

УДК 550.348+550.424.6+57.04

ДИНАМИКА РАДОНОВОЙ АКТИВНОСТИ В СВЯЗИ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ (НА ПРИМЕРЕ АЛТАЙСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ОБЛАСТИ)

© 2016 г. О.И. Аптикаева¹, А.В. Шитов²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск, Россия

В работе рассматриваются результаты мониторинга эманаций радона на территории г. Горно-Алтайск в связи с сейсмической активностью и вопросы их влияния на здоровье населения. Обнаружено, что в окрестностях разломной зоны на территории г. Горно-Алтайск уровень активности подпочвенного радона в 3–4 раза превышает аналогичный уровень, зарегистрированный в г. Москва. Отмечается неоднозначность поведения радона как предвестника сейсмического события. Одни аномалии радона по времени совпадают с моментами возникновения землетрясений, другие относятся к спокойным временным периодам. Наиболее тесной оказалась связь активности радона с землетрясениями, локализованными в афтершоковой области Чуйского землетрясения. Предполагается, что причиной этого может быть наличие сети флюидопроводящих каналов в пределах активного разлома между этой областью и пунктом наблюдения.

Ключевые слова: атмосферные процессы, геодинамические процессы, эманации радона, мониторинг, экология, ритмы, вейвлет-анализ.

Введение

Актуальность настоящего исследования определяется установленным влиянием радона на здоровье населения. Облучение от природных источников ионизирующей радиации вносит наибольший вклад в годовую эффективную дозу облучения населения России и других стран. Существует мнение, что доза облучения от радона составляет более 50 % среднегодовой дозы, получаемой людьми [United Nations..., 2000]. В Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областях, которые больше других пострадали от аварии на Чернобыльской атомной электростанции, облучение от естественных источников ионизирующего излучения составляет свыше 76.4 % среднегодовой дозы облучения [Стамат, Кормановская, 2008]. Имеются сведения, что в России на террито-

риях, где дозы облучения за счет природных источников превышают 10 мЗв/год, проживают не менее 1 млн человек [Романович, 2007].

Город Горно-Алтайск, наряду с другими радоноопасными районами Республики Алтай, является территорией с высокой плотностью потока радона, что актуализирует здесь проблемы его влияния на здоровье населения. Кроме того, в этом регионе после землетрясения 27.09.2003 г. магнитудой 7.5 наблюдается достаточно интенсивная активизация геодинамических процессов. В наших более ранних работах [Антикаева, Шитов, 2009; Шитов и др., 2013] приведены доказательства того, что в этом сейсмически активном регионе геодинамические процессы оказывают влияние на состояние здоровья людей, но механизм этого влияния неясен.

В настоящей работе рассмотрены результаты мониторинга эманаций радона на территории г. Горно-Алтайск, что в свете вышесказанного представляет интерес как с научной, так и с практической точки зрения.

О влиянии радона на здоровье человека

Радон-222 (далее – радон) и продукты его распада являются основным источником природного ионизирующего излучения для населения. Радон – это инертный, не имеющий запаха радиоактивный газ; он тяжелее воздуха в 7.5 раз.

Удельная радиоактивность воздуха по радону внутри помещения в среднем выше, чем в наружном воздухе. Радон поступает в помещение, главным образом просачиваясь через фундамент и пол, а также выделяясь из материалов, которые использовались для изготовления строительных конструкций. Применение строительных материалов с высокой удельной радиоактивностью приводит к повышению концентрации радона в воздухе помещения.

В воздухе радон распадается по наиболее опасному альфа-типу с образованием короткоживущих изотопов полония, которые, сталкиваясь с мелкими пылинками, образуют радиоактивные аэрозоли.

Радон считается второй по значимости причиной рака легких после курения [Болотова и др., 2004; Бутаев и др., 2006]. В работе [Alharbi, Abbady, 2013] отмечается существование статистически значимой корреляции между концентрацией радона в воздухе и смертностью от рака легких. В ходе исследований, проведенных по инициативе Всемирной организации здравоохранения (World Health Organization, WHO) [WHO..., 2009], было установлено, что доля рака легких, вызванного ингаляциями радона, составляет в различных странах от 3 до 14 % в зависимости от средних концентраций радона в воздухе и методов расчета.

Недавние исследования продемонстрировали, что существует реальная вероятность заболевания раком даже при нахождении в помещении с умеренной концентрацией радона в воздухе [Аппех Е..., 2006]. В связи с большим периодом полураспада радон выдыхается почти полностью, а продукты его распада, прежде всего ^{218}Po и ^{214}Po (с короткими периодами полураспада), являются источниками альфа-частиц, которые могут взаимодействовать с биологической тканью легких и приводить к повреждению ДНК [Abd El-Zaher, 2011]. Кроме того, в работе [Bergman et al., 1986] показано, что присутствие сигаретного дыма даже при умеренных концентрациях радона в воздухе помещения увеличивает риск заболевания раком более чем вдвое.

