

УДК 622.411.33

Н.М. Качурин, А.А. Поздеев, Н.И. Абрамкин, Г.В. Стась
РАДОН В АТМОСФЕРЕ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Приведены результаты теоретического анализа геологической информации по распределению урана в горных породах на территории Подмосковского бурогоугольного бассейна. Показано, что основными источниками поступления радона на очистные участки угольных шахт являются надработанные ураносодержащие горные породы, разрабатываемые угольные пласты и подземные воды. Дано теоретическое обоснование математических моделей для прогноза выделения радона атмосфере угольных шахт. Разработан алгоритм прогноза выделений радона на очистных участках. Представлены результаты прогноза выделений радона для условий шахт Подмосковского бассейна, которые не противоречат известным эмпирическим данным.

Ключевые слова: радон, уран, горные породы, угольный пласт, подземные воды, шахта, математическая модель, прогноз.

Источники выделений радона в атмосферу угольных шахт. Изучение радоновой опасности на территории Подмосковского угольного бассейна показали, что Центральный регион России принадлежит к регионам с напряженной экологической обстановкой. В этой связи важно рассмотреть закономерности пространственного распределения радионуклидов, что позволит дать геохимическую оценку имеющихся территорий с тревожной радиоэкологической обстановкой и наметить пути вероятной миграции и концентрации радиокомпонентов. На территории Подмосковского бурогоугольного бассейна известны скопления урана, радия и радона [1]. Следует подчеркнуть две общие особенности распределения радионуклидов, выявленные на территории Тульской области: скрытый характер не выходящих на дневную поверхность урановых аномалий; присутствие аномалий радона в почвах и подземных водах, в том числе источников водоснабжения.

Все рудопроявления и аномальные концентрации урана в Тульской области относятся к одному урано-угольному формационному типу. Такого рода скопления широко распространены в природе. Их образования связаны с геохимическими особенностями поведения урана в зоне гипергенеза, где уран хорошо мигрирует в водной среде в шестивалентной форме. Поэтому в большинстве случаев в зоне активного водообмена преобладают условия рассеивания урана природными водами. Однако существуют обстановки, где действуют геохимические барьеры, на которых уран осаждается.

В гипергенных условиях по степени распространенности намечается следующий ряд геохимических барьеров урана: восстановительный; сероводородный, от биогенного или абиогенного сероводорода; восстановительный; резко глеевый, за счет водорода, главным образом продуцируемого бактериями; сорбционный; термодинамический, включающий барьер нейтрализации ураноносных щелочных или кислых вод растворами, содержащими соединения ванадия, фосфора, молибдена и мышьяка без изменения их валентности, с которы-

ми уран в форме уранила дает твердые фазы; эвапорационный, когда уран выпадает из перенасыщенных растворов; механический, образующийся за счет образования россыпей ураносодержащих минералов. Очень часто несколько геохимических барьеров действуют одновременно, что может обусловить заметные концентрации урана.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что радиозэкологическая обстановка Центрального региона Российской Федерации существенным образом зависит от наличия в недрах естественных радионуклидов, которые сами по себе создают повышенный радиоактивный фон и оказывают прямое воздействие на людей, связанных по роду своей профессиональной деятельности с добычей угля. Урановое оруднение в условиях, характерных для Подмосковского бассейна, обычно сопровождается повышенным скоплением радона. Закономерности пространственного распределения урана и радона в пределах Тульской области показывают, что в целом в угольных шахтах других угольных бассейнов будет присутствовать радон. При этом основными видами миграции радона являются вертикальная миграция в надроботанных породах, диффузия в угольных пластах и подземных водах.

Математическая модель миграции радона в надроботанном горном массиве. Процесс вертикальной диффузии радона в надроботанных породах описывается следующим уравнением [2]:

$$D_{Rn} \frac{d^2 A_{Rn}^{BII}}{dz^2} - \lambda_{Rn} A_{Rn}^{BII} = 0, \quad (1)$$

где A_{Rn}^{BII} - удельная активность по радону газовой смеси, находящейся во вмещающих породах; D_{Rn} - коэффициент эффективной диффузии радона; λ_{Rn} - эффективная константа скорости процессов сорбции и радиоактивного распада радона; z - вертикальная координата.

