УДК 550.504

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА РАДОНА В ГРУНТАХ В УСЛОВИЯХ ПРОМЕРЗАНИЯ

Климшин А.В., Козлова И.А., Рыбаков Е.Н., Луковской М.Ю. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. 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 изменения объемной активности и плотности потока радона с поверхности почвы в процессе промерзания грунтов.

Радон, температура, промерзание грунтов, объемная активность, плотность потока.

EXPERIMENTAL AND TEORETICAL STUDY OF RADON TRANSPORT IN SOIL FROST PENETRATION CONDITIONS

Klimshin A.V., Kozlova I.A., Rybakov E.N., Lukovskoy M.Yu. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. 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.

Radon, temperature, frost of soil, volumetric activity, density of a stream.

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 and 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) увеличение объемной активности почвенного радона в зимнее время года объясняется установлением непроницаемого экрана на дневной поверхности. Авторы другой работы (Микляев, Петрова, 2007) также отмечают, что экспериментальные кривые распределения радона в почвенном воздухе, снятые в феврале-марте, 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.

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):

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

с начальным и граничными условиями:

$$C(z,0) = \frac{Q}{\lambda\cdot\eta}\cdot(1-e^{-\frac{z}{l_1}}),$$
$$C(0,t) = 0, \quad (2)$$
$$C(\infty,t) = \frac{Q}{\eta\cdot\lambda},$$

где η – пористость; $C(z,t)$ – объемная активность радона в почвенном воздухе (Бк/м^3); Q – скорость выделения радона в поры в единице объема среды (Бк/м^3·с); λ – постоянная распада радона, равная $2{,}1\cdot10^{-6}$(с$^{-1}$); $D(z,t)$ – коэффициент диффузии (м^2/с);

$l_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\eta\cdot\lambda}}$ – диффузионная длина радона в грунтовом воздухе (до промерзания); D_1 – коэффициент диффузии радона до промерзания (м^2/с). Решение ищется в полубесконечной области, ограниченной сверху поверхностью почвы.

Зависимость коэффициента диффузии от времени и глубины (рис. 1) зададим в виде:

$$D(z,t) = D_1 - (D_2 - D_1)\cdot\chi(z - h(t)), \quad (3)$$

где $\chi(z)$ – функция Хевисайда (единичная ступенчатая функция); $h(t)$ – глубина промерзания грунтов (м); D_2 – коэффициент диффузии радона в грунтах после их промерзания (м^2/с).

Функцию $h(t)$ аппроксимируем соотношением:

$$h(t) = \frac{h_{\max}\cdot t}{T}(\chi(t) - \chi(t-T)) + h_{\max}\cdot\chi(t-T). \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) начальный момент времени $t=t_0$ соответствует началу процесса промерзания, а $t=T$ – время установления максимальной глубины промерзания $h(T)=h_{\max}$.

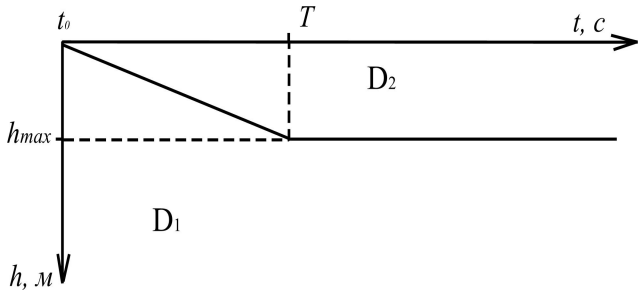


Рис. 1. Иллюстрация зависимости максимальной глубины промерзания грунтов от времени

Выражения (1–4) представляют собой математическую модель переноса радона в условиях промерзания грунтов.

При $t>>T$ задача (1–4) имеет стационарное аналитическое решение:

$$C(\alpha)=\begin{cases}\dfrac{Q}{\lambda\cdot\eta}\cdot\left(1-e^{\alpha}+\dfrac{sh\alpha\cdot e^{\beta}\cdot(1+\gamma)}{ch\beta+\gamma\cdot sh\beta}\right), & z\le h_{\max}\\ \dfrac{Q}{\lambda\cdot\eta}\cdot\left(1+\dfrac{e^{\beta(1+\gamma\cdot(\beta-\gamma))}\cdot(th\beta-1)}{1+\gamma\cdot th\beta}\right), & z\ge h_{\max}\end{cases}, \quad (5)$$

$$\alpha=\frac{z}{l_1},\ \beta=\frac{h_{\max}}{l_1},\ \gamma=\frac{l_2}{l_1},$$

где l_2 – диффузионная длина радона в мерзлом слое грунта.