Для того чтобы ограничить воздействие радона на популяцию в целом, в странах ЕС была установлена предельно допустимая концентрация радона в помещениях 400 Бк/м^3 [Commission..., 1990]. В Италии власти приняли допустимый уровень концентрации радона равным 400 Бк/м^3 для уже построенных домов и 200 Бк/м^3 для строящихся зданий [Pugliese et al., 2013]. В домах, где концентрация радона в воздухе выше, предполагаются мероприятия по ее уменьшению. В ряде стран ведутся работы по измерению концентрации радона в жилых и производственных помещениях, при этом даже в развитых странах обнаруживается совсем не радужная картина. На о. Искья (Южная Италия), например, только 74 % жилищ соответствует нормам по концентрации радона в воздухе [Pugliese et al., 2013]. Отметим, что в нашей стране при проектировании, строительстве и вводе в эксплуатацию зданий жилого, общественного и промышленного назначения нормами радиационной безопасности (НРБ-99) предусмотрено, что среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не должна превышать 100 Бк/м^3 .

Как оказалось, население многих стран не знакомо с действием радона на организм человека. Например, при опросе населения в г. Эр-Рияд (Саудовская Аравия) было установлено, что около 82 % жителей даже не слышали о вреде радона для здоровья [Alaamer, 2012].

Большое число работ отечественных и зарубежных ученых посвящено изучению основных источников радона и механизмов его поступления в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу (см., например, работы [Уткин, 1997а, б; Паровик и др., 2006; Soliman, Saddig, 2013; Шулейкин, 2013а, 2014]). Многие исследователи считают, что почва или земля под зданиями являются наиболее важными источниками радона в жилищах по сравнению со строительными материалами и бытовой водой из пробуренных скважин. Существуют и другие мнения, например, что радон, содержащийся в воде и удобрениях, также может оказывать влияние на окружающую среду [Dheya et al., 2010; Kadi, 2010; Kadi, Al-Eryani, 2012].

Таким образом, тематический спектр работ, посвященных радону, очень широк. Отметим среди них работы [Pugliese et al., 2013], в которой обнаружена статически значимая корреляция между концентрацией радона и уровнем пола над поверхностью земли (на первых этажах зданий концентрация радона выше, чем на следующих), и [Soliman, Saddig, 2013], где показано, что такое доступное любому жителю профилактическое мероприятие, как проветривание помещения, позволяет заметно уменьшить концентрацию радона. Подобные исследования необходимы как с просветительской точки зрения, так и для разработки программ и мероприятий, направленных на уменьшение риска для жизни и здоровья населения. В зданиях с концентрацией радона в воздухе, превышающей ПДК, проводятся дополнительные детализационные работы по обнаружению источников поступления радона (почва или строительные материалы). После установления причин повышенного содержания радона внутри жилых помещений принимаются меры по их устранению. В случае поступления радона из почвы (почвенный радон), например, – это дополнительное изолирование подвальных помещений от грунта (бетонирование полов), при экскаляции радона из строительных конструкций – покрытие их герметизирующим составом [Уткин, 2000].

В настоящее время существует два основных подхода к исследованиям в области радоноопасности и оценке радонового риска – геологический и радиационно-

гигиенический [Уткин, 2000]. Сторонники первого подхода утверждают, что основной информацией, необходимой для определения радоноопасности, являются данные об объемной активности почвенного радона, проницаемости почвы, наличии тектонических разломов, радоновых подземных вод и т.п. Для сторонников радиационно-гигиенического подхода характерна ориентация на проведение массовых измерений объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений, при этом геологическая информация, как правило, имеет вспомогательный характер.

По мнению авторов настоящей статьи, несмотря на то, что определяющим критерием радоноопасности для населения является повышенная концентрация радона внутри помещений, границы радоноопасных зон в отдельных регионах должны быть установлены на основе геологических параметров. Нам представляется, что изучение геологической обстановки на предмет радонового риска должно быть одной из первоначальных задач решения радоновой проблемы.

На настоящий момент хорошо известна динамика эманации радона из почвы под влиянием изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, в частности в процессе подготовки землетрясений [Рудаков, 1992]. Этот механизм послужил основой для разработки эффективного метода прогнозирования землетрясений и горных ударов по результатам мониторинга концентрации радона (^{222}Rn) в почвенном воздухе [Рудаков, 1992, 2009; Макаров и др., 2012; Шулейкин, 2013б; Широков и др., 2014; Фирстов и др., 2014, 2015].

