

УДК 550.3; 550.4

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ЭМАНАЦИЮ РАДОНА В ТУНКИНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

Д.Ю. Болбот, Д.Н. Локтев, А.А. Спивак, В.А. Харламов

Приведены и обсуждаются результаты регистрации объемной активности природного радона-222 в подпочвенной атмосфере центральной части Тункинского рифта. Установлены основные периодичности вариаций радоновых эманаций. Получены корреляционные соотношения между временными вариациями объемной активности подпочвенного радона, изменениями силы лунно-солнечного прилива и барических вариаций в приземном слое атмосферы.

Введение

Исследование радоновых эманаций представляет значительный интерес по ряду причин:

1) Эманации ^{222}Rn указывают на наличие в недрах природных источников радия (радон относится к уран-радиевой радиоактивной серии и является результатом радиоактивных превращений урана-238). На этом основан широко применяемый на практике эманационный метод радиометрической разведки месторождений радиоактивных руд [Рудаков, 2009].

2) Пространственные распределения объемной активности подпочвенного радона хорошо отражают структуру земной коры, маркируя зоны повышенной проницаемости среды, которые, как правило, отождествляются с зонами нарушения ее сплошности (разломы и трещины разного масштаба). Действительно, при площадных измерениях аномально высокие эманации ^{222}Rn на отдельных участках земной коры в известных случаях¹ связаны с наличием каналов преимущественной миграции флюидов, что позволяет выполнять картирование, например, тектонических структур с их ранжированием по проницаемости [Спивак, 2009; Weisbrod et al., 2009].

3) Весьма важной представляется роль радоновых эманаций в качестве индикатора интенсивности газовых эманаций из недр вообще. Последнее связано с одним из механизмов миграции природного радона из глубины к свободной поверхности: весьма обоснованным представляется утверждение, что достаточно тяжелый радон (плотность – $9,73 \text{ кг/м}^3$) переносится путем захвата пузырьками водорода и метана, объем которых в составе эманлирующих из недр Земли газов значителен [Войтов и др., 2000; Рудаков, 2009].

4) Поступающий в атмосферу природный радон является основным естественным и фактически единственным ионизатором воздуха. Интенсивность радоновых эманаций напрямую определяет классический (нетурбулентный) электродный эффект, а, следовательно, – величину электрического поля в приземном слое атмосферы [Войтов и др., 2000; Шулейкин, 2006; Спивак, 2010].

5) Ввиду того, что интенсивность радоновых эманаций напрямую связана со степенью дробления среды, радоновые эманации представляют собой достоверный индикатор подготовки мощных геодинамических явлений, например, землетрясений [Уткин, 2000].

6) Немаловажным при постановке радоновых измерений является геоэкологический фактор, поскольку радон как радиоактивный инертный газ является одним из основных источников радиационной опасности.

Обобщая вышесказанное, можно констатировать, что радон представляет собой уникальный индикатор геодинамического состояния среды. При этом изменение поля радоновых эманаций всегда (хотя и с некоторой задержкой²) сопровождает из-

¹ Случай локальных интенсивных эманаций по разломным зонам отличается высокой реакцией объемной активности подпочвенного радона на внешние слабые возмущения в отличие от случаев повышенных эманаций, обусловленных концентрированными в пространстве мощными источниками либо близко расположенными к земной поверхности источниками невысокой интенсивности [Спивак и др., 2009].

² Величина задержки отклика поля радоновых эманаций зависит от конкретных условий: глубина залегания источника, свойства каналов миграции и т.д. (например, отклик на приливную деформацию происходит с задержкой от 1 до нескольких часов [Адушкин и др., 2006; Спивак, 2010].