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 Екатеринбурге (56º46´51´´ с.ш., 60º33´26´´ в.д., абс. отметка 274 м над уровнем моря). В геологическом отношении полигон расположен в зоне развития пород основного состава, представленных сильно трещиноватыми 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 η=0,12±0,04 *(P*=0,95*)*. Удельная активность Ra-226, измеренная с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, составила A_{Ra}=23±8 Бк/кг (*P*=0,95).

Температура грунтов измерялась с помощью автономного цифрового измерителя температуры, разработанного в ИНГГ СО РАН (Казанцев, Дучков, 1992). Точность регистрации температуры обеспечена на уровне 0,02 ^{0}С. Измерения проводились на поверхности грунтов и на глубинах 1, 21, 31, 51 см, 1, 2, 3 м с периодом 10 мин.

На рис. 2 (цветная вкладка) 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. на том же полигоне, где измерялась температура грунтов. 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 приведены на рис. 3.

Обсуждение результатов

Значения максимальной глубины промерзания $h_{\max}$=0,5 м найдено по результатам измерения температуры грунтов (рис. 2, цветная вкладка).

Интервал времени установления этого значения $T^*=T-t_0=11{,}6\cdot\lambda^{-1}$ с (интервал времени выражен через постоянную распада радона λ для удобства записи, обозначен пунктирными линиями на рис. 2.

На рис. 3 приведены решения задачи (1–4), полученные методом конечных разностей. При $t>>T$ численное и аналитическое (5) решения совпадают. Значения параметров Q, D_1, D_2, входящих в выражения (1–4), подобраны на основе сравнения экспериментальных значений объемной активности радона в грунтовом воздухе с теоре-

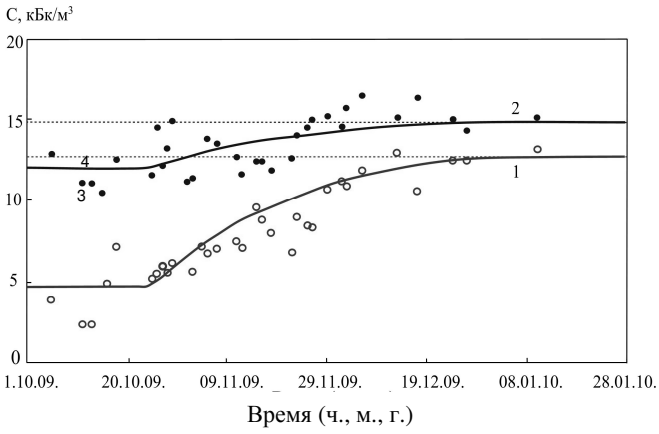


Рис. 3. Изменение объемной активности радона (С) за период измерений на глубине 0,7 м (кривая 1, светлые кружки) и 2,7 м (кривая 2, темные кружки); кривые линии – теоретический расчет; кружки – экспериментальные значения; пунктирные линии – стационарное аналитическое решение (3 – для глубины 0,7 м; 4 – для глубины 2,7 м)

тическими. Процедура подбора основана на минимизации функционала, являющегося суммой квадратов невязок между экспериментальными и теоретическими значениями.

Значения параметров, входящих в выражения (1–5), оказались следующими: коэффициент диффузии радона в грунтах до промерзания $D_1 \approx 9{,}0 \cdot 10^{-7}$ м^2/с; коэффициент диффузии радона в слое мерзлых грунтов $D_2 \approx 9{,}1 \cdot 10^{-8}$ м^2/с; скорость выделения радона в поры в единице объема среды $Q \approx 4{,}0 \cdot 10^{-3}$ Бк/м^3·с. Используя эти значения в выражениях (1–3), 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:

$$j(t) = D(0,t) \cdot \left[\frac{\partial C(z,t)}{\partial z} \right]_{z=0} . \qquad (6)$$

