

УДК 550.504

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ГРУНТОВ НА ПЕРЕНОС РАДОНА

© 2010 А.В. Климшин, И.А. Козлова, Е.Н. Рыбаков, М.Ю. Луковской

*Институт геофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, 620016;
e-mail: klimshin@yandex.ru.*

Приведены результаты мониторинга температуры грунтов и объемной активности радона в подпочвенном воздухе. Предложена математическая модель переноса радона в условиях промерзания поверхностного слоя грунтов. Дана оценка коэффициента диффузии радона в мерзлом почвенном слое. Рассчитаны кратности изменения значений объемной активности грунтового радона и плотности потока радона с поверхности почвы в зависимости от глубины промерзания и диффузионных свойств грунтов.

Ключевые слова: радон, температура, промерзание, объемная активность, плотность потока.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения объемной активности радона (ОАР) и плотности потока радона с поверхности почвы (ППР) проводятся для решения различных геофизических и геоэкологических задач: поиск месторождений урана, геологическое картирование территорий, оценка радоноопасности участков застройки, прогнозирование землетрясений. Основными методическими проблемами интерпретации экспериментальных данных являются выделение полезного сигнала и оценка ошибок, вызванных протеканием в геосреде процессов, влияющих на распределение радона в верхнем слое грунтов. Одним из таких процессов является промерзание верхнего слоя грунтов в зимнее время года.

В работах (Рудаков, 1985; Klusman, Webster, 1981) приводятся данные, свидетельствующие о возрастании значений объемной активности радона в грунтах в период промерзания их поверхности. Авторы предполагают, что наблюдаемые сезонные вариации объемной активности подпочвенного радона связаны с термопластическими деформациями поверхностного слоя грунтов, которые обусловлены изменением температуры приземного слоя атмосферы. Это предположение не подкреплено количественной моделью переноса радона при деформации грунтов.

В работах (Булашевич, 1945, 1975) увеличе-

ние объемной активности почвенного радона в зимнее время года объясняется установлением непроницаемого экрана на дневной поверхности. Авторы (Микляев, Петрова, 2007) отмечают, что экспериментальные кривые распределения радона в почвенном воздухе, снятые в февралемарте, по своей форме идентичны расчетным кривым увеличения ОАР под непроницаемым экраном. Стоит отметить, что эта модель недостаточно точно описывает перенос радона, так как скорость накопления радона, рассчитанная теоретически, в несколько раз превышает скорость, наблюдаемую в эксперименте.

По данным (Гулабянц, Заболотский, 2004), значения плотности потока радона с поверхности грунтов также подвержены сезонным вариациям. Зимние значения ППР приблизительно в 1.5-2 раза ниже значений, измеренных в летний период. Таким образом, накопленные экспериментальные данные указывают на значительные сезонные вариации объемной активности и плотности потока радона. Для объяснения этих вариаций необходимо построить количественную модель, описывающую процесс переноса радона в условиях промерзания грунтов.

Поэтому в настоящей работе предложена математическая модель для оценки влияния промерзания на значения объемной активности и плотности потока радона. В основе модели лежит предположение об уменьшении коэффициента диффузии радона в промерзающем

слое грунтов. Мерзлый слой грунтов остается проницаемым для радона, но обладает некоторой экранирующей способностью. По мере промерзания грунтов мощность мерзлого слоя увеличивается. Это приводит к увеличению его экранирующей способности.

В работе решались следующие задачи:

а) разработка модели переноса радона в условиях промерзания поверхностного слоя грунтов;

б) оценка коэффициента диффузии радона в слое мерзлых грунтов;

в) оценка изменения значений плотности потока и объемной активности радона при промерзании поверхностного слоя грунтов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Для описания переноса радона в грунтах воспользуемся уравнением диффузии эманации в пористой среде (Булашевич, Хайритдинов, 1959):

$$\eta \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D(z,t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial z}) - \lambda \eta C(z,t) + Q \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$C(z,0) = \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot (1 - e^{-\frac{z}{h}}), \quad C(0,t) = 0, \quad C(\infty,t) = \frac{Q}{\eta \cdot \lambda}, \quad (2)$$

