

УДК 550.37:551.3

ПРИМЕНИМОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СТРУКТУР ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ

Романов А.М.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассмотрены вопросы картирования гидродинамических структур как природных, так и техногенных, в том числе переноса радионуклидов, дистанционно с использованием электроразведочных методов кажущегося электрического сопротивления (КС) и естественного электрического поля (ЕП). При этом учтено, что современное распространение радионуклидов из очагов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) происходит преимущественно с подземными водами. Методы КС и ЕП позволяют выделить природные и техногенные зоны дробления, а также установить наличие в них потоков подземных вод. Наличие и положение потоков вод с радиоактивным загрязнением устанавливается путем замеров эксхалляции трития по методике, разработанной в Институте геофизических исследований. Приведены примеры совместной интерпретации данных методов КС, ЕП и эксхалляции трития, доказывающие применимость методики для выявления гидродинамических структур, в том числе переноса радионуклидов.

В результате подземных ядерных взрывов в недрах формируется сложная структурная обстановка:

- происходит подновление существующих природных разломов с увеличением мощности плоскостных зон трещиноватости и возрастанием их водопроницаемости. В плане эти зоны выражены как линейные структуры;

- образуются новые техногенные нарушения, имеющие преимущественно форму сферических слоев, концентричных очагам подземных ядерных взрывов (ПЯВ). В плане эти зоны выражены как кольцевые структуры;

- на участках ПЯВ подновленные и техногенные нарушения проявляются совместно и образуют сложную структуру.

Движение потоков вод в этих структурах происходит, преимущественно, за счет силы тяжести. Потоки вод переносят вещества, в том числе и радионуклиды. Определение конфигурации таких структур является одним из необходимых условий выделения путей миграции продуктов ПЯВ. При этом устанавливаются местоположение водопроницаемых гидродинамических структур и наличие в них потоков вод. Недостаточность связана с тем, что не все выявленные водные потоки могут содержать избыточные количества радионуклидов, т.к. не все они проходят через очаги ПЯВ и выносят продукты взрывов. Необходимо среди множества других выявить потоки вод, прошедших через очаги ПЯВ. До настоящего времени для решения этой проблемы использовался метод радиогидрогеохимического опробования, которое возможно только на основе бурения.

Бурение характеризуется высокой стоимостью, а также высокой вероятностью промаха при выявлении линейных объектов. Кроме того, высока погрешность опробования дробленых пород. Техническим осложнением является высокая аварийность при проходке скважин в зонах дробления, широко развитых на участках ПЯВ. Стоимость такого способа опробования

безусловно высока. Следовательно, выявление гидродинамических структур, переноса радионуклидов из очагов ПЯВ, должно проводиться косвенно, с использованием более детальных и надежных (при меньшей стоимости) дистанционных способов, а именно – геофизических методов. Вопрос решается на основе выявления физических характеристик гидродинамических структур, характерных для участков ПЯВ.

Практика применения геофизических методов показывает:

- изменения магнитной восприимчивости горных пород происходят на расстояниях от ПЯВ не более первых метров. Как правило, при взрывах температура пород резко возрастает, а магнитная восприимчивость снижается и в слабомангнитных и магнитных породах. Полезный сигнал на дневной поверхности при этом сопоставим с уровнем помех. Изменения магнитной восприимчивости массивов горных пород на расстояниях первые десятки – сотни метров не происходят. Таким образом, на фоне природных распределений магнитного поля магниторазведка не может оказать существенную помощь в картировании гидродинамических структур, образованных техногенным воздействием ядерного взрыва;

- изменения плотности пород при дроблении взрывом весьма существенны и эффект, позволяющий обнаружить полость ПЯВ, может быть значительным. Однако выявление техногенно нарушенных зон на периферии очага ПЯВ и далее – крайне проблематично. Так, по данным Всесоюзного института минерального сырья, еще в середине прошлого века установлено, что участки крупных зон дробления горных пород даже в горных выработках гравирозведочными методами не выявляются;

- изменение сейсмических скоростей (сейсморазведка методом рефрагированных волн) позволяет выделить вокруг очагов ПЯВ локальные участки пониженных значений, интерпретируемых как зоны

техногенной трещиноватости. В разрезе эти зоны формируют кольцевые структуры, в объеме - сферические образования. Таким образом, на основе сейсморазведочных данных могут быть выявлены техногенные нарушения, окружающие очаги ПЯВ. Осложняющим фактором является неоднозначность и высокая степень субъективности интерпретации из-за мешающего влияния блоков горных пород с различными скоростями прохождения волн, особенно в случаях субвертикальных границ, а также высокая стоимость при низкой детальности.