Граничные условия имеют вид: $-D_{Rn} dA_{Rn}^{BII} / dz |_{z=0} = J_{Rn}^{BII} = const$, $\lim_{z \rightarrow \infty} A_{Rn} \neq \infty$, где J_{Rn}^{BII} - интенсивность образования радона в подрабатываемом урановом месторождении. Решение уравнения (1) для данных условий можно записать следующим образом: $A_{Rn}^{BII}(z) = 0,5 J_{Rn}^{BII} (D_{Rn} \lambda_{Rn})^{-0,5} \exp[-z(\lambda_{Rn} D_{Rn}^{-1})^{0,5}]$. Дифференцируя эту зависимость в точке $z = h$, где h - расстояние от урановой залежи до почвы рассматриваемой выработки, найдем абсолютное радоновыделение из подрабатываемого уранового месторождения (I_{Rn}^{BII}):

$$I_{Rn}^{BII} = J_{Rn}^{BII} \exp\left(-h \sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D_{Rn}}}\right). \quad (2)$$

Графики зависимости отношения величин $I_{Rn}^{BII} / J_{Rn}^{BII}$ от расстояния h для различных значений $\sqrt{\lambda_{Rn} / D_{Rn}}$ представлены на рис. 1. Анализируя профили диффузионного потока радона во вмещающих породах, следует отметить высокий темп снижения скорости миграции радона при уменьшении величины коэффициента эффективной диффузии. Разумеется, что такие результаты вычислений совпадают с данными натуральных наблюдений по другим газам, напри-

мер по метану, поступающему из подрабатываемых угольных пластов. Такое косвенное подтверждение адекватности разработанной математической модели можно считать в данном случае приемлемым, так как в настоящее время нет необходимой эмпирической базы данных. При этом результаты вычислений показывают, что абсолютная радонообильность будет пропорциональна величине интенсивности образования радона в подрабатываемом урановом месторождении.

Выделение радона с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта.

Выделения радона с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта можно описать следующим уравнением [3]:

$$D_{Rn} \frac{d^2 A_{Rn}^{VII}}{dx^2} - \lambda_{Rn} A_{Rn}^{VII} + J_{Rn}^{VII} = 0, \quad (3)$$

где A_{Rn}^{VII} - удельная активность по радону газовой смеси в разрабатываемом угольном пласте; J_{Rn}^{VII} - интенсивность образования радона в разрабатываемом угольном пласте.

Граничные условия для поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта имеют вид: $A_{Rn}^{VII} \Big|_{x=0} = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} A_{Rn}^{VII} \neq \infty$. Решение уравнения (3) для этих

условий получено в следующем виде: $A_{Rn}^{VII}(x) = J_{Rn}^{VII} \lambda_{Rn}^{-1} \left\{ 1 - \exp \left[-x (\lambda_{Rn} D_{Rn}^{-1})^{0.5} \right] \right\}$.

Дифференцируя $A_{Rn}^{VII}(x)$ в точке $x = 0$ найдем абсолютное радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта (I_{Rn}^{VII}):

$$I_{Rn}^{VII} = J_{Rn}^{VII} \sqrt{\frac{D_{Rn}}{\lambda_{Rn}}}. \quad (4)$$

Графики зависимости величины $\mathbf{A}^{VII}(x) = A_{Rn}^{VII}(x) \lambda_{Rn} / J_{Rn}^{VII}$ от координаты x для различных значений $\sqrt{\lambda_{Rn} / D_{Rn}}$ представлены на рис. 2. Анализ горизонтального распределения удельной активности радона в плоскости разрабатываемого угольного пласта показывает, что по мере удаления от поверхности обнажения удельной активности радона стабилизируется.