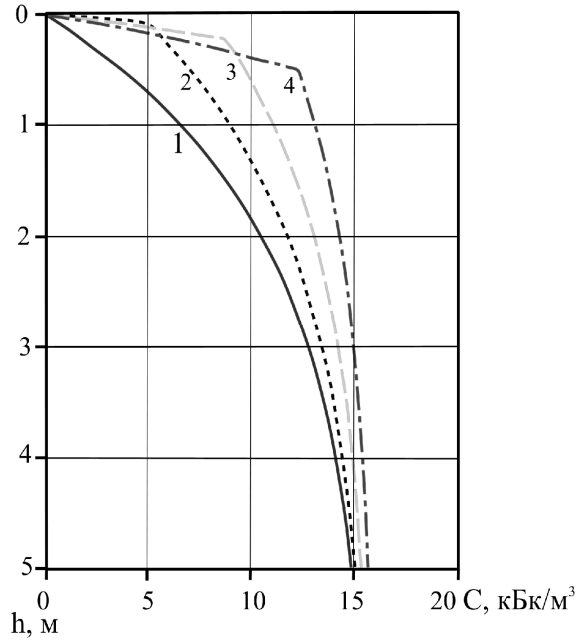
Из приведенных на рис. 3 и 4 экспериментальных и теоретических данных видно, что объемная активность радона в грунтах на глубине 0,7 м (глубина пробоотбора при эманационной съемке) возрастает при промерзании грунтов от 4,9 до 12,7 кБк/м^3. Время увеличения значений объемной активности радона примерно равно времени установления максимальной глубины промерзания, $\approx 11{,}6 \cdot \lambda^{-1}$ с. Отношение значений ОАР на глубине 0,7 м после установления мерзлого слоя ($t \geq T$) к значениям этой величины, определенным в период, предшествующий промерзанию ($t \leq t_0$), будем называть кратностью увеличения объемной активности радона:

$$K_c = \frac{C(0{,}7;T)}{C(0{,}7;t_0)} . \qquad (7)$$

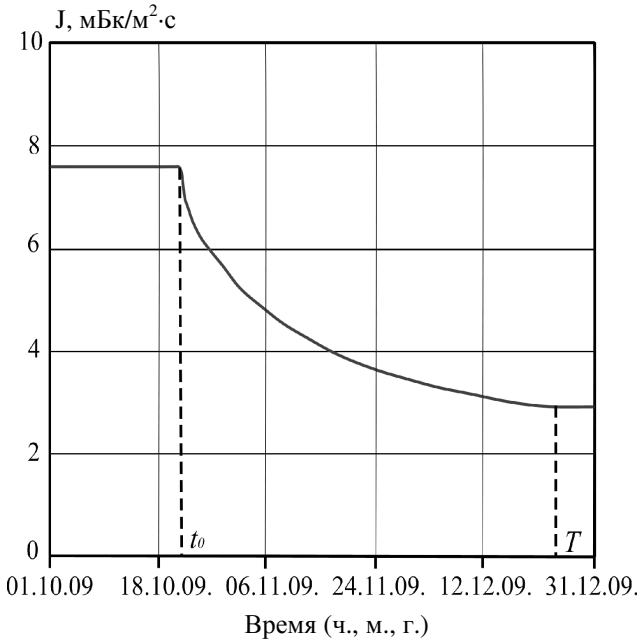
Плотность потока радона при промерзании поверхности грунтов убывает от 7,6 до 2,9 мБк/м^2·с. Введем величину кратности уменьшения ППР:

$$K_j = \frac{j(t_0)}{j(T)} . \qquad (8)$$

Используя выражения (1–4), были рассчитаны значения $K_c = K_j = 2{,}6$, соответст-



а)



б)

Рис. 4. Теоретический расчет кривых изменения: а) 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; б) плотности потока радона *j* с поверхности грунтов за те же промежутки времени

