

УДК 550.3: 550.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ РАДОНА В СВЯЗИ С ТЕКТОНИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ

¹Сухоруков М.В., ²Спивак А.А.

¹ФГБУН «Институт динамики геосфер РАН» (ИДГ РАН), Москва;

²ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт» (МФТИ), Москва, e-mail: m-vs@yandex.ru

В работе представлены результаты анализа пространственно-временных рядов объемной активности радона ^{222}Rn (ОА), в том числе синхронных временных рядов на разных глубинах, в районах измерений с тектоническими структурами разного ранга. Районы с тектоническими структурами разного ранга характеризуются, как правило, активными геодинамическими процессами с разной интенсивностью, что может отражаться на устойчивости техногенных сооружений. Установлено, что средние значения и вариации ОА ^{222}Rn определяются расположением источников радона, срединных участков тектонических структур и монотонно увеличиваются с глубиной. Установлено, что временные вариации на разных глубинах синхронны, что говорит о значительном вкладе в процесс переноса фильтрации и нелинейной диффузии. Предложена модель выноса на поверхность радона ^{222}Rn , в которой коэффициент диффузии радона зависит от глубины, а скорость фильтрации постоянна.

Ключевые слова: радон, дегазация Земли, картирование тектонических структур, тектонический разлом, тектоническое нарушение, миграция подземных газов

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE FIELD OF RADON IN CONNECTION WITH THE TECTONIC STRUCTURES

¹Sukhorukov M.V., ²Spivak A.A.

¹Institute of Geosphere Dynamics, RAS (IDG RAS), Moscow;

²Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Moscow, e-mail: m-vs@yandex.ru

In work results of the analysis of existential numbers of volume activity of radon ^{222}Rn (OA), including synchronous time numbers on different depths, in areas of measurements with tectonic structures of a different rank are presented. Areas with tectonic structures of a different rank are characterised, as a rule, by active geodynamic processes with different intensity that can be reflected in stability of technogenic constructions. It is established that average values and variations OA ^{222}Rn are defined by an arrangement of sources of radon, middle sites of tectonic structures and monotonously increase with depth. It is established that time variations on different depths are synchronous that speaks about the considerable contribution to process of carrying over of a filtration and nonlinear diffusion. The carrying out model on a radon surface ^{222}Rn in which the factor of diffusion of radon depends on depth is offered, and speed of a filtration is constant.

Keywords: radon, degassing of the Earth, mapping tectonic structures, tectonic fault, tectonic disturbance, underground migration of gases

Районы с тектоническими структурами разного ранга характеризуются, как правило, активными геодинамическими процессами с разной интенсивностью, что может отражаться на устойчивости техногенных сооружений. Хорошим индикатором геодинамических процессов является исследование почвенного радона ^{222}Rn [8, 9].

Профильные измерения объемной активности радона ^{222}Rn (ОА) проводились в период 2004–2010 гг. в нескольких регионах России, характеризующихся разной геодинамической активностью, и выполнялись методом отбора проб один раз в час с помощью автоматизированных радиометров радона РРА-03, РРА-04, РГА-01А с глубины 0,8 м, вариации температуры на которой за время измерения пренебрежимо малы. Пункты регистрации были стационарные и оперативные, располагались как в зонах влияния нарушений сплошности

земной коры, так и на срединных участках структурных блоков.

В пределах Московской синеклизы измерения осуществлялись на южной окраине Пачелмского авлакогена (район Нелидово Рязанской тектонической структуры) [2, 4] и северной окраине Подмосквового авлакогена (район Ногинской тектонической структуры) [5]. В зонах влияния более активных на современном этапе структур также проводились измерения: в Прибайкалье на участках Тункинской ветви рифтовых впадин Байкальской рифтовой зоны [1] и на Алтае (пункты оперативной регистрации располагались вдоль профилей, пересекающих Курайскую и Чуйскую тектонические структуры) [5].

Пункты оперативной регистрации, в которых проводились длительные измерения, выбирались на срединных участках тектонических нарушений (соответствуют

максимумам объемной активности вдоль профилей, пересекающих тектонические нарушения).

Результаты исследований и их обсуждение

Во всех пунктах регистрировались устойчивые вариации ОА со временем с периодом около суток и 14 дней. Зоны влияния тектонических структур проявились повышенными значениями ОА: на срединных участках тектонических структур до 6 раз (чаще всего в 2–3 раза) по отношению к близлежащим срединным участкам структурных блоков (рис. 1).