где $D(z,t) = D_1 - (D_2 - D_1) \cdot \chi(z - h(t))$ – изменение коэффициента диффузии радона в процессе промерзания грунтов (m^2/c) (рис. 1), D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии радона в грунтах до и после их промерзания (m^2/c), $\chi(z)$ – функция Хевисайда (единичная ступенчатая функция), $h(t)$ – глубина промерзания грунтов (м), $C(z,t)$ – объемная активность радона в почвенном воздухе (Бк/ m^3); η – пористость; Q – скорость выделения радона в поры в единице объема среды (Бк/($m^3 \cdot c$)); λ – постоянная распада

радона, равная $2.1 \cdot 10^{-6}$ (c^{-1}); $l_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\eta \cdot \lambda}}$ – диффузионная длина радона в грунтовом воздухе (до промерзания). Решение ищется в полубесконечной области, ограниченной сверху поверхностью почвы.

Функцию $h(t)$ аппроксимируем соотношением:

$$h(t) = \frac{h_{max} \cdot t}{T} (\chi(t) - \chi(t - T)) + h_{max} \cdot \chi(t - T) \quad (3)$$

В выражении (3) начальный момент времени – $t = 0$ соответствует началу процесса промерза-

ния, а $t = T$ – время установления максимальной глубины промерзания $h(T) = h_{max}$.

Выражения (1-3) представляют собой математическую модель переноса радона в условиях промерзания грунтов. При $t \gg T$ задача (1-3) имеет стационарное аналитическое решение:

$$C(z) = \begin{cases} \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot (1 - e^{-\frac{z}{h}} + \frac{sh(\frac{z}{l_1}) \cdot (e^{\frac{h}{l_1}} + \frac{l_2}{l_1} \cdot e^{\frac{h}{l_1}})}{ch(\frac{h}{l_1}) + \frac{l_2}{l_1} \cdot sh(\frac{h}{l_1})}), & z \leq h_{max} \\ \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot (1 + \frac{e^{\frac{h}{l_1} + \frac{h-z}{l_2}} \cdot (th(\frac{h}{l_1}) - 1)}{1 + \frac{l_2}{l_1} \cdot th(\frac{h}{l_1})}), & z \geq h_{max} \end{cases} \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные исследования переноса радона в условиях промерзания верхнего слоя грунтов проводились с 1 октября 2009 г. по 30 января 2010 г. на полигоне, расположенном на территории Института геофизики УрО РАН, в г. Екатеринбурге ($56^\circ 46' 51''$ с.ш., $60^\circ 33' 26''$ в.д., абс. отметка 274 м над у.м.). В геологическом отношении полигон расположен в зоне развития пород основного состава, представленных сильнотрещиноватыми габбро. Кровля скальных грунтов залегает на глубине 10.5 м. В интервале от 0 до 10.5 м встречается супесь элювиальная бурого цвета, пластичной консистенции с дресвой до 35 %, с прослоями бурого суглинка тугопластичной консистенции. Пористость грунтов на глубине 0.5 м, определенная методом жидкостенасыщения (ГОСТ 26450.1–85), составила $\eta = 0.12 \pm 0.04$ ($P = 0.95$). Удельная активность $Ra-226$, измеренная с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, составила $A_{Ra} = 23 \pm 8$ Бк/кг ($P = 0.95$).

Температура грунтов измерялась с помощью автономного цифрового измерителя температуры разработанного в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (Казанцев, Дучков, 1992). Точность регистрации

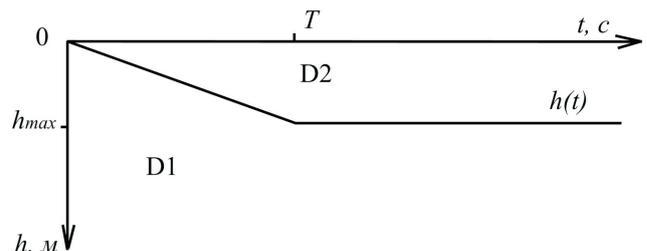


Рис. 1. Аппроксимация глубины промерзания грунтов $h(t)$.