Район исследований

Согласно карте радоновой опасности России [Уткин, 1997а, б], на значительной территории Республики Алтай радиационная обстановка является напряженной. По данным радиологической лаборатории Роспотребнадзора, средневзвешенная объемная концентрация радона в воздухе в республике с учетом данных 2005–2006 гг. составила 258 Бк/м^3 . При этом 60 % радиационной дозы облучения, получаемой ежегодно среднестатистическим жителем республики от природных источников и медицинских процедур, формируется за счет радона.

Результаты измерения объемной активности радона (ОАР) по административным районам Республики Алтай [Гвоздарев, 2006] свидетельствуют о сильной пространственной дифференциации ее значений. К радоноопасным территориям относятся, преимущественно, площади развития «молодых» гранитов и дренирующих их разломных структур. В пределах этих структур выявлено большое количество радоносодержащих источников, эманационных аномалий в почвах, почвообразующих породах и природных водах. В то же время повторные измерения указывают на существование заметных временных вариаций ОАР даже в течение короткого (несколько дней) промежутка времени.

В центральной части г. Горно-Алтайск, где на поверхность выходят рыхлые четвертичные отложения, уровень активности радона относительно невысок. Превышающие предельно-допустимые нормы концентрации радона наблюдаются вблизи разломов, а также в жилых районах, расположенных на возвышенностях, где высокие значения ОАР могут быть связаны с имеющимися здесь интрузивными образованиями различных систем (рис. 1).