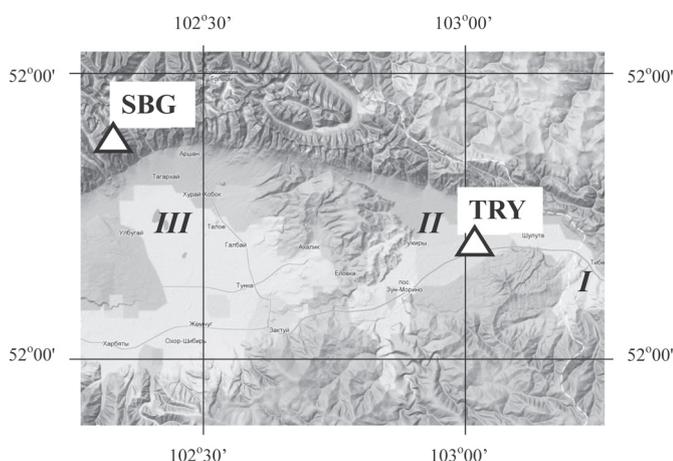


Рис. 1. Основные морфо-структурные элементы и расположение пунктов регистрации объемной активности подпочвенного радона (треугольники). Тункинская ветвь рифтовых впадин: *I* – Быстринская, *II* – Торская, *III* – Тункинская.

менения геодинамического режима среды, что позволяет рассматривать радоновые эманации также в качестве индикатора изменений структуры исследуемого участка земной коры, проницаемости каналов миграции газа и так далее, а также устанавливать отклик среды на внешние воздействия. Интенсивность радоновых эманаций из недр Земли определяется многими факторами, среди которых к основным можно причислить пористость (трещиноватость) и проницаемость среды, напряженно-деформированное состояние массива горных пород, атмосферное давление и т.д.

В настоящей работе изучалось влияние слабых возмущений земной коры в виде твердоприливной деформации и барических вариаций в атмосфере на особенности временных вариаций радоновых эманаций. Анализировались данные, полученные в результате регистрации объемной активности ^{222}Rn на двух участках Тункинско-го рифта Байкальской рифтовой зоны [Адушкин и др., 2011]. Измерения выполнялись в двух стационарно оборудованных пунктах TRY и SBG (рис. 1). Регистрация радоновых эманаций в пункте TRY, расположенном в центральной части Тункинско-го рифта в окрестности пос. Торы ($51^{\circ}48,6586' \text{ N}$; $103^{\circ}04,5499' \text{ E}$), выполнялась в период 5–23 августа 2009 г. Инструментальные наблюдения в пункте SBG, расположенном на выходах скального основания на северной окраине Тункинско-й впадины в окрестности пос. Субарга ($51^{\circ}54,46' \text{ N}$; $102^{\circ}20,89' \text{ E}$), выполнялись в период 6–27 июля 2010 г.

Различные геологические условия площадок TRY и SBG позволили помимо прочего установить отличия в реакции эманационного поля радона на внешние слабые возмущения на участках, один из которых (пункт TRY) характеризуется достаточно толстым слоем осадочных горных пород (300–500 м), а другой расположен в зоне интенсивной нарушенности, приуроченной к зоне влияния Тункинско-го разлома.

Результаты инструментальных наблюдений

Регистрация объемной активности подпочвенного радона выполнялась методом отбора проб с помощью автоматизированного радиометра радона PPA–01M–03. С целью исключения влияния температурных вариаций, пробы воздуха из подпочвенной атмосферы отбирались на глубине около 1 м. Измерения проводились один раз в час. В этом случае выбранная продолжительность перерыва между отборами

проб, согласно сделанным оценкам, не менее чем в 3 раза превышала время восстановления равновесного состояния подпочвенной атмосферы в точке пробоотбора.

В результате измерений были получены цифровые ряды данных по величине объемной активности подпочвенного радона R (рис. 2 и 3). Приведенные данные демонстрируют сильную изменчивость радоновых эманаций со временем. Резуль-

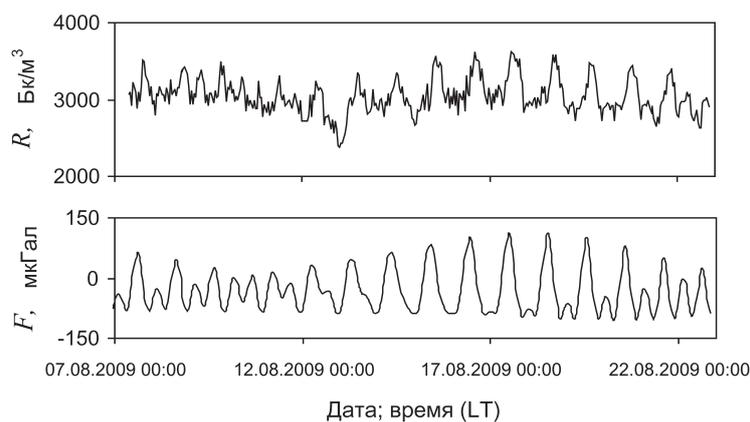


Рис. 2. Временные вариации объемной активности подпочвенного радона R в пункте TRY [Адушкин и др., 2011].