температуры обеспечена на уровне 0.02°C. Измерения проводились на поверхности грунтов и на глубинах 1, 21, 31, 51 см; 1, 2, 3 м с периодом 10 минут. На рис. 2 приведены результаты среднесуточных температур грунтов за весь период наблюдений.

Мониторинг объемной активности радона в почвенном воздухе проводился с 6 октября 2009 г. по 15 января 2010 г. Отбор проб почвенного воздуха производился из пробоотборников, установленных на глубинах 0.7 и 2.7 м. Измерения были выполнены с помощью радиометра радона AlphaGuard PQ 2000 PRO по методике, утвержденной ФГУП «ВНИИФТРИ». Основная относительная погрешность измерений объемной активности радона в почвенном воздухе не превышает 10 %. Результаты измерений объемной активности радона изображены точками на рис. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значения для максимальной глубины промерзания $h_{max} = 0.5$ м и времени установления этого значения $T = Q \approx 4 \cdot 10^{-3}$ с подобраны по результатам измерения температуры грунтов (рис. 2).

На рис. 3 приведены решения задачи (1-3), полученные методом конечных разностей. При $t \gg T$ численное и аналитическое (4) решения совпадают. Значения параметров Q , D_1 , D_2 , входящих в выражения (1-3), подобраны на основе сравнения экспериментальных значений объемной активности радона в грунтовом воздухе с теоретическими. Процедура подбора основана на минимизации функционала, являющегося суммой квадратов невязок между экспериментальными и теоретическими значениями.

Значения параметров, входящих в выражения (1-3), оказались следующими. Коэффициент диффузии радона в грунтах до промерзания $D_1 \approx 9 \cdot 10^{-7}$ м²/с, коэффициент диффузии радона

в слое мерзлых грунтов $D_2 \approx 9.1 \cdot 10^{-8}$ м²/с, скорость выделения радона в поры в единице объема среды $Q \approx 4 \cdot 10^{-3}$ (Бк/(м³с)). Используя эти значения, были рассчитаны теоретические кривые изменения объемной активности радона в грунтах с глубиной для различных моментов времени (рис. 4а). Значения плотности диффузионного потока радона с поверхности грунтов, представленные на рис. 4б, рассчитаны по формуле:

$$j(t) = D(0,t) \cdot \left[\frac{\partial C(z,t)}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (5)$$

Из приведенных на рисунках 3 и 4 экспериментальных и теоретических данных видно, что объемная активность радона в грунтах на глубине 0.7 м (глубина пробоотбора при эманационной съемке) возрастает при промерзании грунтов от 4.9 кБк/м³ до 12.7 кБк/м³. Время увеличения значений объемной активности радона примерно равно времени установления максимальной глубины промерзания ($\approx 11.6 \cdot \lambda^{-1} c$). Отношение значений ОАР на глубине 0.7 м после установления мерзлого слоя ($t \geq T$), к значениям этой величины, определенным в период, предшествующий промерзанию ($t \leq 0$), будем называть кратностью увеличения объемной активности радона:

$$K_c = \frac{C(0.7,T)}{C(0.7,0)} \quad (6)$$

Плотность потока радона при промерзании поверхности грунтов убывает от 7.6 до 2.9 мБк/(м²с). Введем величину кратности уменьшения ППР:

$$K_j = \frac{j(0)}{j(T)} \quad (7)$$

Используя выражения (1-3), были рассчитаны значения $K_c = K_j = 2.6$, соответствующие найденным в эксперименте параметрам:

$D_1 \approx 9.10^{-7}$ м²/с, $D_2 \approx 9.1 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $Q \approx 4 \cdot 10^{-3}$ (Бк/(м³·с)), $h_{max} = 0.5$.