Аномалии ОА могут быть привязаны не только к участкам разломных зон, но и к близкому залеганию источников радона. Для повышения надежности определения разлома изучают в исследуемом районе вариации ОА, вызванные активной геодинамикой. Эти вариации удобно характеризовать величиной $K_R = \frac{R_{\max}}{R_{\min}}$, относительным

коэффициентом приращения ОА в измеряемом пункте, здесь R_{\max} и R_{\min} – максимальные и минимальные суточные значения ОА за вычетом влияния атмосферного давления (рис. 2). Тектонические структуры проявляют себя также повышенными колебаниями (вариациями) ОА. Аномалия ОА, отмеченная на рисунке цифрой 1, соответствует местоположению срединной линии Ногинской

тектонической структуры. Аномалия ОА, отмеченная на рисунке цифрой 2, указывает на нахождение здесь источника радона с большей интенсивностью, так как вариации ОА сильно не проявляются.

Экспериментальное изучение и построение теоретической модели изменения поля радона со временем на разных глубинах необходимо для выяснения механизма миграции радона к поверхности в изучаемом районе, поиска закономерностей его вариаций.

В изучаемом районе (рис. 3) приповерхностных источников радона практически не наблюдается. Источниками радона в основном являются отложения бобриковской свиты визейского яруса нижнего карбона, которые выявляются в глинах, серых песках, прослойках бурых углей, залегающих на глубинах около 200 м.

1) значения ОА радона ^{222}Rn в подпочвенной атмосфере увеличиваются с глубиной;

2) временные вариации ОА подпочвенного радона ^{222}Rn близки к синхронным. Выявлены периодичности с циклами 0,5, 1 и 4 суток путем сравнения усредненных за время измерения спектров вариаций ОА с нахождением максимумов (рис. 5). С помощью метода вейвлет-анализа по импульсным вейвлет-функциям Daubechies 5-го порядка получены периодичности 1, 4, 14 суток во временных рядах. Амплитуда колебаний с периодичностью 1 сутки увеличивается в середине и в конце исследуемого временного интервала.

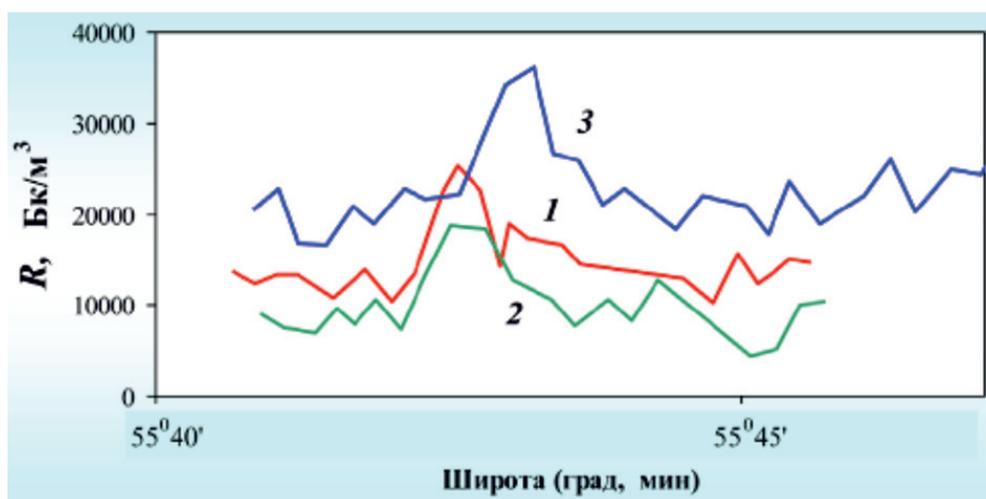


Рис. 1. Пространственные вариации ОА вдоль трех субмеридианных профилей, пересекающих Ногинскую тектоническую структуру (положение срединного участка отмечается наибольшей аномалией): средняя долгота: (1) – 38,3°E; (2) – 38,4°E; (3) – 38,5°E

