

РАДИОИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ НА УРАН И ОЦЕНКЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.Е. Бахур; Л.И. Мануилова; Д.М. Зуев; А.В. Стародубов; Т.М. Овсянникова

ФГУП «ВИМС», Москва, Россия, lab@u238.ru

Вопросы необходимости усиления исследований по разработке и внедрению в практику геологоразведочных работ новых высокоэффективных и экономичных методов поисков месторождений урана, минимизации и прогноза радиоэкологических последствий при разведке и освоении месторождений, стоят с большой остротой, что связано с необходимостью выявления глубокозалегающих руд, постоянным удорожанием и увеличением объемов поисково-разведочных работ, загрязнением окружающей среды.

Традиционные поисковые методы - наземная гамма-съемка, эманационный и его модификации, уранометрический, биогеохимический, радиогидрогеологический, изотопно-свинцовый, гелиометрический наряду с положительными качествами имеют и существенные недостатки – большое число выявляемых ложных аномалий, небольшую глубинность, неоднозначность получаемых данных.

Радиоизотопные методы до 80-х годов прошлого века использовались в основном во вспомогательных целях, решая такие задачи, как установление источника рудного вещества, генезис месторождения, характер, особенности и время миграции радиоактивных элементов. Применение этих методов в поисковых целях носило больше вспомогательный характер, что объясняется слабой изученностью особенностей поведения радиоактивных изотопов в природных условиях, сложностью изотопного анализа, необходимостью использования спектрометрической аппаратуры. Тем не менее, возрастает интерес к новым возможностям, которые могут дать закономерности распределения отдельных радиоактивных изотопов в геологической среде, в том числе в приповерхностной части.

Учитывая, что открытию месторождения предшествует, как правило, огромный объем горнопроходческих и буровых работ по оценке десятков и сотен аномалий и потенциально рудоносных структур, проблема создания относительно недорогих наземных методов для надежного выявления глубокозалегающих урановых руд является актуальной и экономически значимой.

Одновременно такие методы за счет локализации наиболее перспективных участков при разбравке аномалий позволяют минимизировать радиоэкологические последствия поисково-разведочных работ, связанных с проходкой горных выработок, бурением скважин, и, как следствие – с техногенным нарушением территории, извлечением на поверхность радиоактивных пород и руд, бурового раствора и др. Получаемые данные могут быть использованы для прогнозной оценки радиоэкологических последствий эксплуатации месторождений и разработки мероприятий по их снижению.

Как известно, соотношения между радионуклидами, входящими в состав естественных радиоактивных рядов, позволяют вскрывать наличие, характер, а иногда и время миграции радиоактивных элементов. Эти возможности особенно важны при оценке радиоактивных аномалий и перспективных участков на уран.

Наибольшие трудности при оценке аномалий в зоне гипергенеза вызывает необходимость различать аномалии, связанные с зоной окисления рудной минерализации от инфильтрационных концентраций в водопроницаемых структурах фундамента, а также остаточные ореолы урана от вторичных аккумуляций в корках выветривания.

Указанные пары аномалий, являясь антиподами, часто практически неразличимы по геологическим признакам, применение же изотопных методов позволяет обоснованно их различать. В зависимости от конкретных геологических условий и решаемых задач могут использоваться либо только отдельные соотношения, либо комплекс соотношений. Наиболее часто используются следующие соотношения: $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$; $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$; $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$; $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$; $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$; $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$; $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ и ряд других.

Напомним несколько наиболее типичных случаев изотопных соотношений в горных породах и водах:

- $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} < 1$ в горных породах указывает на вынос U (преимущественно ^{234}U) в течение последних 1,5 млн. лет; в водах подобное отношение встречается очень редко и может указывать на растворение и вынос U, обедненного изотопом ^{234}U .
- $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 1$ в горных породах указывает на привнос U с избытком ^{234}U в течение последних 1,5 млн. лет; для вод подобное отношение указывает на выщелачивание из горных пород и вынос U с преимуществом по ^{234}U .
- При равновесных соотношениях ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$) для горных пород: отсутствие миграции, либо совместная миграция изотопов, что возможно в редких случаях для хорошо растворимых руд; в этом случае и в водах будет равновесие между ^{234}U и ^{238}U .
- $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U} < 1$ в горных породах характерно для привноса U в течение последних 600 тыс. лет; для вод - вынос урана из горных пород.
- $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U} > 1$ в горных породах: вынос U в течение последних 600 тыс. лет; для природных вод практически не встречается.
- $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U} = 1$ для горных пород: отсутствие миграции, а для вод такие отношения также практически не встречаются.