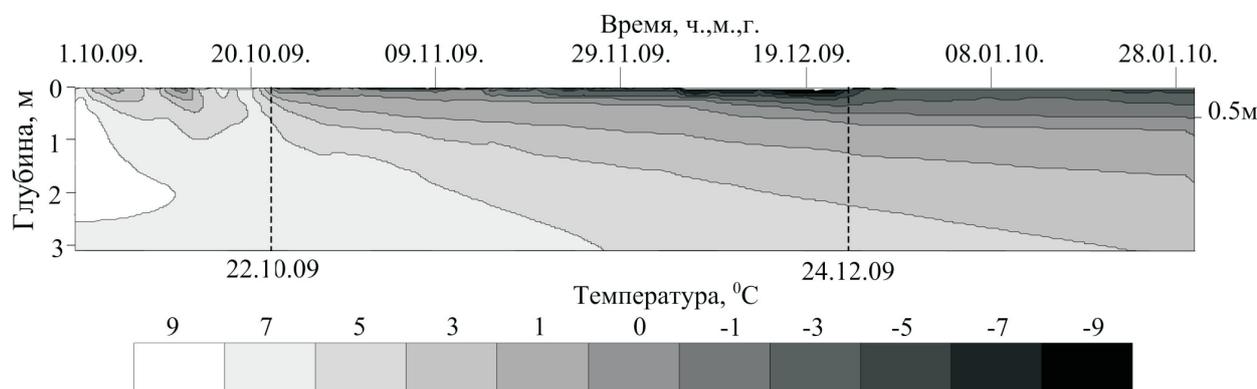


Рис. 2. Результаты измерений температуры грунтов.

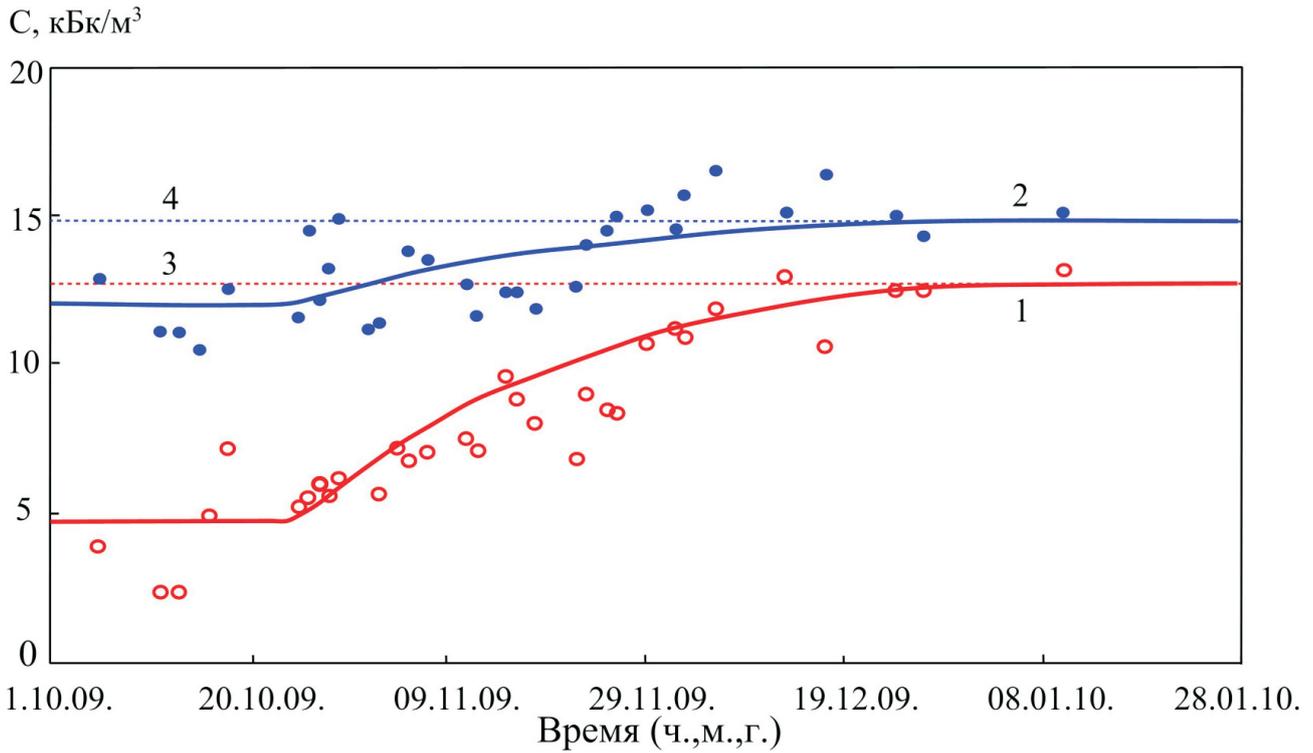


Рис. 3. Изменение объемной активности радона (C) за период измерений на глубине 0.7 (кривая 1, светлые кружки) и 2.7 м (кривая 2, темные кружки). Кривые линии – теоретический расчет; кружки – экспериментальные значения; пунктирные линии – стационарное аналитическое решение (3 – для глубины 0.7 м; 4 – для глубины 2.7 м)