С учетом вышеизложенного основное внимание уделено электроразведочным методам, позволяющим характеризовать не только блоки пород, но и зоны трещиноватости, формирующие водопродвижающие структуры, а также потоки подземных вод в них. Электрические характеристики трещиноватых структур (удельное электрическое сопротивление и естественные электрические поля) существенно отличаются от аналогичных характеристик монолитных пород.

Обычно зоны разломов представлены сериями субпараллельных, близрасположенных трещин, частота встречи которых максимальна в центре разлома и убывает по мере удаления от него. Часть природных разломов образовалась миллионы-сотни миллионов лет назад и относится к древним образованиям. Регионы древних разломов, сохранившиеся до настоящего времени, как правило, являются крупными зонами аккумуляции. В них трещинное пространство разломов заполняется вторичными минералами, в основном кварцем и карбонатами. Водопроницаемость резко снижается, а удельное электрическое сопротивление зон возрастает и может существенно превысить сопротивление окружающих пород [1].

Молодые разломы (современные или образовавшиеся несколько тысяч лет тому назад) характеризуются открытой трещиноватостью, не залеченной кварцем и карбонатами, отмечаются высокой водопроницаемостью и низким удельным электрическим сопротивлением. Особенно это относится к современным техногенным разломам на участках ПЯВ. Разломы, подновленные взрывами, а также вновь образованные, характеризуются повышенной мощностью и высокой разрушенностью пород. Такие зоны разломов непосредственно выделяются методами кажущегося сопротивления. Именно они могут являться путями миграции радионуклидов в настоящее время. Меньшая удельная стоимость площадных электроразведочных работ по сравнению с сейсморазведкой при сходных результатах позволяют отдать предпочтение электрометрическим исследованиям.

Электроразведка методами кажущегося сопротивления позволяет обнаружить зоны повышенной разрушенности (трещиноватости) горных пород, а привлечение метода естественного электрического поля (ЕП) – дистанционно определить наличия потоков вод в этих зонах. Участки сужения потока отмечают-

ся понижениями ЕП. В их пределах происходит преимущественно выщелачивание и последующее удаление веществ твердой фазы. Участки расширения потока отмечаются повышениями ЕП. В их пределах происходит переход веществ из жидкой фазы в твердую с последовательным накоплением (отложением) [1]. Таким образом, выявляются гидродинамические структуры, часть которых может переносить и перетлагать техногенные радионуклиды (продукты ПЯВ). Для получения завершающего результата необходимо доказательство наличия радионуклидов в таких гидродинамических структурах.

Согласно данным радиогидрогеохимического опробования ручьев, вытекающих из боевых штолен, установлено, что все повышения активности главных продуктов ядерных взрывов (^{137}Cs и ^{90}Sr) сопровождаются повышениями активности трития. Обратное утверждение недействительно [2]. Поэтому нельзя не согласиться с утверждением специалистов ИР-БиЭ о том, что наиболее миграционноспособным техногенным радионуклидом является тритий. Это связано с тем, что перенос трития происходит преимущественно в газовой форме. Так, натурные определения активности по реке Шаган позволяют предположить, что соотношение активности газового и водного трития составляет 5:2 [2]. Миграционная способность газового трития в недрах земли на несколько порядков выше миграционной способности водного трития (в том числе и паров тритиевой воды). Для определения скорости миграции газового трития в недрах автором предложена формула:

$$V = (k/\mu) \cdot (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{тр}}) \cdot g$$

