

# Определение коэффициента диффузии и скорости адвекции радона в условиях мгновенного источника при диффузионно-адвективном переносе в горных породах

Выполнены экспериментальные определения диффузионных параметров верхней части геологического разреза, представленного глинистой корой выветривания, методом точечного мгновенного источника в диффузионном режиме и линейного мгновенного источника в диффузионно-адвективном режиме. Результаты, полученные указанными методами, показали достаточно хорошее совпадение полученных диффузионных характеристик среды. Время определения диффузионных характеристик среды значительно, более чем на порядок, сокращается при применении адвективного метода. Это является предпосылкой для широкого использования методов определения радоноопасности на основе измерений вертикального распределения объемной активности радона в верхней части геологического разреза.

**Ключевые слова:** диффузия, адвекция, радон, радоноопасность, мгновенный источник.

**А.К.Юрков, С.В.Бирюлин,  
И.А.Козлова**

(Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург)

**И**нтерес к исследованию радона растет вместе с появлением новых областей его использования. Первые исследования радона связаны с его применением в качестве поискового признака при разведке месторождений радиоактивного сырья. В это время были сделаны основные расчеты поведения поля радона в естественных условиях, разработаны методики и аппаратура для его измерения. Следующий этап в исследованиях радона связан с его использованием в качестве индикатора проницаемых зон, выходящих на поверхность. 80–90 годы двадцатого столетия характеризуются бурным развитием экологических исследований, включая радоновую опасность. В 90 годы, благодаря работам Ю.П. Булашевича, С. Барабась, В.И. Уткина, возник интерес к радону как индикатору

тору напряженного состояния горных пород при подготовке горных ударов и землетрясений. И, наконец, введение норм по плотности потока радона инициировало исследования в этом направлении. Существующие методики измерения плотности потока радона можно разделить на 2 группы: первая – непосредственно измеряется радон, выходящий с поверхности почв в атмосферный воздух, вторая группа – использует вертикальное распределение радона в верхнем слое грунта. Методики, относящиеся к первой группе, к сожалению, в силу различных причин, обладают значительной погрешностью. При использовании второй группы методов появляются трудности, основная из которых связана с необходимостью определения коэффициента диффузии. Дополнительно при использовании градиентных методов возникают проблемы с организацией измерений на необходимых глубинах. Указанные недостатки частично были преодолены в разработанном в Институте геофизики методе «экрана». Но его применение ограничено, несмотря на одновременное определение плотности потока и коэффициента диффузии, слишком большим временем измерения на одной точке. Таким образом, если известен коэффициент диффузии, то градиентные методы могут успешно использоваться при определении радоноопасности территорий.

Одним из методов определения коэффициента диффузии радона является разработанный Ю.П. Булашевичем метод мгновенного источника. В работе [1] подробно рассмотрена теория и методика таких измерений. При использовании данного метода реализуется диффузионное распространение радона. Организация измерений при диффузионном поступлении радона от источника к детектору представляет достаточно сложную задачу, не всегда решаемую серийно выпускаемой аппаратурой. Кроме того, из-за низкой скорости диффузионного процесса, время таких определений достаточно велико.

В предлагаемой работе для определения диффузионных параметров среды рассмотрено применение метода мгновенного источника в диффузионно-адвективном режиме, позволяющем преодолеть ряд недостатков, присутствующих у выше перечисленных методов.

Ниже приведены теоретические выкладки решения одномерной диффузионно-адвективной задачи в условиях мгновенного линейного источника.

Уравнение переноса распадающегося газа в пористой среде имеет вид [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\eta C) = Q - \eta \frac{C}{\tau} + \text{div}(D \nabla C) - \text{div}(\eta \vec{v} C), \quad (1)$$

где  $C$  – поровая концентрация;

$Q$  – скорость выделения радона в поры в единице объема;

$\vec{v}$  – скорость адвекции;

$\tau$  – среднее время жизни радона;

$\eta$  – коэффициент пористости;

$D$  – коэффициент диффузии.