Графики зависимости $\mathbf{A}^{VII} = \mathbf{A}^{VII}(x)$ наглядно свидетельствуют о наличии асимптоты при $x \rightarrow \infty$, т.е. $\lim_{x \rightarrow \infty} \mathbf{A}^{VII} = \mathbf{A}_{\infty}^{VII} = 1$. Следует отметить высокий темп снижения скорости миграции радона при уменьшении величины коэффициента эффективной диффузии. Радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта зависит от диффузионных свойств вещества угля, скорости радиоактивного распада, константы скорости сорбции радона углем и интенсивности образования радона в разрабатываемом угольном пласте. В свою очередь интенсивность образования радона в угольном пласте зависит от концентрации рассеянного урана.

Выделение радона в горные выработки из подземных вод. В подземных водах, поступающих в горные выработки или удаляемых из водоносных

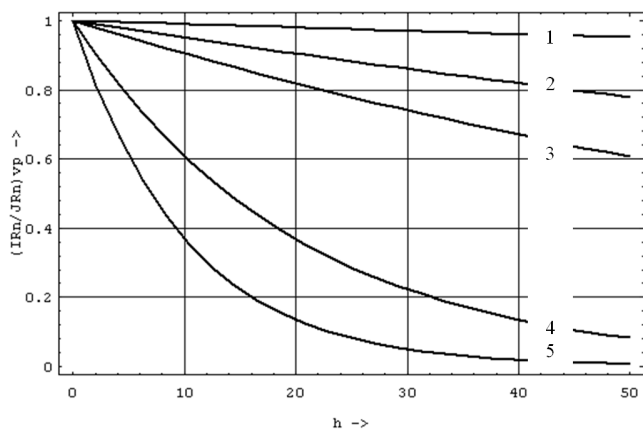


Рис. 1. Графики зависимости отношения величин $I_{Rn}^{BП} / J_{Rn}^{BП}$ от расстояния h , м. Значения $\sqrt{\lambda_{Rn} / D_{Rn}}$ соответственно равны: 1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,01; 4 – 0,05; 5 – 0,1

$$\frac{dA_{Rn}^{ПВ}}{dx} = -\frac{\lambda_{Rn} + K_{ОБ}}{u} A_{Rn}^{ПВ}, \quad (5)$$

где $A_{Rn}^{ПВ}$ – удельная активность подземных вод по радону; $K_{ОБ}$ – коэффициент поверхностной газоотдачи по радону.

Разделяя переменные в уравнении (5) и интегрируя это уравнение, получим, что $A_{Rn}^{ПВ}|_{КОН} = A_{Rn}^{ПВ}|_{НАЧ} \exp[-(\lambda_{Rn} + K_{ОБ})Lu^{-1}]$, где $A_{Rn}^{ПВ}|_{НАЧ}$, $A_{Rn}^{ПВ}|_{КОН}$ – соответственно начальное и конечное значения удельной активности подземных вод по радону в точка $x = 0$ и $x = L$. Тогда абсолютное радоновыделение из подземных вод ($I_{Rn}^{ПВ}$) можно определить, используя следующую формулу:

$$I_{Rn}^{ПВ} = A_{Rn}^{ПВ}|_{КОН} Q_{ПВ} \{1 - \exp[-(\lambda_{Rn} + K_{ОБ})Lu^{-1}]\}. \quad (6)$$

где $Q_{ПВ}$ – приток подземных вод на рассматриваемом технологическом объекте.

Графики зависимости величины $I^{ПВ}(L) = I_{Rn}^{ПВ} / (A_{Rn}^{ПВ}|_{НАЧ} Q_{ПВ})$ от длины дренажного канала L для различных значений $\alpha = (\lambda_{Rn} + K_{ОБ})u^{-1}$ представлены на рис. 3. Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что при достаточно больших значениях L величина $I^{ПВ}(L \rightarrow \infty)$ стремится к единице. Радоновыделение из подземных вод зависит от скорости радиоактивного распада, скорости десорбции радона из воды и средней скорости течения воды в дренажном канале.

Прогноз выделений радона на очистных участках угольных шахт.

Прогноз абсолютной радонообильности очистных участков осуществляется в соответствии установленными закономерностями динамики миграции радона в угольных пластах, вмещающих породах и подземных водах.