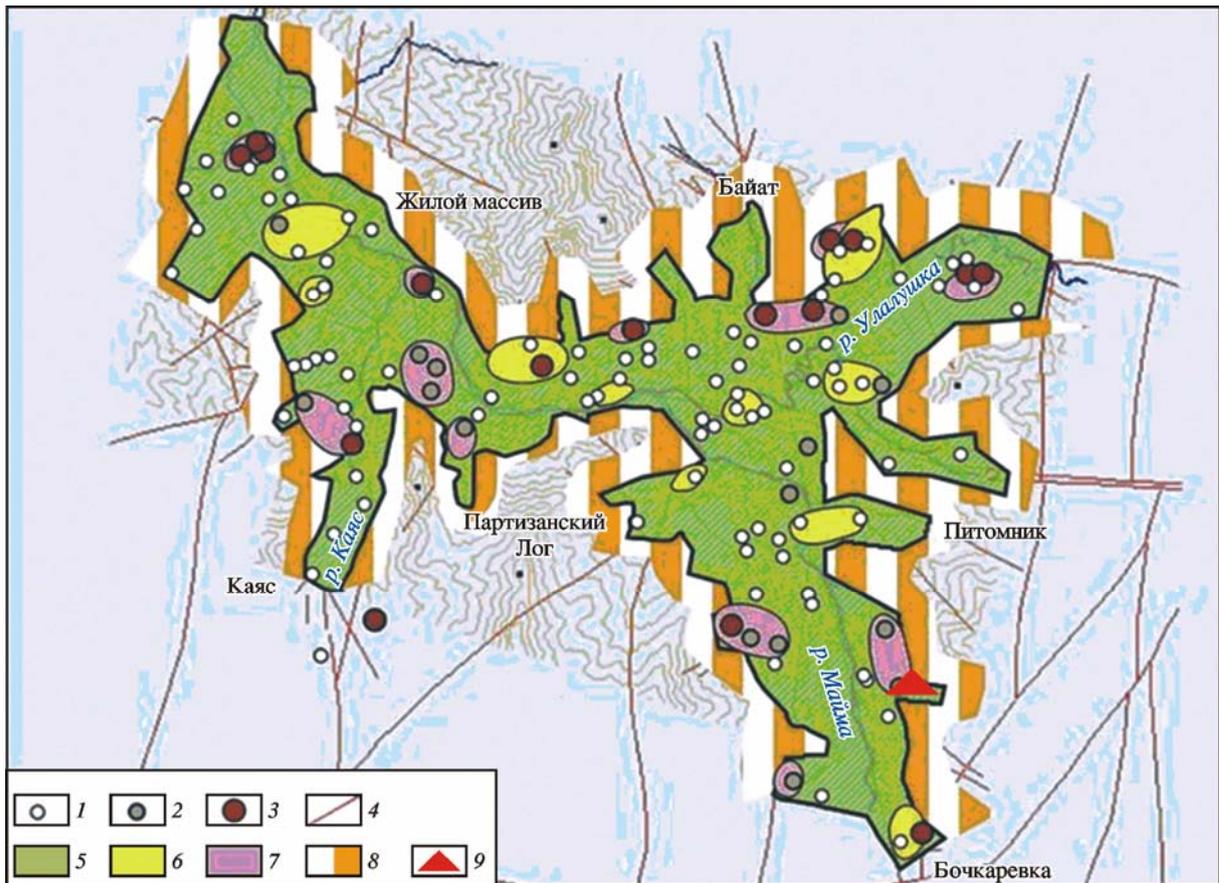


Рис. 1. Схема радоноопасности г. Горно-Алтайск (по данным ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по Республике Алтай» за 1997–2004 гг. URL: <http://ekologia-ra.ru/radioekologicheskaya-obstanovka/>)

1–3 – объемная активность радона в пунктах измерений, Бк/м³: 1 – < 200; 2 – 200–400; 3 – > 400; 4 – разломы; 5–7 – участки с активностью радона, Бк/м³: 5 – < 100; 6 – 100–200; 7 – > 200; 8 – потенциально радоноопасные склоны долины р. Майма и ее притоков; 9 – пункт наблюдения

Использованные данные

В настоящей работе анализировались ряды значений ОАР, зарегистрированных сейсмической радоновой станцией СРС-05 [Сейсмическая..., 2009] с интервалом 22 мин в разломной зоне в черте г. Горно-Алтайск в течение ноября 2012 г. – мая 2014 г. Параллельно контролировались температура (T) и относительная влажность (RH) воздуха и атмосферное давление (P). Согласно схеме радоноопасности (см. рис. 1), значения ОАР в месте размещения станции составляют более 200 Бк/м³. Выбор в качестве точки наблюдения разломной зоны неслучаен. Радон в недрах Земли распространен крайне неравномерно. Наиболее интенсивны его эманации в кислых интрузивных массивах с развитой трещиноватостью и сетью тектонических разломов [Сорокин, Яценко, 2000]. С целью повышения чувствительности радонового метода мониторинг стараются производить в местах наличия глубинных высокоактивных источников радона.

Большую часть времени наблюдения проводились в помещении с бетонным полом и только в течение короткого временного интервала (03–19.08.2012 г.) в том же месте измерялись вариации подпочвенного радона на глубине 40 см.

Помимо эманаций радона, станция СРС-05 способна регистрировать и эманации торона, изучение которых также представляет интерес. В нашем случае в связи с тем, что в воздухе помещения с бетонным полом активность торона чрезвычайно низка, вариации активности торона не рассматриваются.

Временные вариации радона

При наблюдениях в полевых условиях временные вариации ОАР характеризуют в первую очередь изменчивость фильтрационных свойств среды или каналов миграции радона в результате деформационных процессов, например сезонных волн деформаций [Рудаков, 1992] или лунно-солнечных приливов [Хитаров, Войтов, 1982]. Разуплотнение среды при этом приводит к увеличению ее проницаемости и росту объема радона, поступающего в подпочвенную атмосферу. Кроме того, активность радона растет еще и за счет увеличения скорости фильтрации газа. Помимо деформационных процессов, на поведение объемной активности радона оказывают влияние атмосферные, в том числе и циклонические, процессы [Стивак, 2008].

Как уже отмечалось, наблюдения за вариациями подпочвенного радона проводились на глубине 40 см в августе 2012 г. (рис. 2, а). Как видно из приведенных на рисунке