Рассмотрим одномерное течение газа в породе с постоянной скоростью, направленной параллельно поверхности раздела земля–воздух (это будет плоскость  $XYO$ ). Ось  $Z$  направлена вниз, а ось  $X$  – по направлению вектора скорости. Тогда для однородной среды из (1) получим [3]:

$$\frac{1}{D^*} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q}{D} - \frac{C}{D^* \tau} + \Delta C - \frac{v}{D^*} \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $D^* = \frac{D}{\eta}$  – эффективный коэффициент диффузии газа.

Мгновенный источник в точке  $X=Y=0$ ,  $Z=h$  действует с момента времени  $t=0$ . Начальное условие и условие вдали от источника запишем так:  $C=0$  при  $t=0$  во всех точках, кроме источника  $C(X,Y,Z,0) \rightarrow 0$ ; при  $X^2 + Y^2 + Z^2 \rightarrow \infty$  на границе раздела земля-воздух выполняется условие  $C=0$  при  $Z=0$ . В этом случае решение задачи можно записать в виде:

$$C = \frac{Q_0}{\eta(4\pi D^* t)^{3/2}} \exp\left(\frac{vx}{2D^*}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau} - \frac{v^2 t}{4D^*} - \frac{d^2}{4D^* t}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{Zh}{D^* t}\right)\right], \quad (3)$$

где  $d^2 = x^2 + y^2 + (z-h)^2$ .

При  $v=0$  полученное решение совпадает с решением диффузионной задачи, полученной в [4]. Приравнивая частную производную по времени к нулю, получим уравнение поверхности, на которой в момент времени  $t=t_m$  достигается максимум концентрации газа.

$$d^2 = 6D^* t_m + \frac{4D^* t_m^2}{\tau} + v^2 t_m^2 + 4Zh \left[ \exp\left(-\frac{Zh}{D^* t_m}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (4)$$

Выбирая геометрию измерений таким образом, что  $d/h < 0,5$  при  $Z=h$  можно практически исключить влияние границы раздела земля-воздух. При  $v=0$  получим:

$$D^* = \frac{d^2}{6t_m^0 \left(1 + \frac{2t_m^0}{3\tau}\right)}, \quad (5)$$

где  $t_m^0$  – время наступления максимума концентрации в точке наблюдения при  $v=0$ .

При  $t_m^0 \ll \tau$  уравнение (5) совпадает с выражением, используемым Ю.П. Булашевичем для определения коэффициента диффузии в природных средах [4].

При измерении времени достижения максимума в двух точках и  $v \neq 0$  получим уравнения для определения коэффициента диффузии (6) и скорости адвекции газа (7):

$$D^* = \frac{d_1^2 t_2^2 - d_2^2 t_1^2}{6t_1 t_2 (t_2 - t_1)}, \quad (6)$$

$$v = \sqrt{\frac{t_1 d_2^2 \left(1 + \frac{2t_1}{3\tau}\right) - t_2 d_1^2 \left(1 + \frac{2t_2}{3\tau}\right)}{t_1 t_2 (t_2 - t_1)}}. \quad (7)$$