горизонтов через систему водопонижающих скважин, всегда в тех или иных количествах присутствует радон.

Радоновыделение из подземных вод проявляется как дегазация подземных вод текущих по дренажным каналам шахты. Целесообразно рассмотреть одномерную стационарную миграцию радона в горные выработки с поверхности водного потока. Выделения радона с поверхности подземных вод можно описать следующим уравнением [4]:

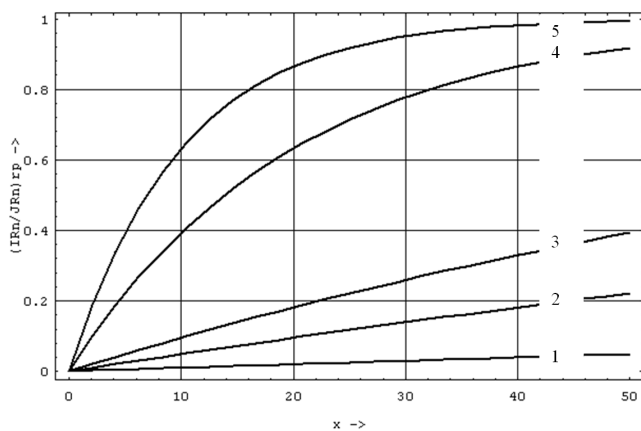


Рис. 2. а - Пример и результаты использования программы RnRP для вычислительных экспериментов; **б** - Графики зависимости отношения величин $A^{ВП}$ от расстояния x , м. Значения $\sqrt{\lambda_{Rn}/D_{Rn}}$ соответственно равны: 1 - 0,001; 2 - 0,005; 3 - 0,01; 4 - 0,05; 5 - 0,1

риваемой выработки; L - длина дренажного канала; $Q_{ПВ}$ - приток подземных вод на рассматриваемом технологическом объекте; $A_{Rn}^{ПВ}|_{КОП}$ - конечное значение удельной активности подземных вод по радону в точке $x=L$; $K_{ОБ}$ - коэффициент поверхностной газоотдачи по радону; u - средняя скорость движения воды в дренажном канале.

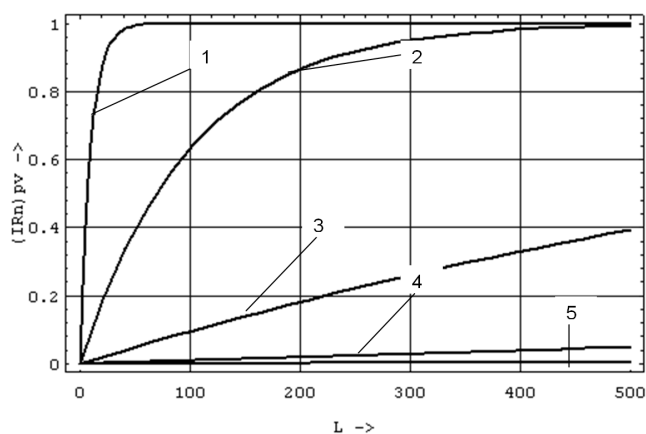


Рис. 3. Графики зависимости величины $I_{Rn}^{ПВ}(L) = I_{Rn}^{УП} / (A_{Rn}^{ПВ}|_{НАЧ} Q_{ПВ})$ от длины дренажного канала L , м. Значения α , 1/м: 1 - 10^{-1} ; 2 - 10^{-2} ; 3 - 10^{-3} ; 4 - 10^{-4} ; 5 - 10^{-5}

Алгоритм прогноза абсолютной радонообильности очистных участков заключается в следующем.

1. Формируется информационный блок исходных данных, включающий следующие параметры: $J_{Rn}^{ВП}$ - интенсивность образования радона в подрабатываемом урановом месторождении; λ_{Rn} - эффективная константа скорости процессов сорбции и радиоактивного распада радона; D_{Rn} - коэффициент эффективной диффузии радона; h - расстояние от урановой залежи до почвы рассматриваемой выработки; L - длина дренажного канала; $Q_{ПВ}$ - приток подземных вод на рассматриваемом технологическом объекте; $A_{Rn}^{ПВ}|_{КОП}$ - конечное значение удельной активности подземных вод по радону в точке $x=L$; $K_{ОБ}$ - коэффициент поверхностной газоотдачи по радону; u - средняя скорость движения воды в дренажном канале.