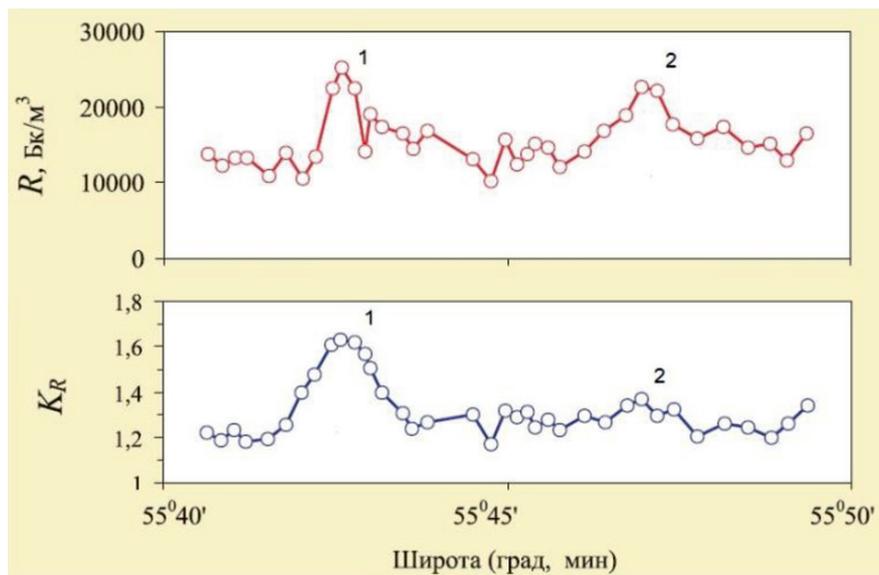


Рис. 2. Вверху – пространственные вариации ОА, внизу – относительный коэффициент приращения ОА вдоль субмеридианного профиля 1(38,3°E), пересекающего Ногинскую тектоническую структуру

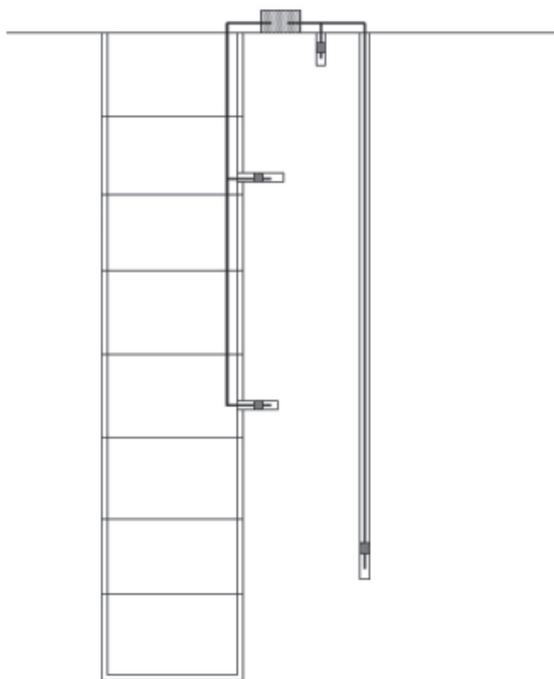


Рис. 3. Схема проведения измерений в зоне влияния Ногинской тектонической структуры в период с 21.05.2007 г. по 18.06.2007 г. на глубинах 0,8, 5,5, 9 и 11,5 м методом отбора проб воздуха в стабильных метеорологических условиях

По результатам эксперимента выяснено [7] (рис. 4).

3) изменение средних значений ОА радона с глубиной отличается от теоретической зависимости [3] (коэффициент диффузии = const, источник – на глубине) знаком второй производной (рис. 6).

С учетом того, что в изучаемом районе источники радона располагаются на глубине, то вынос радона на поверхность описывается уравнением нелинейной диффузии (D является функцией глубины) с конвективной составляющей (фильтрационное течение) от сосредоточенного источника на некоторой глубине.

Сформулирована и решена стационарная нелинейная задача по переносу радона в атмосферу в среде от сосредоточенного источника на некоторой глубине. Коэффициент диффузии радона зависит от глубины, скорость конвекции постоянна. Незвестной функцией является ОА радона N_n в зависимости от глубины, причем вторая производная этой функции предполагается меньше нуля. Считается известным параметр $\varepsilon = \frac{N_0}{N_\infty}$ – отношение ОА радона на поверхности к ОА на глубине (граничное условие).