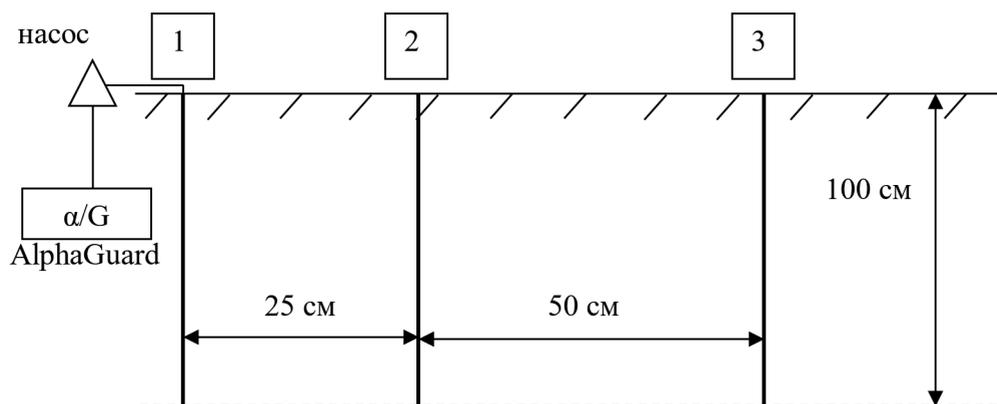
Полученные уравнения (6) и (7) применялись при обработке результатов серии проведенных экспериментов по определению коэффициента эффективной диффузии методом мгновенного источника в диффузионно-адвективном режиме и скорости адвекции соответственно.

### Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования выполнялись на геофизическом полигоне в соответствии со схемой, приведенной на рис.1. Геологический разрез представлен глинистой корой выветривания горных пород габбрового состава.

В грунт на глубину 100 см от поверхности были помещены 3 зонда длиной 100 см. Расстояние между зондами 1 и 2 составляет 25 см, между зондом 2 и 3 составляет 50 см. Каждый из зондов перфорирован по длине 50 см от нижнего конца.

В представленной схеме измерений реализован линейный мгновенный источник в одномерном варианте, в отличие от использованного в работе [3] точечного источника. Адвекция создава-

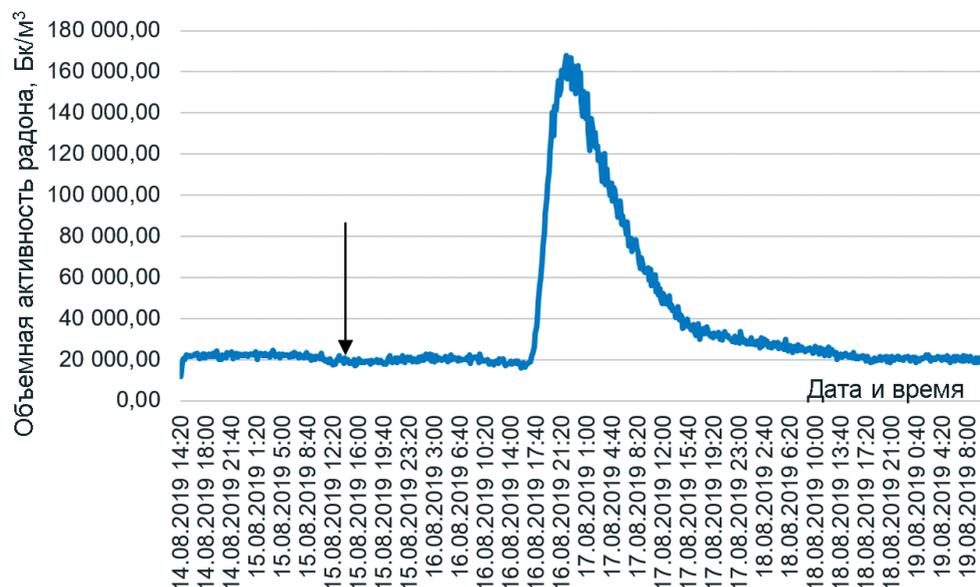


**Рис.1.** Схема расположения зондов на геофизическом полигоне.

лась непрерывной откачкой насосом воздуха из 1 зонда. Откачиваемый воздух пропусклся через прибор измерения объемной активности радона (ОАР) – AlphaGuard. Дискретность измерений составляла 10 минут.

Была проведена серия последовательных экспериментов с напуском радона в разные зонды.

