

Перемещение радия и плутония в окружающей среде

Брайс Смит

Очень важной задачей является понимание подвижности радия и плутония в окружающей среде, в особенности их перемещение в почве и подземных водах. Радий – это один из основных загрязняющих радионуклидов, который связан с добычей и измельчением урановой руды и который поражает огромное количество различных урановых месторождений. Радием также поражены тысячи нефтяных месторождений среднего размера, и их радиевое загрязнение уже стало общим местом. Плутоний – один из наиболее долгоживущих и опаснейших радионуклидов в процессе производства ядерного оружия. Отходы с содержанием плутония сбрасываются в необорудованные надлежащим образом хранилища, расположенные в нескольких местах на территории США, критически близко от основных водных источников.

Подвижность радия и плутония серьезно варьируется в зависимости от обстоятельств. Расчеты дозы радиоактивного облучения для будущих поколений во многом зависят от предположений о том, каким образом радиоактивное загрязнение почвы в действительности воздействует на подземные воды. Институт по вопросам энергетики и окружающей среды (далее IEER) решил провести анализ перемещения радия и плутония в окружающей среде в связи с научной сложностью данного вопроса, а также необходимостью в повсеместной очистке от этих двух радионуклидов, накопленных повсюду после нескольких десятилетий переработки урана и плутония. Эта статья резюмирует проведенный анализ.¹

Арджун Макхиджани

Учитывая сочетание химических, биологических и физических свойств почвы, очень сложно предсказать подвижность радионуклидов. Существует ряд примеров, когда, используя модели, которые вызвали доверие у Комиссии по атомной энергии и у министерства энергетики США, невозможно было точно спрогнозировать перемещение загрязняющих веществ. После того, как было обнаружено, что радионуклиды способны распространяться в окружающей среде дальше и намного быстрее, эти модели пришлось в корне изменить. Эти недостатки во многом стали результатом неправильной характеристики природных систем.

В настоящих системах могут существовать различные химические или биологические процессы, воздействующие на подвижность загрязняющих веществ, которые способны меняться в пространстве и с течением времени. Траекторий движения радионуклидов также может быть больше, чем принято считать. Наконец, сама модель перемещения может быть достоверной, однако информация о том, какие параметры стоит использовать, может быть недоступна.

Эта статья предлагает краткий анализ перемещения двух особых радионуклидов – радия и плутония. Радий – это природный радионуклид, который составляет радиоактивный ряд урана и тория ([см. цепочку распада урана](#)). В организме радий является аналогом кальция и сразу же направляется в кости. Плутоний – это искусственный радионуклид, который получают в ядерных реакторах. В организме плутоний также в основном поступает в кости.

Целый ряд специфических особенностей изучаемого места может как увеличить, так и замедлить подвижность радия и плутония. В результате, необходимо

¹ Брайс Смит (Brice Smith) и Александра Амонетте (Alexandra Amonette) «The Environmental Transport of Radium and Plutonium: A Review» («Перемещение радия и плутония в окружающей среде: анализ»), Такома Парк, Мэриленд, Институт по вопросам энергетики и окружающей среды (IEER), от 23 июня 2006 г., размещено на сайте: www.ieer.org/reports/envtransport/.

провести детальные и специфические анализы изучаемой территории. Оценки технических характеристик, которые основаны на упрощенных моделях или ложных ценностях, не должны восприниматься, как оценки, отвечающие нормам закона. Разработчики моделей перемещения должны учиться на неожиданных примерах прошлого. Это особенно касается радия, плутония и многих других трансурановых элементов (это элементы, атомное число которых превышает число урана), учитывая долгий период полураспада многих радионуклидов и их материнских радионуклидов.

Метод Kd

Многие загрязняющие вещества, в том числе радий и плутоний, могут задерживаться на почве с помощью ионообмена. Интенсивность этого взаимодействия можно измерить с помощью коэффициента распределения (или Kd). Коэффициент распределения определяет соотношение концентрации загрязняющего вещества, адсорбированного на почве и концентрации загрязняющего вещества, растворенного в воде после того, как система достигла равновесия.

$$Kd = \frac{\text{концентрация загрязняющего вещества в почве (пКи/кг)}}{\text{концентрация загрязняющего вещества в воде (пКи/л)}}$$

Таким образом, коэффициент распределения выражен в несколько необычных единицах литров на один килограмм (л/кг) или равен миллилитрам на один грамм (мл/г). Большое значение коэффициента распределения означает, что загрязняющее вещество тесно связано с почвой и поэтому его миграция будет медленной. Небольшое значение подразумевает обратное. За свою относительную простоту константа распределения Kd является на сегодняшний день наиболее распространенной моделью для оценки перемещения загрязняющих веществ. Метод называют константой Kd, поскольку в модели предполагается, что изучаемое место целиком можно охарактеризовать с помощью одного значения Kd, которое со временем остается неизменным.

Оговорки в модели константы Kd

Несмотря на широкое применение, в методе константы Kd существует ряд серьезных оговорок. Наиболее важным ограничением является то, что значение Kd строго зависит от местных физико-химических условий и, таким образом, может сильно варьироваться не только на разных территориях, но даже в пределах одной. Например, значения Kd по плутонию, измеренные в комплексе «Хэнфорд», варьируются более чем в 1000 раз.

Это различие происходит потому, что адсорбция таких загрязняющих веществ, как радий и плутоний, меняется в зависимости от различных факторов. К этим факторам относятся: жизнедеятельность растений и бактерий; состояние окисления радионуклидов, которое со временем может меняться (особенно это касается плутония, который может существовать в четырех различных состояниях); объем глинозема, песка и органических веществ в почве. В особенности, адсорбция загрязняющих веществ снижается при повышении кислотности почвы, а также при повышении в почвенной системе концентрации ионов с одинаковым химическим составом.