Решение уравнение можно представить в виде

$$\left. \frac{N_n(z)}{N_\infty} \right|_t = 1 + (\varepsilon - 1) \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)^t, \quad (\alpha)$$

при этом зависимость коэффициента диффузии от глубины

$$a = -z_0 v \eta, \quad b = -z_0^2 \lambda \eta,$$

$$D(z) = D_t(z) = -\frac{b}{t(t+1)} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^2 - \frac{a}{t} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) + \frac{b}{t \cdot (1-\varepsilon)} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^{-(t-2)} + C \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^{-(t-1)},$$

где $t \leq 0$ и $t \geq 1$, C – постоянная, N_n – активность эманации ^{222}Rn радона ($\text{Бк}/\text{см}^3$); $\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \text{ (с}^{-1}\text{)}$ – постоянная распада ^{222}Rn ; η – пористость; v – скорость конвективного переноса в грунте ($\text{см}/\text{с}$); $z_0 = 200 \text{ м}$ – глубина источников радона.

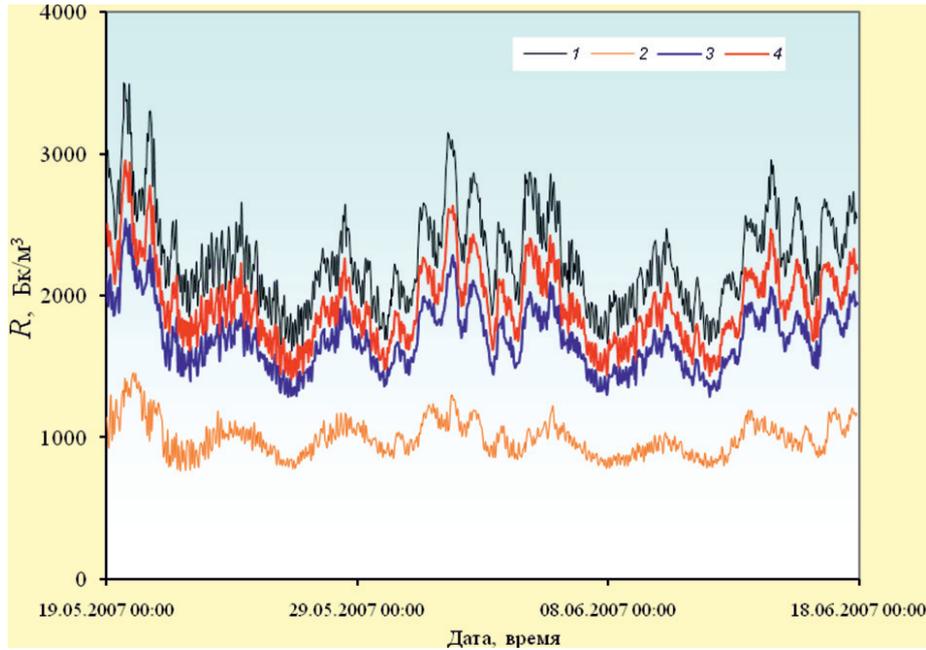


Рис. 4. ОА подпочвенного радона R на различных глубинах: (1) – 0,8 м, (2) – 5,5 м, (3) – 9 м, (4) – 11,5 м