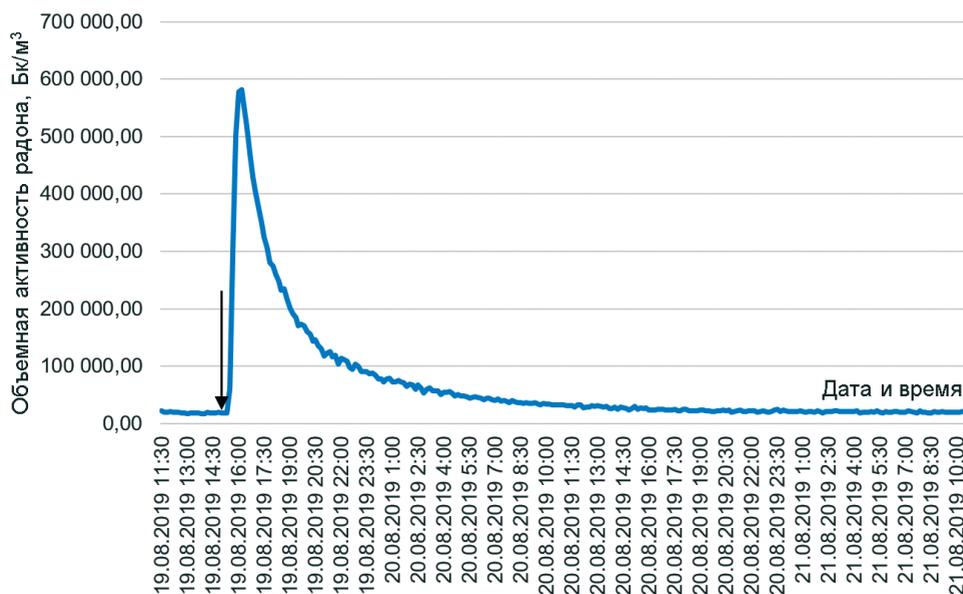
В первой серии измерений после записи фоновых значений в зонд 3 производился (с помощью шприца) выпуск пробы воздуха с радоном объемом  $10 \text{ см}^3$ . Измерения проводились до выхода значений ОАР на фоновый уровень. На рис.2 представлен график зависимости ОАР от времени для первого запуска радона. Время достижения максимального значения ОАР с момента впуска радона составило 6 часов 20 минут.



**Рис.2.** График изменения ОАР при впуске радона в зонд 3 и откачке из зонда 1. Впуск радона – 15.08 в 14:00 (обозначено стрелкой).

При повторном запуске время достижения максимального значения ОАР с момента впуска радона составило 7 часов.

Во второй серии измерений выпуск пробы воздуха с радоном объемом  $10 \text{ см}^3$  производился в зонд 2. На рис.3 приведен график зависимости ОАР от времени. Время достижения максимального значения ОАР с момента впуска радона составило 60 минут.



**Рис.3.** График изменения ОАР при впуске радона в зонд 2 и откачке из зонда 1. Впуск радона – 19.08 в 15:10 (обозначено стрелкой).

При повторном впуске пробы воздуха с радоном в зонд 2 время достижения максимального значения ОАР с момента впуска радона составило 1 час 30 минут.

Количество радона во впускаемых пробах не регламентировалось в силу ряда обстоятельств, поэтому измеренные в ходе экспериментов значения ОАР существенно различаются.

**Табл.1.** Результаты измерений и расчеты коэффициента диффузии и скорости адвекции.

|         | $d_1$ , см | $d_2$ , см | $t_1$ , сек | $t_2$ , сек | $D^*$ , см <sup>2</sup> /сек | $v$ , см/ч |
|---------|------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|------------|
| 1       | 25         | 75         | 3600        | 22799,99    |                              |            |
| 2       | 25         | 75         | 5400        | 25200       |                              |            |
| Среднее | 25         | 75         | 4500        | 23999,995   | 0,0019                       | 7,83       |

