие породы, не содержащие полезного ископаемого (что делает радиометрические методы неэффективными). Опыт показывает, что на этом этапе наиболее целесообразно применять метод отбора проб из почвы. Обычно



Рисунок 6. Отбор проб воды из домашнего колодца в Турции для анализа содержания урана и радона.

используется квадратная сетка для отбора проб с расстояниями между точками в диапазоне от 10 до 50 м. Необходимо обращать внимание на возможное загрязнение территории в результате горных работ, применения некоторых фосфатных удобрений и другой деятельности человека.

Другие методы

Существуют и другие методы, которые хотя и не применяются специально для разведки урановых месторождений, однако используются для того, чтобы получить более ясное представление о характере оруденения или структуре минерализации; о некоторых из этих методов рассказывается ниже.

Измерение удельного сопротивления поверхности и наведенной поляризации. Эти методы основываются на измерении проводимости и распределении электрических токов в земле. Выбор подходящего расположения электродов зависит от многих факторов, в частности от геометрии объекта и от электропроводности и толщины покрывающих пород. Наиболее широко применяются так называемые решетки Веннера-Шлумбергера и диполь-дипольные решетки. Вообще методы интерпретации данных о наведенной поляризации совершенно не разработаны по сравнению с методами интерпретации данных измерений удельного сопротивления. Эти электрические методы используются только на этапе детальной разведки, когда объект поиска уже обнаружен на каких-либо других проводящих участках, и для определения толщины осадочных пород, покрывающих известную структуру или месторождение. Съемки с использо-

ванием методов измерения удельного сопротивления и наведенной поляризации могут служить ориентиром при разработке программ буровых работ.

Дистанционное зондирование. Многозональные спектральные данные (фотографии), полученные с искусственных спутников Земли или самолетов, позволяют очень быстро составить карты обесцвеченной, возможно, претерпевшей изменения местности на больших территориях. Усиление изображения с помощью ЭВМ заметно расширяет возможности определения таких районов, на которых располагаются объекты поиска, в сравнении с дешифрированием черно-белых или даже цветных фотографий. Некоторые исследования показывают, что спектральные зоны на изображениях, полученных со спутника "Ландсат", не являются оптимальными для выявления некоторых трудно уловимых различий при проведении разведки урановых месторождений. Тем не менее данные, полученные с ИСЗ "Ландсат" и обработанные с помощью ЭВМ, позволили отчетливо выявить красноватую, характеризующую изменениями поверхность местность, которую ранее использовали в качестве ориентира для детальной разведки в районах изыскания урановых месторождений в США. Очертания, имеющиеся на этих изображениях, могут означать структуры, которые в масштабах определенного района могли повлиять на отложение ураносодержащей формации.

Кроме того, в некоторых случаях изображения, полученные методом съемки в инфракрасных лучах, помогают определять наличие и картографировать потенциальные объекты поиска при изыскании урановых месторождений (например, изображения заполненных конгломератом образований в виде каналов в формациях). Методы дистанционного зондирования представляют собой косвенные методы разведки урановых месторождений и используются только для получения геологической и тектонической информации в региональном масштабе. В качестве таковых они применяются во время предварительной разведки и на стадии выбора конкретных районов с воздуха.

Новые методы. Сейчас изучается несколько интересных по своим потенциальным возможностям методов, хотя они еще не использовались в значительных масштабах, а некоторые из них еще даже не были опробованы в экспериментальном порядке. К этим методам относятся методы, использующие регистрацию радиогенного тепла, остаточного магнетизма, измерение гелия и регистрацию радиогенного свинца.

Исследования и разработки

Методы и оборудование, описанные выше, появились в результате проведения большого числа науч-

ных исследований и разработок. Агентство заинтересовано в осуществлении таких научных исследований и разработок в целях совершенствования существующих методов и оборудования, повышения эффективности и сокращения сроков разведки месторождений. По этой причине в 1976 году МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР создали совместную группу для рассмотрения положения в области научных исследований и разработок, связанных с разведкой урановых месторождений. Эта группа, т.е. совместная группа АЯЭ/МАГАТЭ, состоящая из экспертов по исследованиям и разработкам методов разведки урановых месторождений, определили ряд областей, для которых, при условии приложения усилий в целях развития международного сотрудничества, могли бы быть значительно усовершенствованы существующие и разработаны новые методы. Это положило начало сотрудничеству стран в осуществлении международных проектов, охватывающих восемь областей, представляющих общий интерес.

Распространение информации, получаемой в результате исследований, которые осуществляются в процессе реализации проектов, является исключительно важной составной частью этих усилий. С этой целью издается и распространяется на предприятиях, занимающихся разведкой и добычей урана, а также в других учреждениях, связанных с разведкой урана, специальный информационный бюллетень. Основное назначение этого информационного бюллетеня состоит в том, чтобы примерно два раза в год сообщать о достигнутых успехах в осуществлении различных проектов по проведению научных исследований и разработок, координируемых группой экспертов, путем опубликования докладов о проделанной работе, рассмотрения конкретных исследований, проведенных различными рабочими группами, определения будущих направлений деятельности и представления подробных отчетов о соответствующих совещаниях и симпозиумах. Однако также предполагается, что в будущем в информационный бюллетень будут включаться короткие неофициальные сообщения о работах, связанных с осуществлением научных исследований и разработок помимо тех, которые проводятся в соответствии с координированными проектами, а также комментарии по текущим работам или предложениям о проведении будущих работ в области научных исследований и разработок. Государства или организации, заинтересованные в получении информационного бюллетеня, могут направить соответствующий письменный запрос в Агентство. Планируется, что симпозиум, на котором будут представлены и обсуждены результаты научных исследований и разработок, будет проведен с 31 мая по 3 июня 1982 года в Париже.