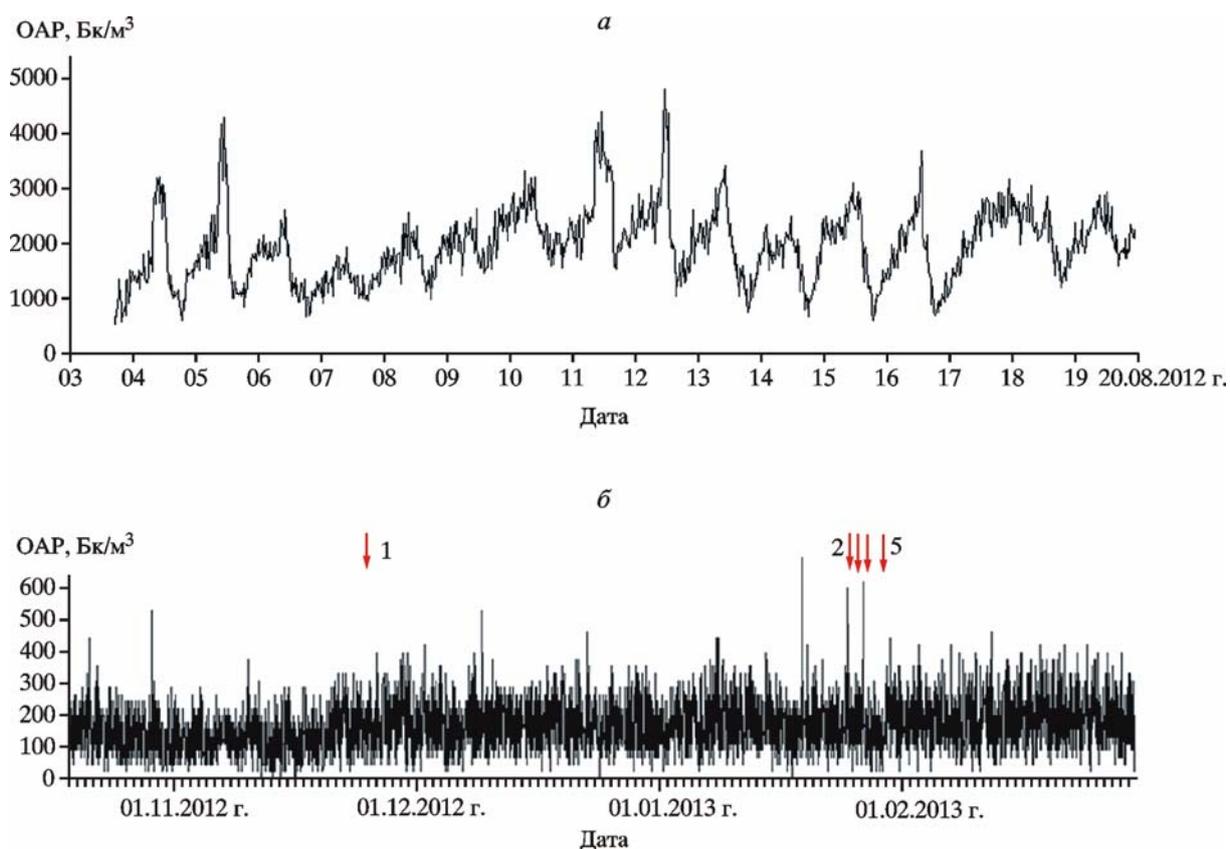


Рис. 2. Ход объемной активности подпочвенного радона (а) и радона в воздухе помещения (б) в пределах разломной зоны в черте г. Горно-Алтайск
1, 2, 5 – землетрясения (см. таблицу)

данных, уровень активности радона довольно высок и варьирует от ~500 до ~5000 Бк/м³ (в основном за счет суточных вариаций). В рамках интервала наблюдений максимального уровня эманации радона достигали в первой половине суток, чаще всего в период 8–13 ч. Отметим, что уровень активности подпочвенного радона в г. Москва в августе 2008 и 2009 гг. варьировал от 130 до 1300 Бк/м³ [Антикаева и др., 2010]. В работе [Alharbi, Abbady, 2013] проводится сравнительный анализ активности радона на разных глубинах (от поверхности до глубины 60 см) в 12 различных пунктах Саудовской Аравии. Оказалось, что на поверхности активность радона в 1.5–3 раза ниже, чем на глубине 40 см, где в разных пунктах наблюдения она варьирует в пределах 100–200 Бк/м³.

В нашем случае активность подпочвенного радона в 3–4 раза выше, чем в г. Москва и существенно выше, чем в Саудовской Аравии. В воздухе помещения же значения ОАР в среднем не превышают 400 Бк/м³, что заметно меньше, чем можно было бы ожидать с учетом ослабления активности радона по мере уменьшения глубины (рис. 2, б). Это означает, что мероприятия по ослаблению потока радона из почвы в помещение принесли свои плоды.

В структуре временных рядов концентрации подпочвенного радона, зарегистрированной нами ранее в г. Москва [Антикаева и др., 2010], присутствовали ритмы с периодами около 3 и 8–9 ч, 0.5, 1 и 4 сут, 1 и 2 нед., 1 и 3 мес. В связи с наличием характерных ритмов в структурах временных рядов объемной активности радона и некоторых внешних факторов возникает вопрос об их природе и взаимосвязи, а также о чувствительности объемной активности подпочвенного радона к внешним воздействиям геодинимической, циклонической и техногенной природы в условиях городов.