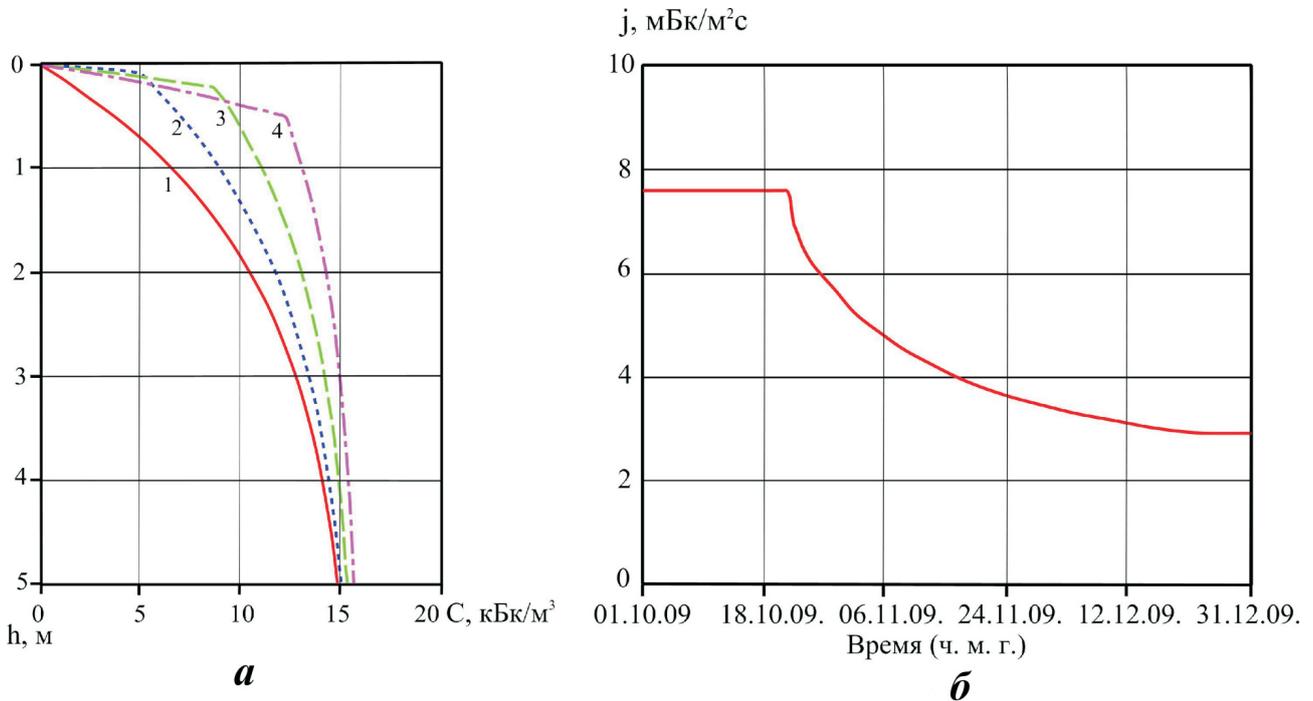


Рис. 4. Теоретический расчет кривых изменений объемной активности радона C при различных глубинах промерзания, соответствующих временам измерений: 1 – 22.10.09; 2 – 1.11.09; 3 – 17.11.09; 4 – 21.12.09 (а); теоретический расчет изменения плотности потока радона j с поверхности грунтов за период, соответствующий времени измерений (б).

Будем считать, что для тех типов грунтов, которые перечислены в таблице, значение коэффициента диффузии радона в мерзлом слое равно ($D_2 \approx 9.1 \cdot 10^{-8}$ м²/с) найденному в эксперименте. Несмотря на то, что такой подход является приближенным, он позволяет оценить кратности увеличения объемной активности и уменьшения плотности потока радона при промерзании верхней части грунтов для различных их типов.