F – вертикальная составляющая приливной силы.

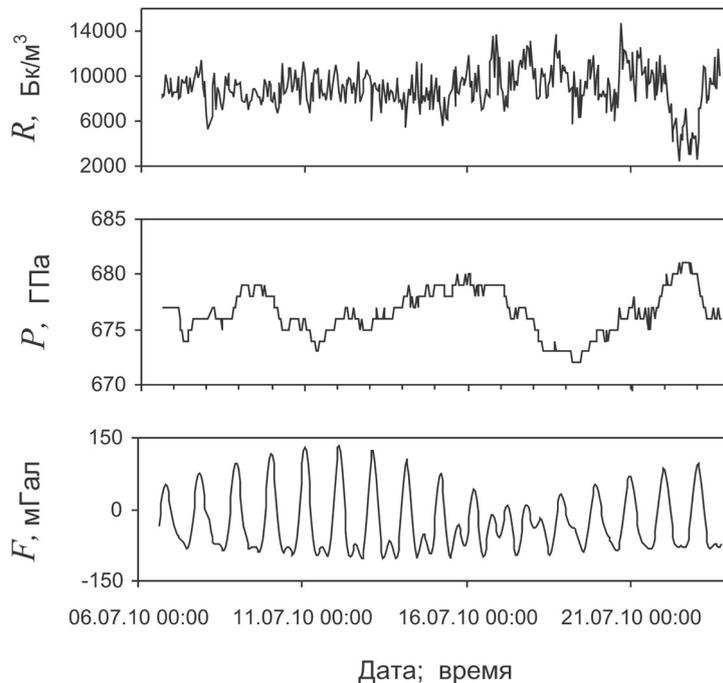


Рис. 3. Временные вариации объемной активности подпочвенного радона R в пункте SBR.

P – атмосферное давление; F – вертикальная составляющая приливной силы.

таты ранее выполненных исследований [Спивак и др., 2009; Clements, Wilkening, 1974] свидетельствуют о том, что наблюдаемые временные вариации с большой вероятностью связаны с изменением механических свойств среды (в частности, ее проницаемости) в результате приливной деформации и барических вариаций в приземном слое атмосферы.

На графиках рисунков 2 и 3 визуально прослеживается корреляция вариаций R с величиной приливной силы F (рис. 2) и вариациями атмосферного давления P (рис. 3). Более детальный анализ показывает наличие в спектрах вариаций объемной активности подпочвенного радона ярко выраженных пиков, соответствующих приливным волнам S_2 , M_2 и O_1 , и околосуточным периодам изменения атмосферного давления. В качестве иллюстрации на рисунках 4, 5 представлены соответственно взаимные спектры вариаций объемной активности подпочвенного радона и вертикальной составляющей приливной силы S_{RF} и объемной активности подпочвенного радона и атмосферного давления S_{RP} , рассчитанные с использованием данных,

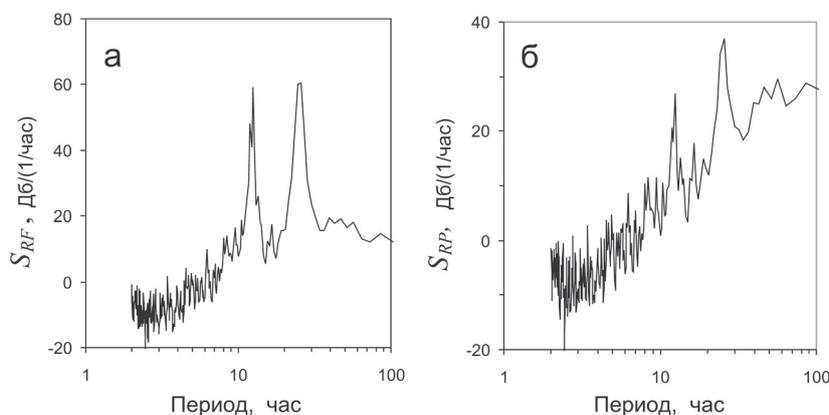


Рис. 4. Взаимные спектры вариаций объемной активности подпочвенного радона R и приливной силы F (а) [Адушкин и др., 2011], вариаций R и P (б) в пункте TRY.