Рассмотрим структуру вариаций активности подпочвенного радона, а также температуры и относительной влажности воздуха и атмосферного давления, зарегистрированных в полевых условиях в зоне разлома в черте г. Горно-Алтайск. Частота цифровки – ~65 отсчетов в сутки – позволяет судить о короткопериодных ритмах этих вариаций (рис. 3, а). Для всех временных рядов, кроме ряда атмосферного давления, характерны полусуточные и суточные ритмы. Наблюдения продолжались немногим более двух недель, что не позволяет с уверенностью говорить о существовании более длиннопериодных (например, 8-суточных) ритмов, которые отчетливо видны на спектрах этих вариаций.

Суточный и полусуточный ритмы присутствуют также в вариациях ОАР и метеопараметров, зарегистрированных в помещении (рис. 3, б), но они выражены заметно слабее.

Известно, что ход суточных и сезонных температур и влажности, а также вариации атмосферного давления сильно влияют на кинетику газов в почвах и подпочвах, нарушая тем самым режим поступления радона в почвы, подпочвы и приземную атмосферу [Войтов, 1998]. Чтобы понять, насколько в нашем случае кратковременные вариации температуры и влажности влияют на вариации ОАР и можно ли пренебречь этим влиянием или необходимо каким-то образом учесть его, мы рассмотрели поведение скользящего коэффициента корреляции (R) атмосферных параметров и ОАР (рис. 4).

Как видно из хода кривых на рис. 4, взаимная корреляция атмосферных факторов и эманаций радона в полевых условиях более выражена, чем для тех же параметров, зарегистрированных в помещении. В этой связи ряды активности подпочвенного радона, по-видимому, необходимо скорректировать. Влияние суточных и полусуточных вариаций температуры и влажности на активность радона, зарегистрированную в полевых условиях, в какой-то степени компенсирует фильтрация суточного и полусуточ-