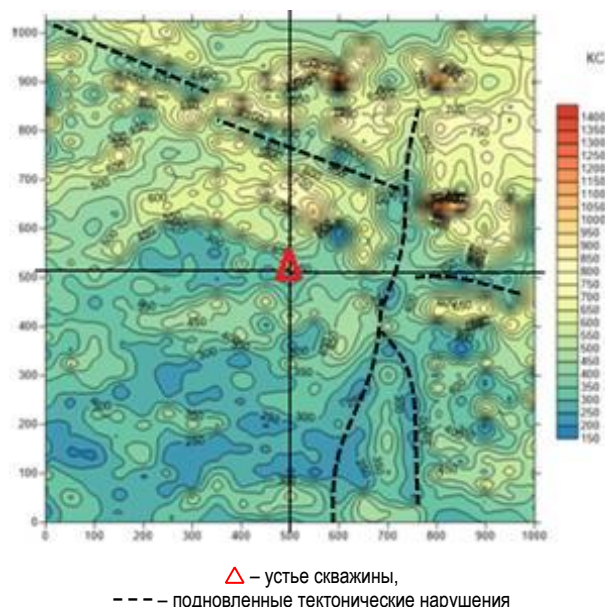
где V – скорость подъема трития, k – поверхность площади пор поперечного сечения элементарного объема горных пород, по которым движется тритий; μ – коэффициент динамической вязкости трития; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха; $\rho_{\text{тр}}$ – плотность трития.

Причиной вертикального подъема трития из недр к поверхности земли является его меньшая плотность по сравнению с плотностью воздуха (почвенного и атмосферного). Скорость подъема трития на 2–3 порядка превышает скорость диффузии. Поэтому ореолы трития на поверхности земли будут сопоставимы с размерами источников трития в недрах. Интенсивность ореолов трития на поверхности меньше, чем на глубине, но остается достаточной для уверенного получения полезного сигнала.

Комплекс электроразведки методами КС и ЕП, дополненный съемкой эксхалицией трития, необходим и достаточен для картирования гидродинамических структур, по которым происходит миграция продуктов ядерных взрывов. Практически применимость комплекса доказывалась результатами полевых исследований на площадке Балапан СИП. Всего на площадке проведены исследования на 16 участках. Из них, 13 – на участках боевых скважин; 2 – на

структурных скважинах, 1 – на участке без скважин, но в районе воздействия боевой скважины № 1004. Размеры изученных участков 1×1 км, сеть съемок КС и ЕП 50×25 м, а эксхалции трития 50×50 м. Направление профилей – северо-восточное, вкрест линейной структуры погружения погребенного рельефа, т.е. по направлению потоков грунтовых вод.

На рисунке 1 приведен пример результатов площадной съемки методом срединного градиента на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП. В этой скважине 25.12.1975 г. был проведен ПЯВ мощностью 59 кт на глубине порядка 350 м. Подземный взрыв был полного внутреннего действия, сопровождавшийся образованием подземной полости с соответствующим уплотнением, дроблением и расстрескиванием горных пород вокруг полости, без истечения газообразных продуктов в атмосферу.



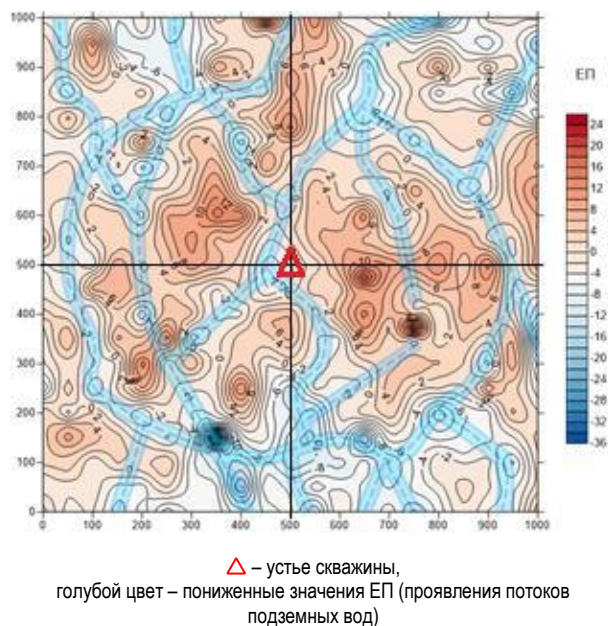
△ – устье скважины,
- - - - подновленные тектонические нарушения