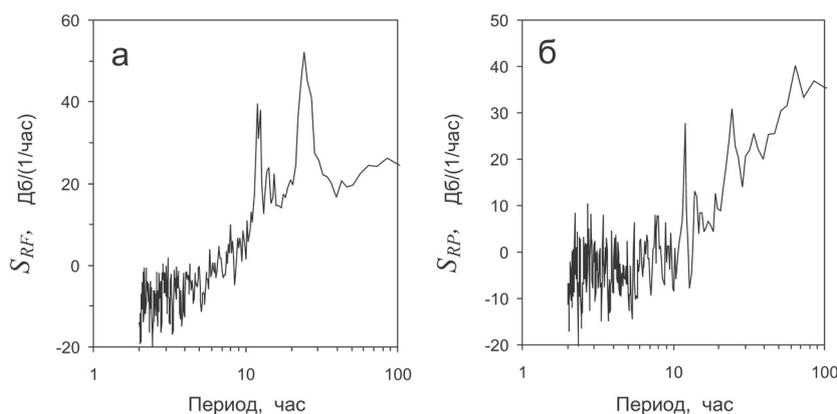


Рис. 5. Взаимные спектры вариаций объемной активности подпочвенного радона R и приливной силы F (а), вариаций R и P (б) в пункте SBG.

полученных в пунктах TRY (рис. 4) и SBG (рис. 5). Взаимные спектры оценивались путем перемножения комплексно сопряженных спектров вариаций радона с каждым из спектров вариаций: атмосферного давления и приливной силы.

Оценка спектров вариаций каждого из рассматриваемых рядов проводилась методом параметрической авторегрессии [Марпл, 1990]. Модель авторегрессии $AR(p)$ порядка p представляет в этом случае уравнение, предсказывающее k -тый член последовательности x по p ее предыдущим членам:

$$x(k) = \sum_{n=1}^p a_n x(k-n) + \varepsilon(k),$$

где a_n – коэффициенты регрессии (параметры модели порядка p); $\varepsilon(k)$ – белый шум.

Параметры модели $AR(p)$ -модели оценивались по методу Левинсона-Дурбина, реализующему решение уравнений Юла-Уолкера. Оценка AR спектра определялась по вычисленным значениям параметров a_n с помощью соотношения

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi \left| 1 + \sum_{n=1}^p a_n e^{-i\omega n} \right|^2},$$

где ω – циклическая частота.

Наличие совпадающих характерных периодичностей во временных вариациях объемной активности почвенного радона, приливной силы и атмосферного давления позволяет предполагать корреляцию между величинами R , F и P . Значения коэффициентов корреляции K_{RF} между вариациями R и F и K_{RP} между вариациями R и P , вычисленные со сдвигом между соответствующими рядами данных представлены на рисунках 6 и 7. Графики демонстрируют высокие значения коэффициентов корреляции между вариациями R и F при соответствующих временах сдвига, что свидетельствует о значимой корреляции между исследуемыми вариациями. Одновременно данные рисунков 6, 7 позволяют определять время запаздывания реакции эманационного поля радона в почвенной атмосфере на изменения приливной силы T_{RF} и барические вариации в атмосфере T_{RP} (Таблица).

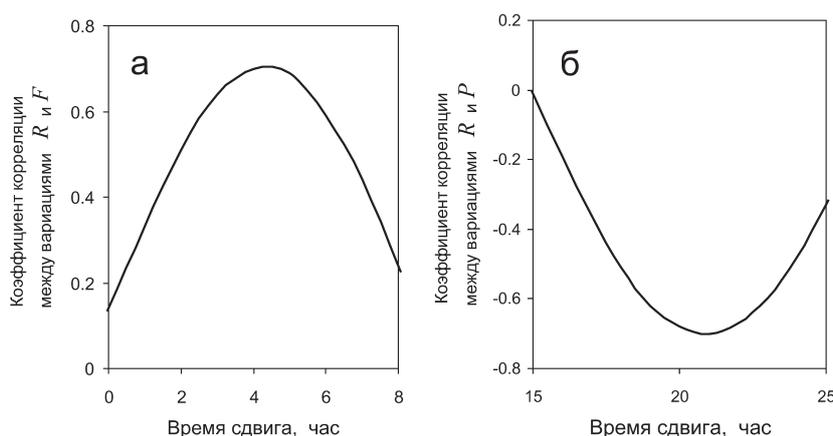


Рис. 6. Коэффициенты корреляции K_{RF} [Адушкин и др., 2011] и K_{RP} , полученные при обработке данных регистрации в пункте TRY.