Весьма информативным является отношение радионуклидов $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$, используемое в принципиально новых методах поисков урана и оценки радиогидрогеологических аномалий, разработанных в ФГУП «ВИМС». На указанные методы получены Авторские Свидетельства на изобретения.

Изотопно-почвенный метод (ИПМ) позволяет по избытку ^{210}Po над ^{210}Pb ($^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb} > 1$) на участках с аномальными содержаниями этих радионуклидов в представительном почвенном горизонте выявлять глубокозалегающие урановые руды. Аномальные содержания при равновесном соотношении ($^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb} = 1$) указывают либо на наличие эманулирующих зон разломов, либо на приповерхностные инсоляционные концентрации U.

В ореольных водах урановых месторождений присутствуют аномальные концентрации ^{210}Po и ^{210}Pb при значительном преобладании ^{210}Po над ^{210}Pb , и по мере удаления от рудного тела отношение этих радионуклидов в водах все более стремится к равновесному, а концентрации - к фоновым.

Таким образом, аномальные концентрации и специфические соотношения между радионуклидами в водах и почвах позволяют судить о наличии радиоактивного ореолов, связанных именно с рудными телами, представляющими промышленный интерес.

В зависимости от сочетания климатических и геологических условий, влияющих на условия миграции радионуклидов от источника, подтвержденная предельная глубинность ИПМ составляет до 350 метров.

Опытно-методические исследования с применением этих методов проводятся нами с начала 80-х годов на объектах Кировского, Сосновского, Таежного, Приленского, Волковского, Степного ПГО, а с 2002 года осуществляются опытно-производственные работы с использованием комплекса радиоизотопных методов в районах Карелии, Калмыкии, Зауралья, Северного Прибайкалья и Забайкалья, с целью уточнения эффективности метода для оценки участков, перспективных на тип несогласия, эндогенный и гидрогенный типы урановых месторождений.

Несколько примеров комплексных опытно-методических исследований.

На рисунке 1 представлено сопоставление эффективности уранометрического, изотопно-свинцового ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$), эманационно-трекового (Rn) и изотопно-почвенного методов на участке месторождения гидротермально-метасоматического типа. Руды локализованы в кристаллическом фундаменте в зоне сочленения гранитного и гнейсового блоков и приурочено к крутопадающим телам альбититов, развитым вдоль катакластических структур. Фундамент перекрыт осадочным чехлом мощностью 100 - 110 м. В этих условиях уранометрический и изотопно-свинцовый методы оказались неинформативными: содержание U в почвах характеризуются устойчивыми фоновыми значениями, а распределение значений изотопного отношения $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ не имеет закономерной связи ни с оруденением, ни с разрывными нарушениями в фундаменте. Аномалии радона в почвах (ЭТМ) и аномалии МП (ИПМ) практически совпадают друг с другом, отражая особенности тектонического строения участка, в том числе и рудоконтролирующую зону. Совмещенный ореол аномалий МП и $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ проявлен только в надрудной части и по размерам (600 × 200 м) соответ-

вует проекции рудного тела на дневную поверхность. Идентичные результаты были получены и на других урановых объектах альбититового типа.

Масштабные комплексные исследования выполняются нами в Забайкалье на урановых объектах разного генетического типа.

На рисунке 2 представлены результаты комплексных исследований на участке месторождения Хиагдинское, расположенном в пределах Амалатского плато базальтов (Витимский район). Оруденение контролируется захороненными палеодолинами, выполненными туфогенно-осадочными отложениями на гранитоидном фундаменте. Туфы перекрыты неогеновыми базальтами мощностью от 15-20 м в верховьях палеодолины до 200 м в ее нижней части. Наличие многолетней мерзлоты и значительная мощность покровных базальтов создают большие трудности при поисках кайнозойских рудоносных палеодолин. Уранометрический и изотопно-свинцовый методы не дали положительных результатов. Методом ЭТМ выявлены аномальные зоны ^{222}Rn , имеющие пространственную связь преимущественно с выступами гранитоидного фундамента в краевых частях палеодолин, совпадая в отдельных случаях с положением рудного тела в плане. Изотопно-почвенным методом установлен протяженный аномальный ореол МП, совпадающий в плане с положением рудной части палеодолины. Наиболее интенсивная часть ореола (в 10 – 30 раз выше фоновых значений) проявлена в южной части, в узле сочленения кайнозойской палеодолины с крупной нижнемеловой депрессионной структурой северо-восточного простирания, где урановое оруденение получило максимальное развитие. Аномалии $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ проявлены лишь в пределах рудного контура, при максимальной интенсивности (до 4 фоновых значений) также в южной части.