Рисунок 1. Результаты площадной съемки КС на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП

Как следует из рисунка 1, на дневной поверхности проявляется серия линейно вытянутых понижений КС, протяженность которых достигает 600–700 м, а ширина 20–50 м. Такие понижения интерпретируются как зоны интенсивного «подновления» имеющих геологических разломов различных направлений. Подобные формы распределений КС на участках без интенсивного техногенного воздействия встречаются редко. Исключением являются участки интенсивной гидротермальной проработки горных пород с наличием массивных сульфидных руд в зонах окисления. На этом же рисунке 1 видно, что вблизи устья скважины № 1067 проявлены локальные понижения КС, форма которых близка к изометричной, что, по-видимому, отражает разрушение пород вокруг очага ПЯВ.

Протяженные и узкие распределения минимумов ЕП имеют кольцевой, а также линейный вид, и отра-

жают наиболее крупные потоки подземных вод на участке скважины № 1067 (рисунок 2).



△ – устье скважины,
голубой цвет – пониженные значения ЕП (проявления потоков подземных вод)

Рисунок 2. Результаты площадной съемки ЕП на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП

Совместная интерпретация результатов съемок КС и ЕП представлена на рисунке 3. Коричневыми линиями выделены разрывные нарушения по данным КС, голубыми линиями – потоки подземных вод по данным ЕП. Отмечается пространственное совпадение большей части потоков с разрывными нарушениями. В то же время явно выраженная приуроченность потоков вод к разломам одного направления не отмечена. В целом распределения КС и выделяемые по ним разломы, характеризуются большей детальностью в сравнении с распределением ЕП.

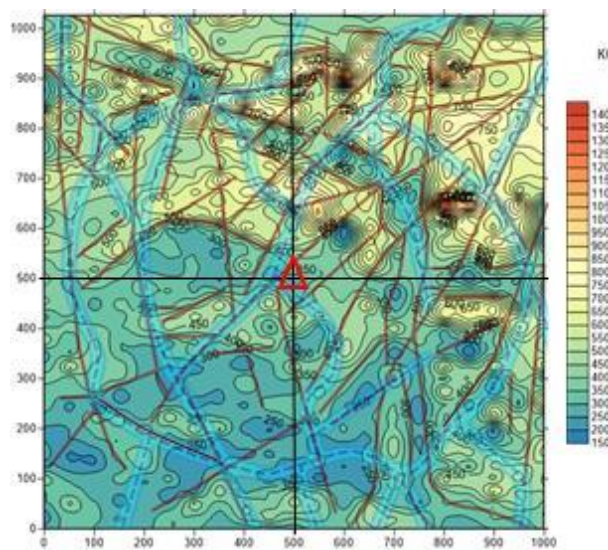


Рисунок 3. Результаты совместной интерпретации площадных съемок КС и ЕП на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП

Статистический анализ результатов интерпретации по всем 16 исследованным участкам показал, что наиболее проявлены разрывные нарушения северо-восточного направления. Вдвое слабее проявлены разрывные нарушения ортогональной системы (меридиональные и широтные). Наименьшей проявленностью характеризуются северо-западные нарушения. Совпадение участков экстремумов ЕП и КС имеет место в 75 % случаев.

Результаты совместной интерпретации данных КС и ЕП заметно сужают площади предполагаемого загрязнения, однако они не позволяют однозначно выделить местоположение потоков вод с продуктами ПЯВ. Автором разработано физическое представление о взаимодействии горных пород и вод, позволяющее установить связь межфазного перехода веществ в литосфере с участками повышенный потенциала течения. Переход происходит под действием напряженности естественного электрического поля [1] и это позволяет выделить места наиболее вероятных скоплений вторичных веществ, в том числе и радионуклидов. Следует подчеркнуть, что скопления ^{137}Cs и ^{90}Sr являются следствием перехода этих элементов из жидкой фазы (потоков вод) в твердую фазу (горные породы). В твердой фазе цезий и стронций становятся неподвижными. В условиях литосферы под действием электрического поля тритий из жидкой фазы переходит в газовую и становится высокоподвижным [3].