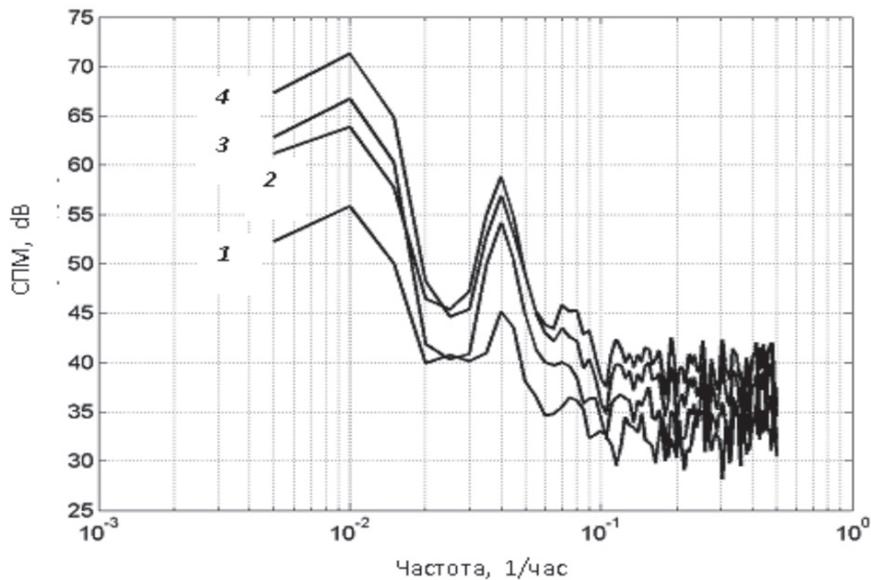


Рис. 5. Спектральная плотность мощности временных вариаций объёмной активности подпочвенного радона на различных глубинах: (1) – 0,8 м, (2) – 5,5 м, (3) – 9 м, (4) – 11,5 м

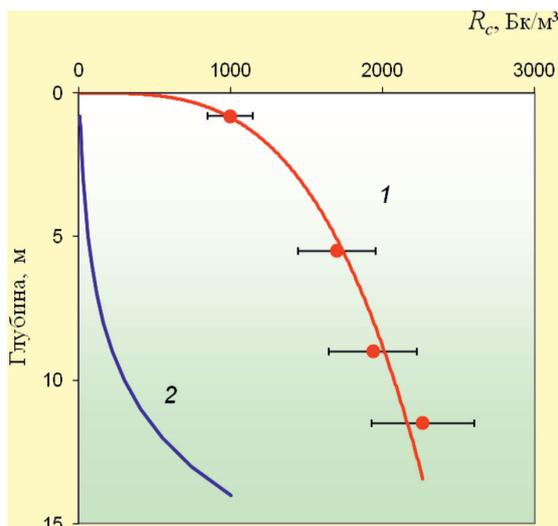


Рис. 6. Средние значения OA подпочвенного радона за время измерения с глубиной; 1 – эксперимент; 2 – модель (пористость – 0,05), коэффициентом диффузии 1,17 $\text{мкм}^2/\text{с}$, граничные условия – OA на поверхности равна нулю

Проведено сравнение теоретической модели с экспериментальными данными. В качестве основы для сопоставления выбрана модель от сосредоточенного источника на некоторой глубине с нелинейной диффузией и конвекцией (в районе проведения измерений отсутствуют значительные источники радона вплоть до глубины 200 метров). По экспериментальным точкам осуществлялась аппроксимация зависимостью вида

$$N_i = a_1 \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^t + b_1, \quad (\beta)$$

которая переходит в ранее полученную зависимость (α) при $a_1 = N_\infty \cdot (\epsilon - 1)$, $b_1 = N_\infty$.

С помощью нелинейного метода наименьших квадратов подбирались коэффициенты. Ввиду того, что уравнение (β) – линейное, а постоянных коэффициентов три, то для определения коэффициентов задавались их минимальные и максимальные значения. Получена серия зависимостей N от z с наиболее вероятными значениями a_1 , b_1 и t .