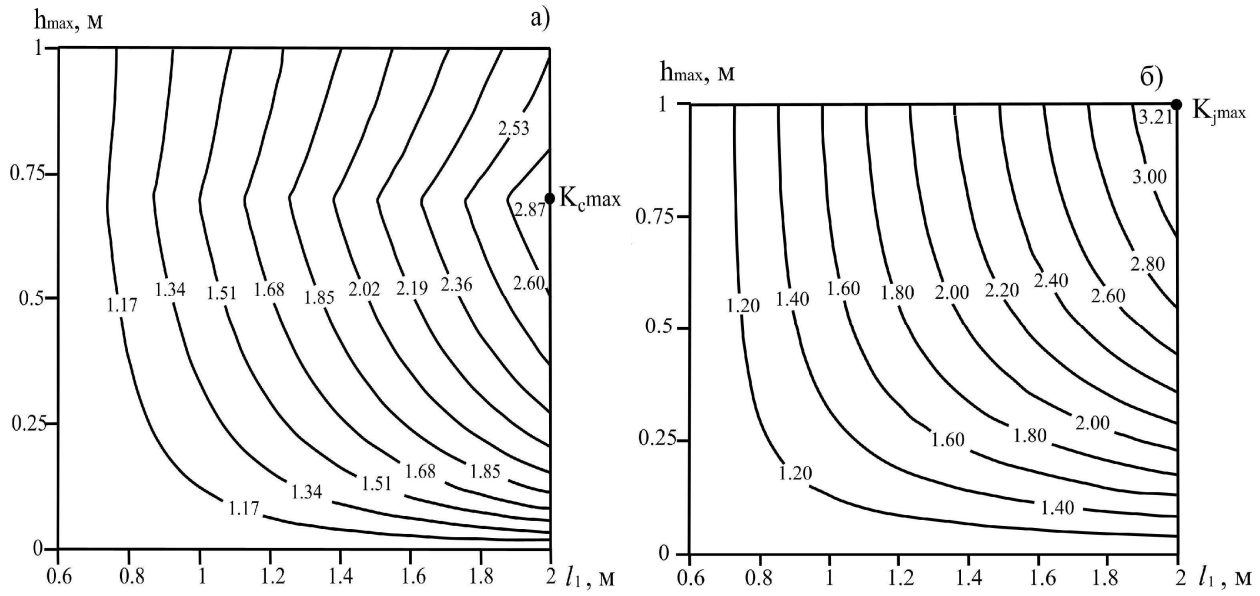


Рис. 5. Теоретический расчет кратностей изменения (шифр кривых) объемной активности радона на глубине 0,7 м (а) и плотности потока радона с поверхности грунтов (б) при их промерзании в зависимости от диффузионной длины радона в грунтах и глубины промерзания

вующие найденным в эксперименте параметрам: $D_1 \approx 9{,}0 \cdot 10^{-7}$ м^2/с; $D_2 \approx 9{,}1 \cdot 10^{-8}$ м^2/с; $Q \approx 4{,}0 \cdot 10^{-3}$ Бк/(м^3·с), h_{max}=0,5.

Будем считать, что для тех типов грунтов, которые перечислены в табл. 1, значение коэффициента диффузии радона в мерзлом слое равно $D_2 \approx 9{,}1 \cdot 10^{-8}$ м^2/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 плотно-

Таблица 1 – Результаты кратности изменения объемной активности и плотности потока радона при промерзании грунтов

Тип грунта	D_1^*, 10^{-7} м^2/с	η^*	K_c (на глубине 0,7 м)	K_j
Кора выветривания гранитов	3,6	0,19	1,37	1,45
Кварцполевошпатовый песок	5,9	0,27	1,45	1,54
Дресва гранита	5,2	0,14	1,83	1,92
Щебнисто-глинистая кора выветривания кислых пород	1,3	0,08	1,29	1,36
Песок полимиктовый	6,2	0,24	1,56	1,65

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

сти потока радона, при значениях диффузионной длины и глубины промерзания, приведенных на рис. 5, равны K_c=2,87 и K_j=3,21, соответственно. Средние значения этих величин – 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 составило $D_2 \approx 9{,}1 \cdot 10^{-8}$ м^2/с, что приблизительно в 10 раз меньше значения, найденного в период измерений, предшествующих 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.

Теоретически рассчитанные 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).

Литература

Булашевич Ю.П. Сезонные изменения радиоактивных аномалий // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1945. № 5–6. С. 529–534.

Булашевич Ю.П., Хайритдинов Р.К. К теории диффузии эманации в пористых средах // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1959. № 12. С. 1787–1792.

Булашевич Ю.П. Некоторые нестационарные задачи диффузии частиц с ограниченным временем жизни // Ядерно-геофизические исследования: сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. 132 с.

ГОСТ 26450.1-85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с.

Гулабянц 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. N 1. P. 211–222.

К статье Носкевича В.В., Федоровой Н.В., Муравьева Л.А. – «Картирование археологических памятников с помощью магнитометрии»