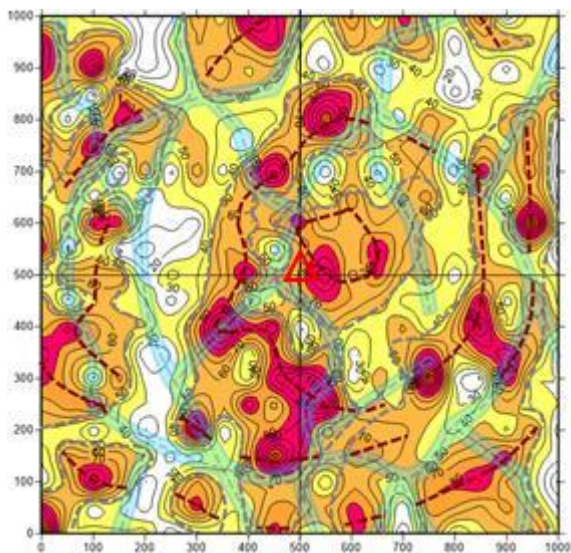


Рисунок 4. Результаты совместной интерпретации съемок ЕП и эксхалации трития на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП

Наличие радионуклидов в потоках подземных вод устанавливалось на основе данных съемок эксхалации трития. На рисунке 4 показано, что максимумы активности трития связаны с краевыми частями потоков вод в техногенных кольцевых и линейных структурах. Значительно реже аномальные повышения активности трития непосредственно совмещают-

ся с вытянутыми зонами минимумов ЕП. Эта особенность проявлена по участкам и других боевых скважин [3]. Для большей наглядности выполнено зонирование по уровням ЕП (рисунок 5).

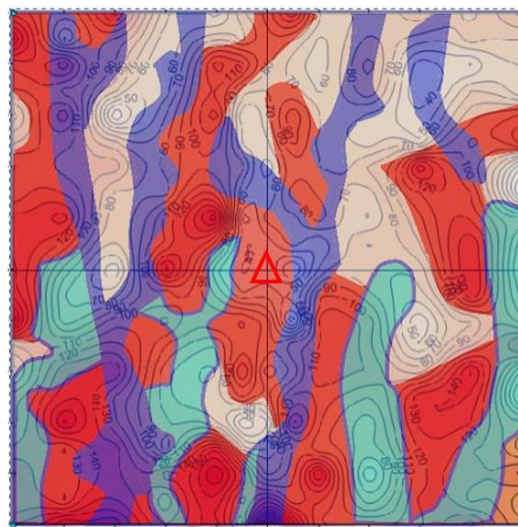


Рисунок 5. Совмещение карт активности трития (изолинии) и зонированных распределений ЕП на участке скважины № 1067 площадки Балапан СИП

Всего выделено 4 типа зон:

- интенсивные отрицательные значения потенциала (фиолетовый цвет) – наиболее интенсивные потоки подземных вод;
- низкоамплитудные отрицательные значения потенциала (голубой цвет) – воды со слабоинтенсивным движением;
- низкоамплитудные положительные значения потенциала (розовый цвет) – движение вод замедленное или отсутствует;
- интенсивные положительные значения потенциала (красный цвет) – непосредственно примыкают к зонам интенсивных отрицательных значений потенциала и вместе с последними являются электрическими диполями. По геологическим и физическим характеристикам относятся к аналогам болот, примыкающим к рекам и ручьям. Именно в них и происходит переход веществ из водной фазы в твердую с осаждением радионуклидов, а также переход трития из водной фазы в газовую.

На рисунке 5 отчетливо проявлено совпадение максимумов активности трития с положительными аномалиями ЕП, непосредственно примыкающими к местам интенсивных отрицательных аномалий ЕП.

В целом, по всем 16 участкам отмечено следующее: 1) приуроченность максимумов активности трития к краевым частям линейных минимумов ЕП (100 %); 2) существенная связь повышенный активности трития с участками повышенный потенциала течения (81 %); 3) слабая связь повышенный активности трития с участками понижения КС (50 % случаев).