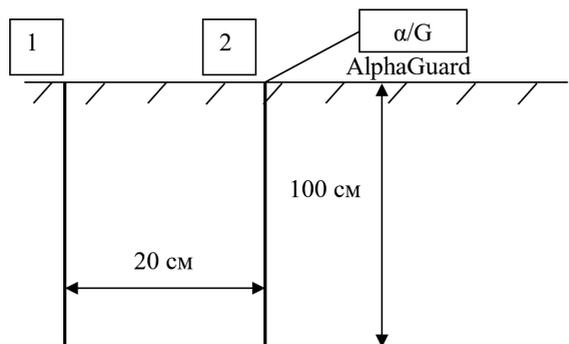
На основе данных, полученных в ходе экспериментов с применением уравнений (6) и (7), выполнялся расчет коэффициента эффективной диффузии и скорости адвекции соответственно. Резуль-

таты выполненных расчетов приведены в табл.1. Для расчетов взяты средние значения времен полученных экстремумов.

Вычисленный усредненный коэффициент эффективной диффузии составляет 0,0019 см<sup>2</sup>/сек, что соответствует полученному в работе [1] значению для глинистой коры выветривания гранитов. Средняя скорость адвекции составила 7,83 см/ч.

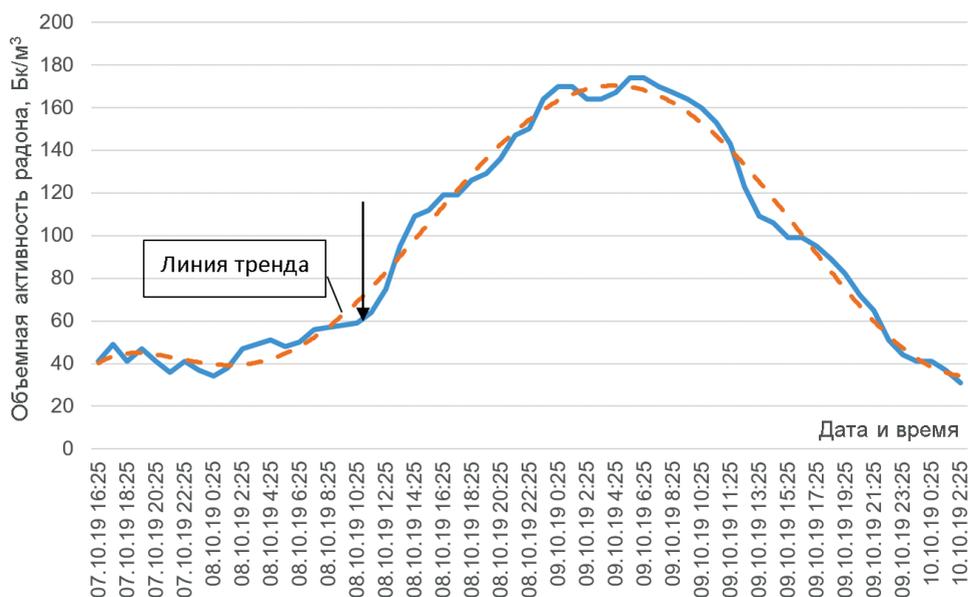
На рис.4 приведена схема расположения зондов на геофизическом полигоне для проведения эксперимента с точечным мгновенным источником в диффузионном режиме. Данный экспе-

**Рис.4.** Схема расположения зондов на геофизическом полигоне.



римент проводился в зоне предыдущего, то есть в тех же петрофизических условиях. В зонд 1 (перфорированный на нижнем конце, на расстоянии 5 см) производился впуск 10 см<sup>3</sup> воздуха с радоном, прибор измерения ОАР подключался к зонду 2

**Рис.5.**  
График изменения ОАР для эксперимента с точечным мгновенным источником в диффузионном режиме. Впуск радона – 08.10 в 11:15 (обозначено стрелкой).