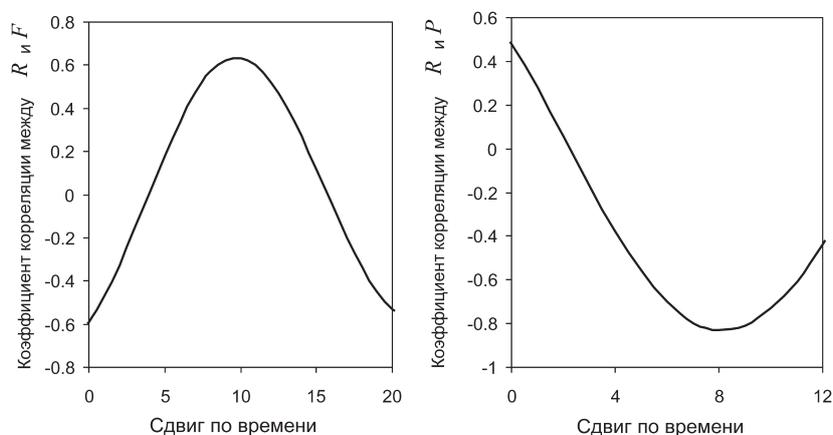


Рис. 7. Коэффициенты корреляции K_{RF} и K_{RP} , полученные при обработке данных регистрации в пункте SBR.

Таблица 1

Времена запаздывания реакции эманационного поля радона в подпочвенной атмосфере на изменения приливной силы T_{RF} и барические вариации в атмосфере T_{RP}

Пункт регистрации	T_{RF} , час	T_{RP} , час
TRY	4	21
SBG	5	8

Заключение

Результаты инструментальных наблюдений и их анализ свидетельствуют о существенном влиянии слабых воздействий в виде приливной деформации среды и барических вариаций в приземном слое атмосферы на интенсивность радоновых эманаций в Тункинской рифтовой зоне. При этом высокая корреляция между вариациями объемной активности подпочвенного радона, приливной силой и величиной атмосферного давления наблюдается как на срединном участке Тункинской впадины, характеризующейся мощным слоем осадочных пород, так и на окраинном участке, представленном выходом скальных горных пород.

Исследования выполнены по Программе 8 Отделения наук о Земле РАН «Взаимодействие геосфер: геофизические поля и массоперенос», при поддержке Совета по грантам при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-203.2012.5) и РФФИ (проект № 11-05-00096-а).

Литература

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.

Адушкин В.В., Спивак А.А., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., В.А. Харламов. Инструментальные наблюдения за геофизическими полями Тункинской рифтовой зоны // Межгеосферные взаимодействия. М.: ГЕОС, 2011. С. 27–42.

Войтов Г.И., Гусев А.С., Козлова Н.С., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н. Эманационные и электрические эффекты над сложно построенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) // Доклады академии наук. 2000. Т.3 70. № 1. С. 105–108.

Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.

Рудаков В.П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 176 с.

Спивак А.А., Кожухов С.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий // Физика Земли. 2009а. № 2. С. 34–48.

Спивак А.А. Особенности геофизических полей в разломных зонах // Физика земли. 2010. № 4. С. 55–66.

Уткин В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений // Соровский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 12. С. 64–70.

Шулейкин В.Н. Атмосферное электричество и физика земли. М.: ИПНиГ РАН, 2006. 159 с.

Clements W.E., Wilkening M.H. Atmospheric pressure effects on ²²²Rn transport across the Earth-air interface // J. Geophys. Res. 1974. Vol. 79. No. 33. P. 5025–5029.

Weisbrod N., Dragila M.I., Nachshon U., Pillersdorf M. Falling through the cracks the role of fractures in Earth-atmosphere gas exchange // Geophys. Res. Letters. 2009. Vol. 36. L02401, doi: 10.1029/2008GL036096.