На рис. 5 приведены результаты расчета кратностей изменения объемной активности и плотности потока радона при промерзании верхней части грунтов в зависимости от диффузионной длины радона в грунтах до промерзания и глубины промерзания. Из приведенных данных видно, что кратности изменений характеристик радона ведут себя примерно одинаково, возрастая с увеличением значений глубины промерзания грунтов и диффузионной длины радона в грунтах.

Максимальные значения кратностей изменения объемной активности и плотности потока радона, при значениях диффузионной длины и глубины промерзания, приведенных на рис. 5, составляет $K_c = 2.87$ и $K_j = 3.21$, соответственно. Средние значения этих величин равны $K_c = 1.72$ и $K_j = 1.80$.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований дана оценка влияния промерзания поверхностного слоя грунтов на значения объемной активности и плотности потока с поверхности

почвы. По экспериментальным данным рассчитан коэффициент диффузии радона в слое мерзлых грунтов. Его значение $D_2 \approx 9.1 \cdot 10^{-8}$ м²/с, что приблизительно в 10 раз меньше значения, найденного в период измерений, предшествующий промерзанию. Уменьшение коэффициента диффузии в мерзлом поверхностном слое грунтов приводит к снижению плотности потока радона с поверхности почвы и увеличению объемной активности радона на глубине 0.7 м. Сезонные вариации этих величин необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений в геофизических и геоэкологических исследованиях. Кратности изменения характеристик поля радона (рис. 5) можно использовать в качестве поправок для результатов измерений, проведенных в период промерзания верхнего слоя грунтов. Средние кратности увеличения объемной активности и уменьшения плотности потока радона равны: $K_c = 1.72$ и $K_j = 1.80$, соответственно. Эти значения можно использовать для приблизительных оценок, если глубина промерзания и диффузионные свойства грунтов неизвестны.

Авторы благодарят доктора геолого-минералогических наук Д. Ю. Демежко за ценные рекомендации при получении и обработке экспериментальных данных температуры грунтов.

Работа выполнена при поддержке Программы №16 Президиума РАН, программы № 6 ОНЗ РАН и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (ГК №П1271).