На рисунке 3 показан пример использования ИПМ на месторождении Гранитное, расположенном в западной части Атасу-Моинтинского докембрийского поднятия. Урановое оруденение приурочено к приразломным палеогеновым русловым образованиям и локализовано как в пронцаемых песчанистых отложениях палеогена, так и в зонах трещиноватости пород палеозойского фундамента. Общая мощность перекрывающих образований составляет 70 м.

Результаты, полученные по опорному профилю, и анализ геологических данных позволяют нам сделать выводы о наличии трех типов аномалий на данной площади:

- Участки совпадающих аномалий МП и $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ при фоновых значениях ^{222}Rn и ^{226}Ra , и отдельных повышениях ^{238}U . Такие участки пространственно отвечают положению рудных тел в плане (восточная часть профиля).
- Контрастные аномалии МП (до 15–80 фоновых значений) при аномальных содержаниях ^{222}Rn , ^{226}Ra и ^{238}U , но при фоновых значениях $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ (западная часть профиля). Образование аномалий этого типа связано, вероятно, с обогащением почвенного горизонта радиоактивными элементами при их поступлении из грунтовых вод, содержащих U и его ДПР за счет разрушения эндогенных локальных скоплений, расположенных в близлежащем горном обрамлении. В этом случае накопление радионуклидов в почвах происходит за счет сорбционного и испарительного процессов, свойственных зонам аридного климата.
- Аномальные высокие значения МП сопровождаются фоновыми значениями $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$, ^{222}Rn и ^{226}Ra (крайняя западная часть профиля). Наиболее вероятно, этот тип аномалий связан с мощной тектонической зоной дробления и трещиноватости на контакте гранитоидов и сланцев. Отсутствие аномалий ЭТМ может быть объяснено затрудненным поступлением радона через экранирующие глинистые прослои.

В настоящее время нами апробируется вариант использования в комплексе изотопных методов подвижных форм изотопов U в почвах. В частности, над известными рудными телами рудопроявления Дулесминское (Витимский урановорудный район) установлены аномально высокие значения соотношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (от 2 до 4) в почвах надрудной зоны. Это связано с более высокой миграционной способностью ^{234}U и значительно меньшим периодом полураспада по сравнению с ^{238}U . Использование подвижных форм изотопов U усиливает «сигнал» от залегающего на глубине в десятки и первые сотни метров рудного тела до 6 раз.

Этот способ нами рассматривается как весьма перспективный и дополняющий ИПМ.

На рисунке 4 показаны основные урановорудные районы, в которых прошел апробацию метод ИПМ и его модификации.

Разработанный в ФГУП «ВИМС» комплекс радиоизотопных методов имеет принципиальное значение не только для выявления урановых руд, но и для минимизации и прогноза возможных радиозоологических последствий при ведении поисково-разведочных работ и эксплуатации месторождений.

На поисковых стадиях применение метода ИПМ для оценки выявленных геофизических, радиометрических, геохимических или радиогидрогеологических аномалий может существенно ограничить площадь для проведения горно-буровых работ. Например, на эталонном участке одного из месторождений эндогенного типа площадью 2 км² в результате комплексных опытно-методических исследований был установлен участок с аномальными содержаниями ²²²Rn (ЭТМ) площадью 0,65 км²; а методом ИПМ выявленная область совпадающих аномалий МП и ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb составляет лишь 0,20 км², при этом она пространственно совпадает с положением рудной залежи в плане. Таким образом, исходная перспективная площадь, выделенная под бурение разведочных скважин по комплексу геофизических критериев (положительные магнитные аномалии, пространственно совмещенные с минимумами гравитационного поля), сокращается примерно в 3 раза за счет применения эманационного-трекового метода, и в 10 раз - за счет данных, полученных ИПМ. Соответственно, в несколько раз сокращается отторжение плодородных земельных угодий под разведочное бурение, связанное с прокладкой временных дорог, нарушением почвенно-растительного горизонта, извлечением на поверхность керн горных пород с повышенной радиоактивностью, розливом бурового раствора.