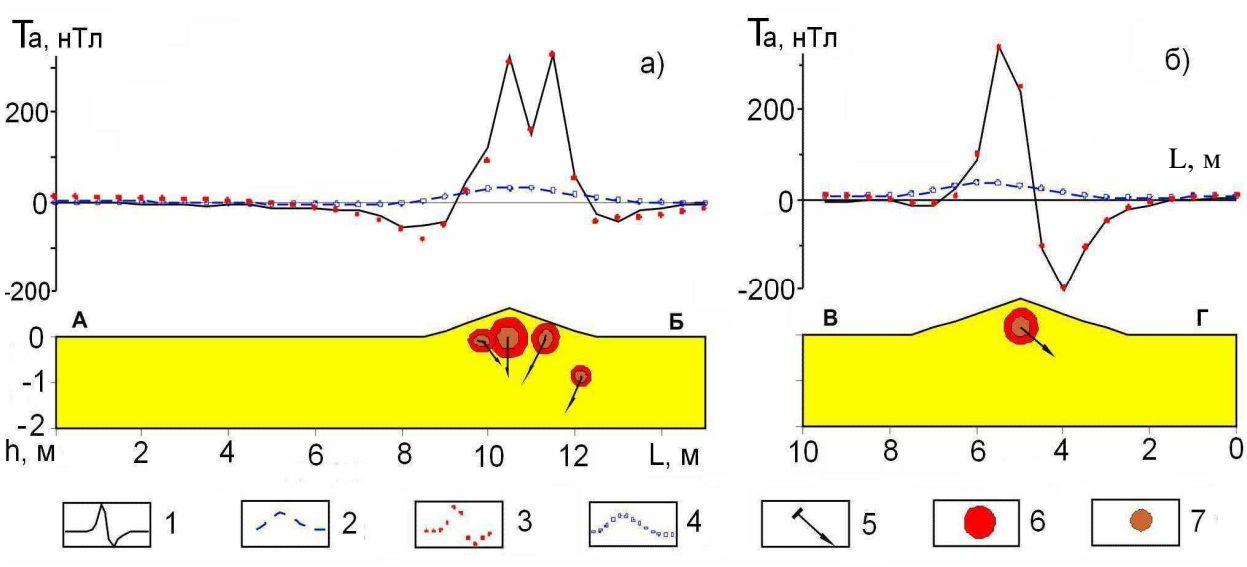


Рис. 5. Результаты интерпретации магнитных аномалий над курганом:
а) профиль АБ; б) профиль ВГ;
условные обозначения: 1 – аномальное поле на высоте 0,35 м; 2 – аномальное поле на высоте 2,15 м; 3 – модельное поле на высоте 0,35 м; 4 – модельное поле на высоте 2,15 м; 5 – модельный источник (намагниченная пластина) и направление намагниченности источника; 6 – эквивалентный объект с намагниченностью 3 А/м; 7 – эквивалентный объект с намагниченностью 10 А/м

К статье Климшина А.В., Козловой И.А., Рыбакова Е.Н., Луковского М.Ю. – «Экспериментальные и теоретические исследования переноса радона в грунтах в условиях промерзания»

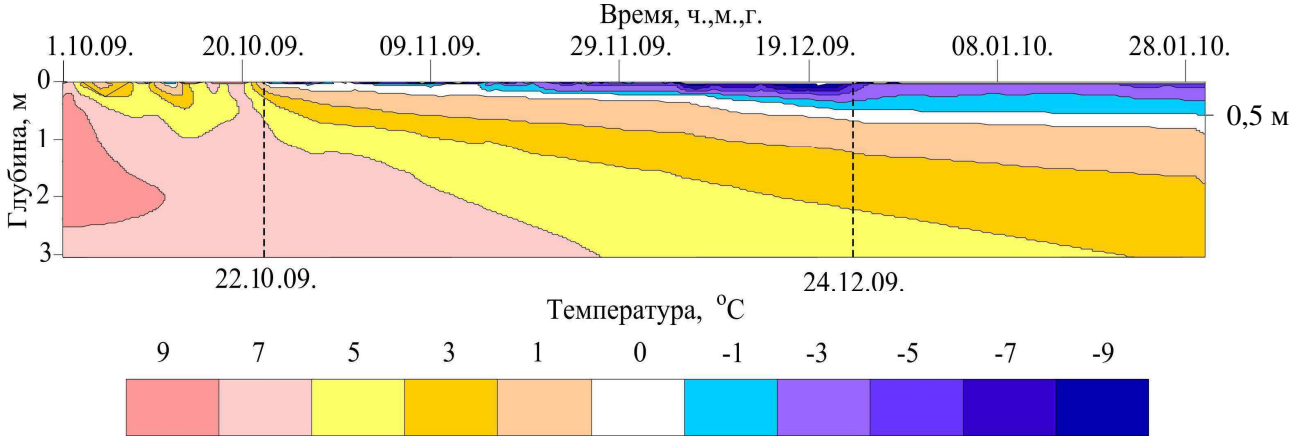


Рис. 2. Результаты измерений температуры грунтов