(его диаметр в 4 раза превышает диаметр зонда 1, с перфорацией как у зонда 1), поступление радона в измерительный прибор происходило в диффузионном режиме.

В ходе проведения эксперимента получен график изменения ОАР по времени, который представлен на рис.5.

Время достижения максимального значения ОАР с момента впуска радона составило 13 часов, при повторном эксперименте – 12 часов 20 минут. На основе полученных данных выполнен расчет коэффициента диффузии во формуле (5). Вычисленное среднее значение по двум измерениям составило  $0,0014 \text{ см}^2/\text{сек}$ , что достаточно хорошо (учитывая погрешность радиометрических измерений) совпадает со значением, полученным в ходе эксперимента в диффузионно-адвективном режиме. Вычисленные значения коэффициента диффузии совпадают с результатами, полученными ранее [6].

## Выводы

Выполненные исследования показали, что использование диффузионно-адвективного способа определения диффузионных параметров геологической среды в естественном залегании при использовании мгновенного линейного источника позволяет существенно (более чем на порядок) уменьшить время их определения и упрощает организацию измерения объемной активности радона. Применение этого способа для определения диффузионных параметров среды позволит использовать вертикальное распределение объемной активности радона, которое является более выдержанным по площади. Это позволит получить более надежные результаты при определении радоноопасности территорий предполагаемой застройки жилыми и промышленными зданиями и сооружениями.

### Литература

1. Булашевич Ю.П., Карташов Н.П. Определение коэффициента диффузии радона в горных породах методом мгновенного источника // Известия АН СССР, Физика Земли. 1967. № 10. С. 71-76.
2. Булашевич Ю.П., Хайретдинов Р.К. К теории диффузии эманации в пористых средах // Известия АН СССР, серия геофизическая. 1959. № 12. С. 1787-1792.
3. Уткин В.И., Рывкин Д.Г., Юрков А.К., Козлова И.А. Метод мгновенного источника для расчета параметров диффузии радона в горных породах // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере: Материалы межд. конф. Воронеж: ВГУ. 2006. С. 231-233.
4. Уткин В.И., Юрков А.К., Ладовский И.В., Рывкин Д.Г. Экспериментальные и теоретические исследования потока почвенного радона при изменении условий на границе земля-воздух // Сборник «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». 2006. С. 386-391.
5. Булашевич Ю.П., Карташов Н.П., Башорин В.Н. Коэффициенты диффузии радона и гелия в естественном залегании пород // Известия АН СССР, Физика Земли. 1970. № 2. С. 70-73.
6. Булашевич Ю.П. Некоторые нестационарные задачи диффузии частиц с ограниченным временем жизни // АН СССР УНЦ. Ядерно-геофизические исследования. 1975. С. 3-15.

## The Determination of Radon Diffusion Coefficient and Radon Speed Advection in the Conditions of Instantaneous Source with Diffusion-Advective Transfer in Rocks

Yurkov Anatoliy, Biryulin Sergey, Kozlova Irina (Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg, Russia)

**Abstract.** Experimental determination of diffusion parameters in the upper part of geological section (presented by clayey weathering crust) was made by a point instantaneous source method in a diffusion mode and a linear instantaneous source diffusion-advective mode. The results obtained by these methods showed a fairly good coincidence of the obtained diffusion characteristics of the medium. The time to determine the diffusion characteristics of the medium is significantly reduced by more than an order of magnitude when using the advective method. This is a prerequisite for the widespread use of methods for determining radon hazard based on measurements of the vertical distribution of radon volume activity in the upper part of the geological section.

**Key words:** *diffusion, advection, radon, radon hazard, instant source.*

А.К.Юрков (к.г.-м.н., зав.лаб.), С.В.Бирюлин (м.н.с.), И.А.Козлова (к.г.-м.н., врио директ.)  
Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург.

Контакты: тел. +7 (343) 267-88-88; e-mail: [ikozlova75@mail.ru](mailto:ikozlova75@mail.ru).