На стадиях освоения урановых месторождений радиационный контроль геологической среды имеет еще более важное значение. Методы открытой и подземной добычи урана (карьеры, шахты) приводят к огромным объемам вскрышных работ, извлечением на поверхность забалансовых руд и пустых пород (отвалов), образованию суффозионных и депрессионных воронок, нарушению естественного гидродинамического режима подземных вод.

В результате резко возрастает выделение ²²²Rn в атмосферу с последующим оседанием его продуктов распада (в том числе ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po) на земную поверхность, повышается радиоактивность поверхностных вод при сбросах рудничных и дренажных вод в местную гидрографическую сеть, в том числе и за счет ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po. Разработка месторождений в большинстве случаев резко меняет геохимическую обстановку на дренированных или дренируемых участках, поэтому насыщенность подземных вод радионуклидами зачастую становится выше, чем в первичных потоках рассеяния. Размыв атмосферными осадками и эрозия поверхностных отвалов приводит к образованию радиоактивных ореолов в почвах, особенно в направлениях преимущественного стока поверхностных вод.

Нами выполнены комплексные радиоизотопные исследования почвенного покрова (интервал отбора 0 – 5 см) на разном удалении от многолетних отвалов двух эксплуатируемых шахтным способом месторождений. Анализ полученных результатов (таблица 1) приводит к следующим выводам:

- многолетние отвалы раздробленных горных пород и забалансовых руд являются источником образования протяженных (до 600 метров) техногенных ореолов повышенных концентраций (до 30-кратного превышения фона) естественных радионуклидов с нарушенным радиоактивным равновесием;
- механизм образования подобных ореолов состоит в выщелачивании радионуклидов атмосферными и тальными водами из массы отвала, переносе их в подчиненные формы рельефа с переотложением и накоплением их в верхнем гумусовом горизонте почв, а также в результате повышенного выделения и ветрового переноса ²²²Rn из дробленных горных пород, сопровождаемых постепенным накоплением продуктов его распада (²¹⁰Pb и ²¹⁰Po) на поверхности почв;
- миграционная способность наиболее опасного радионуклида ²¹⁰Po сопоставима с миграцией урана, и даже превосходит ее ($^{210}\text{Po}/^{238}\text{U} \geq 1$);
- учитывая высокую восприимчивость растений к ²¹⁰Po и его доступные формы нахождения, следует ожидать существенного повышения радиоактивности растительной массы на участках ореолов;
- преимущественная миграция радионуклидов в пониженные участки рельефа создает высокую вероятность их поступления в грунтовые и поверхностные воды, с увеличением их радиоактивности.

Приведенная ситуация является как раз иллюстрацией реальной опасности для населения, так как в речной долине расположены садово-огородные участки местных жителей и сотрудников специализированного геологоразведочного предприятия.

В последние десятилетия получил широкое развитие метод добычи урана подземным выщелачиванием (ПВ) сернокислотными или карбонатными растворами с окислителями. Однако с ростом масштабов добычи методом ПВ особое значение приобретает контроль загрязнения поверхности земли и особенно подземных вод. Особые проблемы могут возникнуть при освоении месторождений в населенных районах, где источником питьевого водоснабжения являются подземные воды.

Технологии выщелачивания часто сопровождаются искусственным повышением проницаемости продуктивных толщ за счет гидроразрыва, использования жидких ВВ. В процессе выщелачивания происходит в той или иной степени растворение радиоактивных минералов, с преимущественным извлечением на поверхность урансодержащих растворов. При этом большая часть высокотоксичных продуктов распада урана (^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po) высвобождается из минеральной матрицы и может мигрировать на значительные расстояния с подземными водами.

Например, в Шу-Сарысуйской урановорудной провинции пластово-инфильтрационного типа (Южный Казахстан) подземные артезианские воды содержат весьма высокие концентрации ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po на значительных площадях. Так, активность ^{210}Pb в подземных водах достигает 1,7 Бк/дм³ (при максимально допустимой 0,2 Бк/дм³).