Выводы

1. Приведенные представления выстраиваются в следующую логическую последовательность:

- на участках подземных ядерных взрывов происходит разрушение массивов горных пород;
- наряду с подновлением природных нарушений происходит образование техногенных нарушений;
- нарушения проявляются в виде понижений кажущегося электрического сопротивления и дистанционно регистрируются электроразведкой методами КС;
- нарушения представляют собой линейные и/или кольцевые зоны повышенной водопроницаемости;
- зоны повышенной проницаемости в недрах за-

полняются водой и формируется единая гидродинамическая структура;

- потоки подземных вод проявлены в виде специфических распределений потенциала течения, которые дистанционно регистрируются электроразведкой методом ЕП.

2. Представленные результаты использованы для составления методики картирования потоков вод с радионуклидами и могут применяться при оценке радиационной безопасности недр.

Исследования выполнены в рамках гранта МОН РК № 1758/ГФ4 «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов Семипалатинском испытательном полигоне» (2015–2017 гг.).

Научный руководитель Романов А.М., к.г.-м.н.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М.Романов. – Алматы: НАК Казатомпром, 2003. – 247 с.
2. Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов на Семипалатинском испытательном полигоне: отчет о НИР (заключительный) / Республиканское государственное предприятие «Институт геофизических исследований» (РГП ИГИ); рук. А.М. Романов. – Курчатов, 2017. – 270 с. – НЦНТИ; № ГР 0115РК02350. – Инв. № 0217РК01358.
3. Романов, А.М. Физико-геологическая характеристика миграции радионуклидов / А.М. Романов. – Семей: Издательский дом «Интеллект», 2017–110 с.

РАДИОНУКЛИДТЕРДІ ТАСЫМАЛДАУДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДАРЫН АЙҚЫНДАУ ҮШІН ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРДІҢ ЖАРАМДЫЛЫҒЫ

А.М. Романов

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Гидродинамикалық құрылымдарды, табиғи және техногенді, электрбарлаудың көрінімдік электрлік кедергі (КК) және табиғи электр өрісі (ТӨ) әдістерін қашықтық қолданумен, карталау мәселелері қарастырылған. Мұнысында, жерасты ядролық жарылыстардың (ЖЯЖ) ошақтарынан радионуклидтердің қазіргі кездегі таралуы көбінесе жерасты суларымен өтетіні есепке алынған. КК жәе ТӨ әдістері уатылудың табиғи және техногенді зоналарын бөліп алуға және олардың ішінде жерасты сулардың ағымдары бар болуын анықтауға мүмкіншілік береді. Радиоактивті ластануымен су ағымдары бар болуы мен жатысы, Геофизикалық зерттеулер институтында әзірленген әдісімен тритий экскаляциясын өлшеу жолымен анықталады. Гидродинамикалық құрылымдарды, соның ішінде радионуклидтерді тасымалдайтындары, бөліп алу үшін әдістеменің жарамдылығын дәлелдейтін, КК, ТӨ және тритий экскаляциясы әдістердің деректерін бірлестіріп пайымдаудың үлгілері келтірілген.

APPLICABILITY OF GEOPHYSICAL METHODS FOR DETECTION OF RADIONUCLIDES TRANSFER STRUCTURES

A.M. Romanov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The paper studies the issues of mapping of hydrodynamic structures, both natural and technogenic ones, including the ones transferring radionuclides remotely by using electrical survey methods of apparent electrical resistivity (AR) and self-potential (SP). At that it has been taken into account that modern distribution of radionuclides from the foci of underground nuclear explosions (UNE) takes place mostly with underground waters. AR and SP methods allow to detect natural and technogenic crushed zones as well as establish the presence of underground water flows in them. The presence and location of water flows with radioactive contamination is established by measuring the tritium exhalation based on a methodology developed at the Institute of Geophysical Research. Examples are presented for the joined interpretation of AR, SP and tritium exhalation methods data that prove the applicability of the technique to detect hydrodynamic structures, including the ones transferring radionuclides.