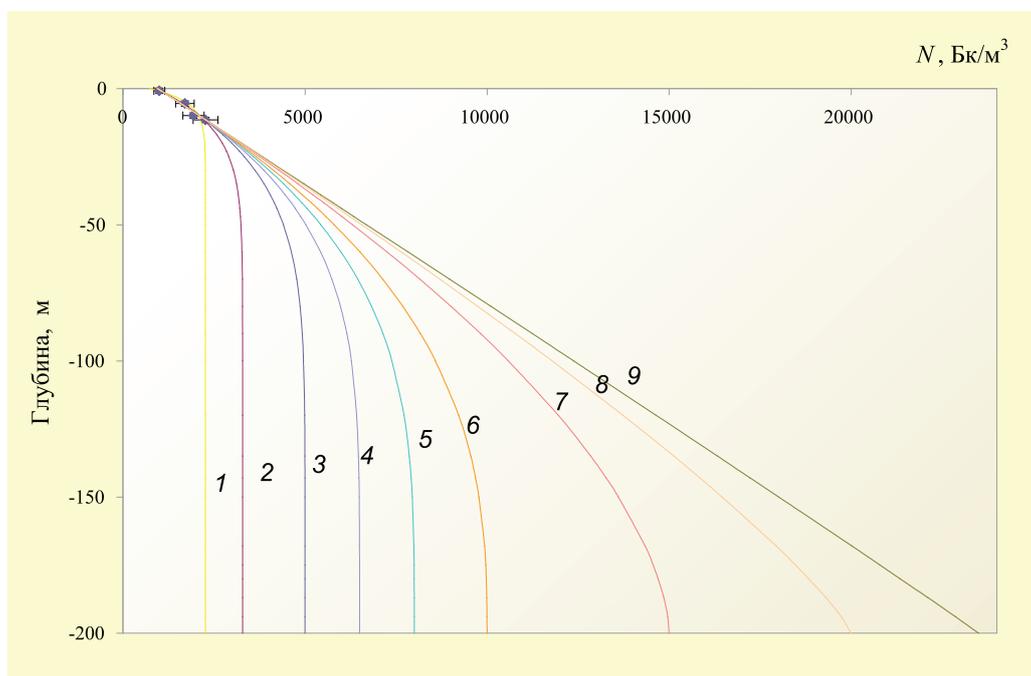


Рис. 7. Экспериментальные точки и аппроксимирующие функции вида $N_i = a_1 \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^t + b_1$;

- (1) $a_1 = -1533 \text{ Бк/м}^3$; $t = 41,00$; $b_1 = 2265 \text{ Бк/м}^3$; (2) $a_1 = -2411 \text{ Бк/м}^3$; $t = 13,86$; $b_1 = 3287 \text{ Бк/м}^3$;
 (3) $a_1 = -4082 \text{ Бк/м}^3$; $t = 6,70$; $b_1 = 5000 \text{ Бк/м}^3$; (4) $a_1 = -5569 \text{ Бк/м}^3$; $t = 4,62$; $b_1 = 6500 \text{ Бк/м}^3$;
 (5) $a_1 = -7062 \text{ Бк/м}^3$; $t = 3,52$; $b_1 = 8000 \text{ Бк/м}^3$; (6) $a_1 = -9056 \text{ Бк/м}^3$; $t = 2,67$; $b_1 = 10000 \text{ Бк/м}^3$;
 (7) $a_1 = -14050 \text{ Бк/м}^3$; $t = 1,67$; $b_1 = 15000 \text{ Бк/м}^3$; (8) $a_1 = -19050 \text{ Бк/м}^3$; $t = 1,21$; $b_1 = 20000 \text{ Бк/м}^3$;
 (9) $a_1 = -22540 \text{ Бк/м}^3$; $t = 1$; $b_1 = 23500 \text{ Бк/м}^3$

Таким образом, экспериментальным данным и выпуклости кривой, построенной по экспериментальным точкам, удовлетворяет довольно широкий диапазон значений как объемной активности на глубине расположения источников (до 23500 Бк/м^3) – N_∞ , так и t – степени изменения объемной активности с глубиной (от 1 до 41).

Выводы

Установлено, что средние значения и вариации ОА ^{222}Rn определяются расположением источников радона и средних участков тектонических структур и монотонно увеличиваются с глубиной. Доказано, что временные вариации на разных глубинах синхронны, что говорит о значительном вкладе в процесс переноса фильтрации и нелинейной диффузии. Предложена модель выноса на поверхность радона ^{222}Rn , в которой коэффициент диффузии радона зависит от глубины, а скорость фильтрации постоянна.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., Харламов В.А. Инструментальные наблюдения

за геофизическими полями Тункинской рифтовой зоны. Межгеосферные взаимодействия. Материалы семинара-сообщения в ИДГ РАН 26–27 сентября 2011 г. – Москва: ГЕОС, 2011. – С. 27–42.

2. Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе «земная кора-атмосфера» // Физика Земли. – 2006. – № 7. – С. 34–51.

3. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. – Ленинград: Недра, 1965. – 759 с.

4. Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. № 4. – С. 58–80.

5. Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Эманация природного радона на приповерхностных участках. Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер. Сборник научных трудов ИДГ РАН. – Москва: ГЕОС, 2007. – С. 40–47.

6. Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе «земная кора-атмосфера» // Физика Земли. – 2009. – № 2. – С. 34–48.

7. Спивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Особенности эманации радона ^{222}Rn с глубиной // Доклады Академии Наук. – 2008. – Том 420. № 6. – С. 1–4.

8. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. – 2015. Т. 51, № 4. – С. 58–80.

9. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. № 2. – С. 277–286.