Кроме того, в случаях самоизлива из оставшихся бесхозными скважин образуются участки площадью до нескольких гектар с интенсивно загрязненной почвой. Например, на месторождении Канжуган той же провинции самоизлив только из одной артезианских скважин загрязнил почвы на участке 100×50 метров, при уровне γ -активности на поверхности до 1000 и более мкР/час.

Еще одним мощным источником загрязнения окружающей среды являются хвостохранилища ГМЗ (участки долговременного складирования и хранения отходов гидрометаллургической переработки руд). Загрязнение происходит за счет интенсивного выделения радона в атмосферу, пылеобразования и ветрового разноса радионуклидов, фильтрации радиоактивных растворов через ослабленные участки ложа хвостохранилищ в грунтовые и подземные воды.

Следует отметить, что масштабное загрязнение природных сред естественными радионуклидами, особенно $^{226,228}\text{Ra}$, ^{210}Pb , ^{210}Po , $^{230,232,228}\text{Th}$, происходит не только на предприятиях уранодобывающего комплекса, но и при добыче и переработке редкометалльных руд, эксплуатации месторождений каменных углей, горючих сланцев, торфа, фосфатов, нефти и газа, сжигании органического топлива.

Таки образом, в условиях активизации поисково-разведочных и увеличения объемов его добычи особую актуальность приобретают методы минимизации и прогноза радиоэкологических последствий.

Разработанные нами основы использования радиоизотопных методов в геологоразведочной практике и аппаратно-методический комплекс для анализа этих радионуклидов в природных объектах (рисунок 5) уже используются для решения задач радиоэкологической оценки геологической среды на разных стадиях уранодобывающей и перерабатывающей деятельности. В частности, методы контроля уровней активности ЕРН в почвах и подземных водах, разработанные в ФГУП «ВИМС», внедрены в АО «Волковгеология» и используются при эксплуатации месторождений методом ПВ, а также при оценке радиоэкологических последствий при освоении месторождений урана в Казахстане, Киргизстане, Таджикистане и Узбекистане; на АО «ЧМЗ» (г. Глазов, Удмуртия) и на АО «МСЗ» (г. Электросталь, Московская область) для контроля сточных технологических вод, грунтовых вод режимных и наблюдательных скважин и осветленных вод хвостохранилищ.

Литература

1. Бахур А.Е. Научно-методические основы радиоэкологической оценки геологической среды: Диссертация на соискание ученой степени доктора геол.-мин. наук / - М., ФГУП «ВИМС», 2008. - 297 с.
2. Бахур А.Е., Малышев В.И., Мануилова Л.И. Результаты опытно-методических работ изотопно-почвенным методом на участке месторождения Карку / Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов // Информационный сборник КНТС № 146. – М.: ВИМС, 2004.
3. Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. Po-210 и Pb-210 в объектах окружающей среды. Методы определения. // АНРИ. – 2009. – № 1 (56).

4. Бахур А.Е., Малышев В.И., Салмин Ю.П., Машковцев Г.А. Изотопия радиоактивных элементов при поисках месторождений урана // *Российский геофизический журнал*. – 1999. – № 15-16.
5. Иванова Т.М., Бахур А.Е., Мануилова Л.И. и др. Радиобиогеохимические методы поисков урана: перспективы развития // *Разведка и охрана недр*. – 2007. – № 6.
6. Малышев В.И., Соколова З.А., Бахур А.Е. и др. Способ поисков месторождений / Авторское Свидетельство СССР № 215783 с приоритетом от 23.04.84 г. – 1984.
7. Малышев В.И., Соколова З.А., Салмин Ю.П. и др. Способ оценки радиогидрогеологических аномалий / Авторское Свидетельство СССР № 182502 с приоритетом от 06.10.81 г. – 1982
8. Малышев В.И. Возможности использования изотопов радиоактивных элементов при решении геологических вопросов / *Распределение радиоактивных элементов и их изотопов в земной коре*. – М.: Недра, 1978. – С. 78-83
9. Малышев В.И. Радиоактивные и радиогенные изотопы при поисках месторождений урана. – М.: Энергоиздат, 1981. – 158 с