Даже Управление по защите окружающей среды США (EPA) откровенно признает, что неверное определение K_d или использование его типовых значений могут привести к «серьезной ошибке в прогнозировании миграции загрязняющих веществ».²

Дополнительной оговоркой является тот факт, что существует пять различных способов измерения K_d . Как отмечает EPA, «это не только известный, но и вполне предсказуемый факт, что значения K_d , измеренные с помощью разных методов, дадут различные величины».³ Что касается радия, здесь возникают дополнительные неопределенности, когда в ходе измерения присутствуют другие щелочноземельные металлы, поскольку совместное осаждение может привести к ошибочно большим расчетам K_d .

Разрабатываются более сложные модели, которые способны преодолевать некоторые ограничения константы K_d . Эти модели более эффективно охарактеризовали миграцию загрязняющих веществ, в том числе свинцовые и сульфатные загрязнения на урановых рудниках. Проблема этих более современных моделей заключается в том, что они требуют больше информации по изучаемой территории.

Другие пути перемещения

В некоторых случаях, важную роль могут сыграть другие пути перемещения радионуклидов и различные явления природы. Бактерии, которые снижают уровни сульфатов, могут вызвать растворение осадков радия, и тем самым увеличить их подвижность. При этом обнаружено воздействие бактерий типа *Bacillus subtilis* на подвижность плутония. К тому же, животные перемешивают почву, что может увеличить приповерхностную миграцию загрязняющих веществ. Наконец, сходство радия с кальцием способно привести к его бионакоплению, поскольку радий перемещается вверх по пищевой цепи.

Одним из серьезных процессов, способных повлиять на перемещение плутония и других трансурановых элементов, является адсорбция на коллоидных частицах. Коллоидные частицы – это небольшие природные частицы, которые легко откладываются в грунтовых и поверхностных водах. Потенциальная возможность коллоидного перемещения воздействовать на подвижность загрязняющих веществ, например, плутония, была известна более 50 лет назад, однако интерес к этому природному явлению возрос в конце 90-х годов после открытия быстрого коллоидного перемещения плутония на испытательном полигоне Невада. Воздействие коллоидного перемещения сильно зависит от особенностей изучаемой территории. Существуют различные доказательства, которые подтверждают, и в то же время ставят под

² «Понимание разницы коэффициента распределения K_d и значений. Том. Модель измерения K_d и применение кодов химической реакции» (“*Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d , Values: Volume 1: The K_d Model of Measurement, and Application of Chemical Reaction Codes*”). Управление по вопросам радиации и воздуха в закрытых помещениях (Office of Radiation and Indoor Air), Управление по твердым отходам и чрезвычайным ситуациям (Office of Solid Waste and Emergency Response), Управление по защите окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency) [и] Управление по оздоровлению окружающей среды (Office of Environmental Restoration), Министерство энергетики США (U.S. Department of Energy), Вашингтон, округ Колумбия, август 1999 г. (EPA402-R-99-004A), стр. 1.1.

³ там же, стр. 3.1.

сомнение, значимость опосредованного коллоидного перемещения на различных ядерных комплексах МЭ.

К тому же, плутоний, который удерживается на осадочной породе, может быть приведен в движение суспензией. Более того, загрязняющее вещество, связанное с поверхностью почвы, может прийти в движение посредством эрозии почвы. Известно, что особенную роль в Национальной лаборатории Лос-Аламоса играет перемещение плутония в поверхностных водах и посредством эрозии почв. Важность этого пути возросла после пожара в мае 2000 года на Серо Гранде (Cerro Grande), который охватил примерно 43 000 акров земли на территории лаборатории и прилегающей зоны. Потеря зеленых насаждений привела к повышению эрозии почвы, в особенности во время наводнения, которое случается при штормах.

Наконец, на территориях, зараженных трансурановыми элементами, необходимо принимать во внимание распад и накопление элементов, у которых может быть совершенно другая подвижность или периоды полураспада по сравнению с их родительскими элементами.

Выводы и рекомендации

Одна из важнейших рекомендаций, которую предоставило Управление по защите окружающей среды в 2004 году в своем анализе подвижности радия, заключалась в том, что «для расчетов с учетом особенностей изучаемого места, совершенно необходимо измерять значения коэффициента распространения с учетом особых условий исследуемой территории»⁴ (подчеркнуто в оригинале). Подобные выводы справедливы и для плутония. Оценки, которые основаны на ошибочных значениях коэффициента распределения, не должны приниматься во внимание для регулятивных целей. Необходимо как минимум постараться определить обоснованное значение K_d с учетом специфики исследуемого места.

Несмотря на то что во многих случаях можно определить подходящее значение K_d , особое внимание необходимо уделять использованию более сложных моделей перемещения в свете общеизвестных ограничений метода K_d , особенно на территориях, где хранятся высокорadioактивные и химически активные отходы. В тех случаях, где потенциально важными факторами являются перемещение загрязняющих веществ посредством эрозии почв и в поверхностных водах, либо опосредованное коллоидное перемещение, необходимо применить такую модель, которая могла бы учитывать эти пути перемещения, в особенности учитывая относительно быструю миграцию плутония, которая уже наблюдалась в некоторых местах.

⁴ «Понимание разницы коэффициента распределения K_d , его значений. Том 3. Анализ геохимии и доступных значений K_d для америция, мышьяка, кюрия, йода, нептуния, радия и технеция. («*Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d , Values. Volume III: Review of Geochemistry and Available K_d Values for Americium, Arsenic, Curium, Iodine, Neptunium, Radium, and Technetium*»). Office of Air and Radiation, июль 2004 г. (EPA402-R-04-002C), стр. 5.67.