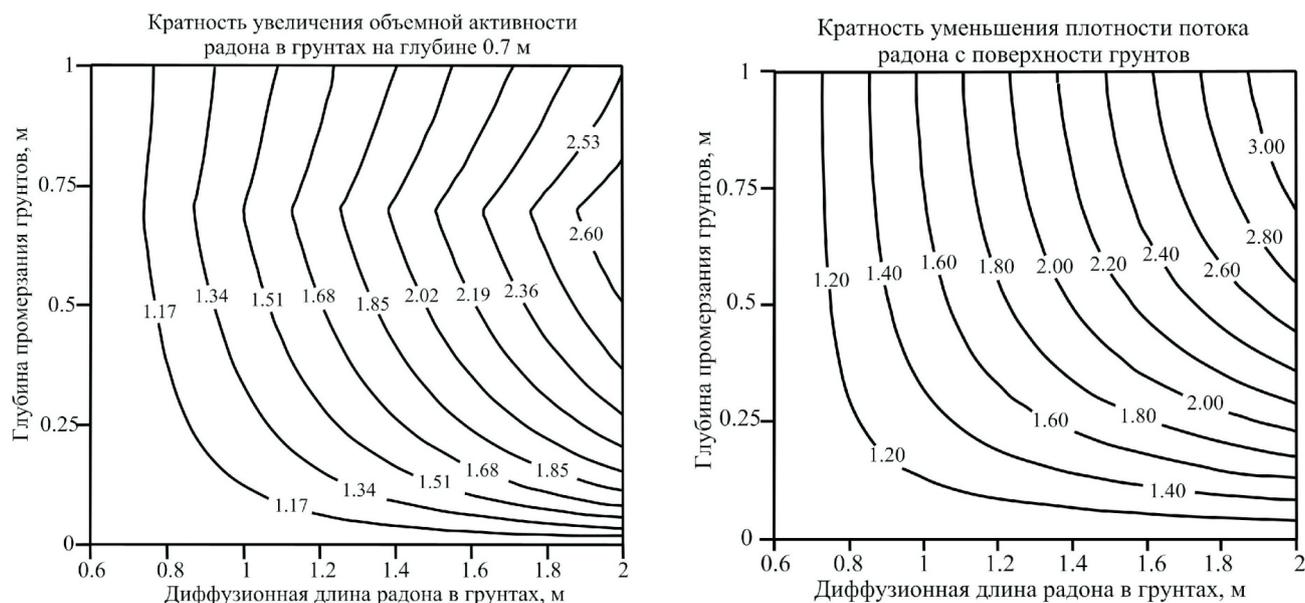


Рис. 5. Кратность увеличения объемной активности радона на глубине 0.7 м (слева) и кратность уменьшения плотности потока радона с поверхности грунтов (справа) при их промерзании в зависимости от диффузионной длины радона в грунтах и глубины промерзания.

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕРЗАНИЯ

Расчет кратности изменения объемной активности и плотности потока радона при промерзании грунтов

Тип грунта	Коэффициент диффузии радона (до промерзания), D_1^1 , $m^2 \cdot c$	Пористость, η^1	Кратность увеличения объемной активности радона (на глубине 0,7 м), $K_c = \frac{C(0.7, T)}{C(0.7, 0)}$	Кратность уменьшения плотности потока радона с поверхности грунтов, $K_j = \frac{j(0)}{j(T)}$
Кора выветривания гранитов	$3.6 \cdot 10^{-7}$	0.19	1.37	1.45
Кварцполевошпатовый песок	$5.9 \cdot 10^{-7}$	0.27	1.45	1.54
Дресва гранита	$5.2 \cdot 10^{-7}$	0.14	1.83	1.92
Щебнисто-глинистая кора выветривания кислых пород	$1.3 \cdot 10^{-7}$	0.08	1.29	1.36
Песок полимиктовый	$6.2 \cdot 10^{-7}$	0.24	1.56	1.65

¹ Значения коэффициентов диффузии радона в грунтах D_1 и пористости η указаны по данным (Булашевич, 1975).

Список литературы

- Булашевич Ю.П.* Сезонные изменения радиоактивных аномалий // Известия Академии наук СССР. 1945. № 5-6. С. 529-534.
- Булашевич Ю.П., Хайритдинов Р.К.* К теории диффузии эманации в пористых средах // Известия Академии наук СССР. 1959. № 12. С. 1787-1792.
- Булашевич Ю.П.* Некоторые нестационарные задачи диффузии частиц с ограниченным временем жизни // Ядерно-геофизические исследования. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 3-15.
- ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением // Государственный комитет СССР по стандартам. 1985. С. 1-8.
- Гулябянц Л.А., Заболотский Б.Ю.* Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки // АНРИ. 2004. № 4. С. 46-50.
- Казанцев С.А., Дучков А.Д.* Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. М.: Наука, 1992. С. 365-373.
- Микляев П.С., Петрова Т.Б.* Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007 № 2. С. 2 -16.
- Рудаков В.П.* К вопросу о природе сезонных вариаций подпочвенного радона // Геохимия. 1985. № 7. С. 1055-1058.
- Klusman R.W., Webster J.D.* Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crystal gas emission relevant to earthquake prediction // Bul. Seismol. Soc. Of America. 1981. V. 71. № 1. P. 211-222.

EFFECT OF FREEZING THE SURFACE LAYER OF SOIL ON THE RADON TRANSPORT

A. V. Klimshin, I. A. Kozlova, E. N. Rybacov, M. Y. Lukovskoy

*Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620016,
e-mail: aklimshin@yandex.ru.*

Results of soil temperature and soil gas radon concentration monitoring are shown. A model of radon transport is developed in case of frost penetration in a soil top layer. An estimation of radon diffusion coefficient in a frozen soil layer is given. Factors of soil gas radon concentration and radon flux from soil surface are calculated, depending on depth of frost penetration and diffusion properties of soil.

Keywords: radon, temperature, frost penetration, volume activity, flux density.