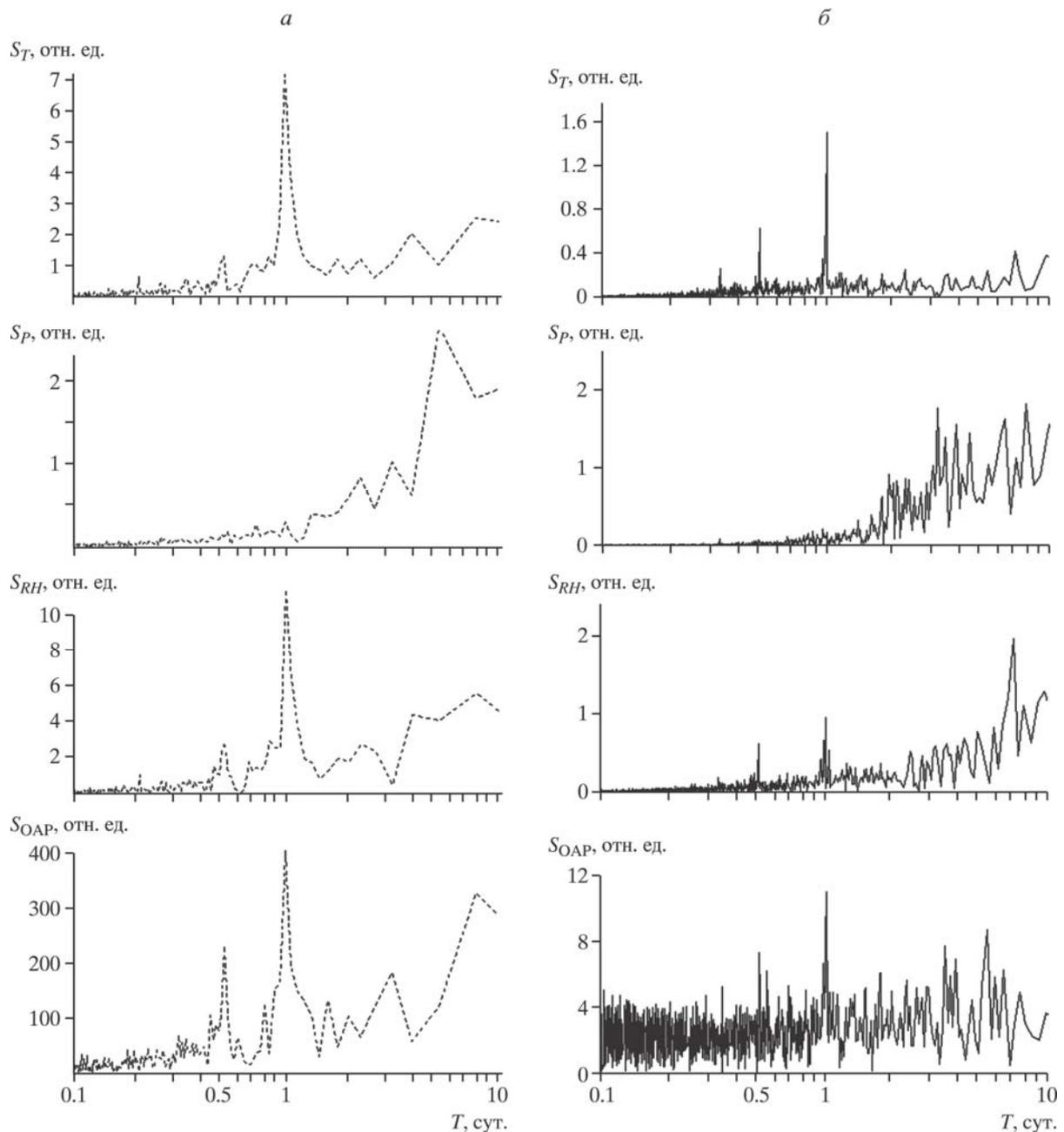


Рис. 3. Амплитудные спектры вариаций температуры, атмосферного давления, влажности и объемной активности радона, зарегистрированные вне (а) и внутри (б) помещения

ного компонента. Зависимость от колебания атмосферного давления, как отмечалось в работе [Войтов, 1998], можно уменьшить введением функции взаимной корреляции, представляющей тренд в виде интерполяционного многочлена n -го порядка по минимуму среднеквадратичной ошибки $\sum_i^n [f(t_i) - R(t_i)]^2 = \min$, где $f(t_i)$ – данные наблюдений на отрезке времени $(t_1 \dots t_n)$; $R(t_i)$ – интерполяционный многочлен n -го порядка. Результат этих преобразований показан на рис. 5. Воздействие кратковременных вариаций метеопараметров на динамику ОАР в помещении сочтем несущественным.

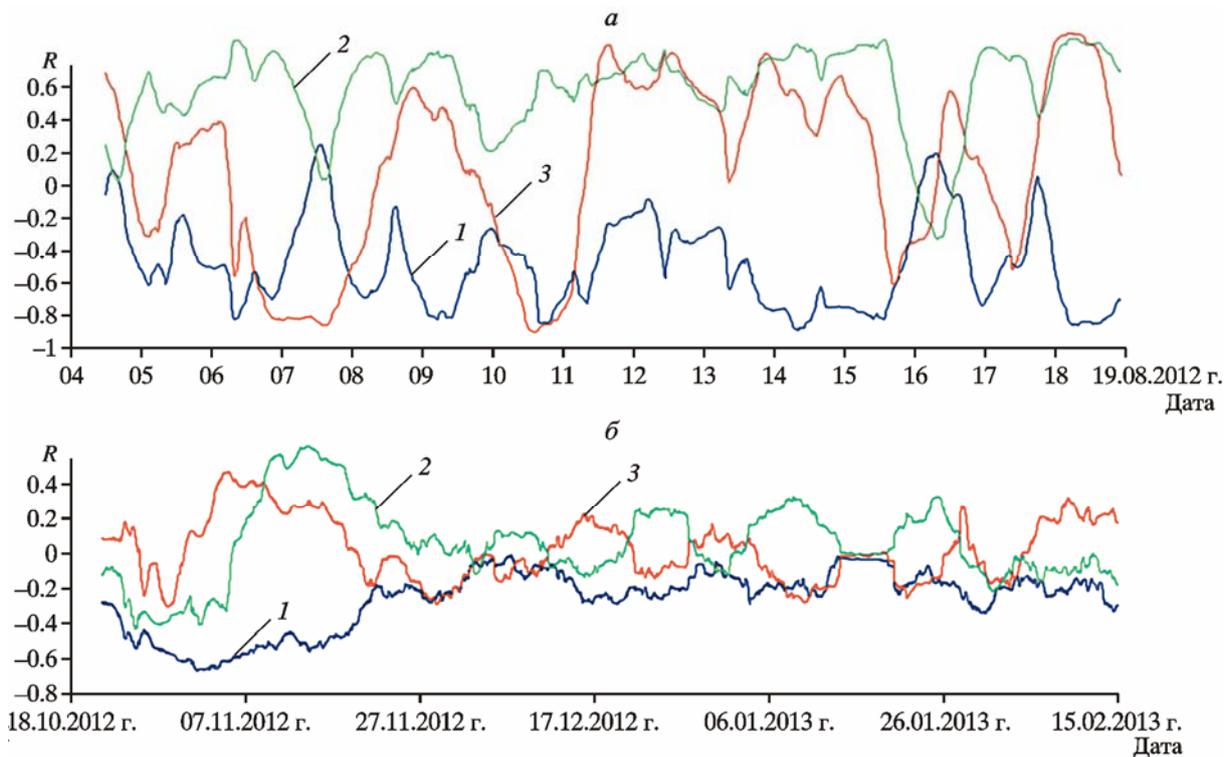


Рис. 4. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) ряда объемной активности радона и рядов температуры (1), влажности (2), атмосферного давления (3), зарегистрированных вне (а) и внутри (б) помещения