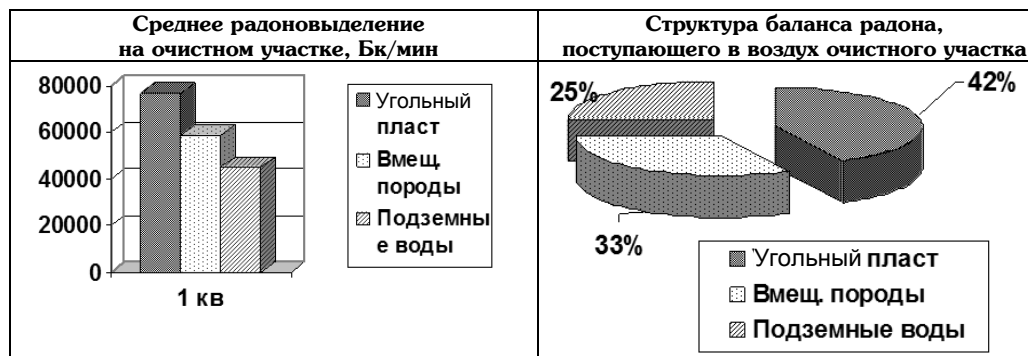
2. Рассчитывается радоновыделение из подрабатываемого уранового месторождения ($I_{Rn}^{ВП}$).

3. Рассчитывается радоновыделение из разрабатываемого угольного пласта ($I_{Rn}^{УП}$).

4. Рассчитывается радоновыделение из подземных вод ($I_{Rn}^{ПВ}$).

В таблице представлены средние значения прогнозного радоновыделения на очистном участке и структура баланса радона для средних значений параметров математических моделей миграции радона.

Баланс выделений радона на очистном участке



Результаты вычислительного эксперимента не противоречат известным эмпирическим данным.

Таким образом, в результате экспериментальных и теоретических исследований были уточнены закономерности влияния физико-химических и геологических факторов на миграцию радона в угольных пластах, вмещающих породах и подземных угольных месторождений.

В дальнейшем моделирование конвективно-диффузионного переноса радона рудничным воздухом в подземных горных выработках, позволит усовершенствовать методику расчета количества, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков, что существенно повышает уровень безопасности подземных горных работ по аэрологическому фактору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурина О.Н., Беляева В.Е. Источники выделений радона / Известия Тульского государственного университета. Серия – «Экология и безопасность жизнедеятельности» // Тула. - ТулГУ. - Вып. 7. - 2004. - С.176 –181.
2. Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурина О.Н. Математическая модель миграции радона в наработанных породах / Известия Тульского государственного университета. Серия – «Экология и безопасность жизнедеятельности» // Тула. - ТулГУ. - Вып. 7. - 2004. - С.184-187.
3. Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурина О.Н. Математическая модель выделения радона с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта / Известия Тульского государственного университета. Серия – «Экология и безопасность жизнедеятельности» // Тула. - ТулГУ. - Вып. 7. - 2004. - С.187-190.
4. Качурин Н.М., Стась Г.В., Качурина О.Н. Математическая модель выделения радона из подземных вод / Известия Тульского государственного университета. Серия – «Экология и безопасность жизнедеятельности» // Тула. - ТулГУ. - Вып. 7. - 2004. - С.190-192. **ПАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Качурин Николай Михайлович – профессор, доктор технических наук, Тульский государственный университет, ecology@tsu.tula.ru.

Поздеев Александр Александрович – Генеральный директор ЗАО «Управляющая компания Западно – Уральского Машиностроительного концерна» («УК ЗУМК»). (3422)12-0914.

Абрамкин Николай Иванович – профессор, доктор технических наук, Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru

Стась Галина Викторовна — кандидат технических наук, доцент, Тульский государственный университет, galina_stas@mail.ru.