Частота опроса – 65 отсчетов/сут; скользящее временное окно – 1.5 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0.01 – $r_{кр} = 0.1$

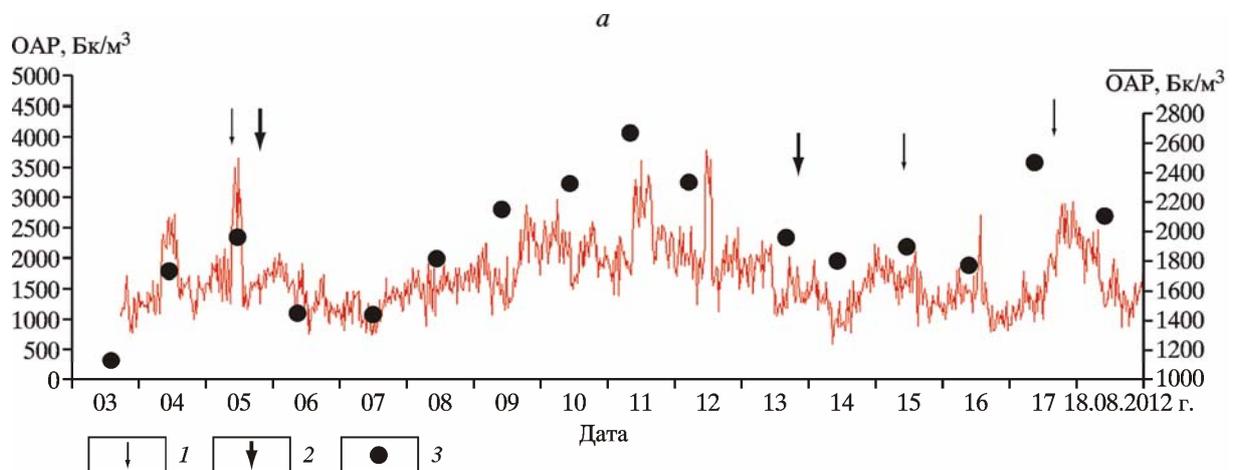


Рис. 5. а. Ход содержания подпочвенного радона за период наблюдений после фильтрации суточным и полусуточным режекторными фильтрами и компенсации влияния атмосферного давления

1–2 – моменты возникновения ближайших к пункту наблюдения землетрясений за рассматриваемый период: 1 – с $K < 13$; 2 – с $K = 13$; 3 – среднесуточные значения ОАР.

б. Схема расположения ближайших к пункту наблюдения эпицентров землетрясений с $K \leq 13$, произошедших за период наблюдений

Поведение активности радона в моменты возникновения землетрясений

Известно, что радон является природным индикатором геодинамических процессов, тонко реагирующим на изменение напряжений в земной коре и фильтрационных свойств подпочвенных пород в сейсмически активных и сейсмоопасных зонах. Возникновение в рядах объемной активности радона резких изменений или трендов в моменты подготовки и реализации землетрясений могут рассматриваться как признак их взаимосвязи.

Многочисленные работы, посвященные изучению радоновых эманацій в прогнозных целях, с большей или меньшей степенью наглядности демонстрируют наличие аномальных изменений активности радона в моменты возникновения землетрясений [Уломов, Мавашев, 1967; Мавлянов, Уломов, 1976; Zoran, 1979; King Chi-Yu, 1980; Зубков, 1981; Сидорин, 1992; Войтов, 1998; Уткин, 2000; Фирстов, Рудаков, 2003; Уткин и др., 2006]. Примеры таких изменений в рядах активности подпочвенного радона в разломной зоне, расположенной в черте г. Горно-Алтайск, приведены на рис. 5. Как видно из приведенных на рис. 5 данных, некоторые аномалии радона по времени совпадают с моментами возникновения землетрясений, другие – относятся к периодам, когда в радиусе более 500 км вокруг г. Горно-Алтайск не было сколько-нибудь сильных событий. Налицо неоднозначное поведение радона как предвестника сейсмического события. Сглаженный среднесуточный ход радона отмечен тремя аномалиями, две из которых совпадают по времени с моментами возникновения ближайших к пункту наблюдения землетрясений с $M = 4.4$, а третья – предшествует (со сдвигом 2 сут) моменту возникновения удаленного землетрясения с $K = 13.0$. Более слабое удаленное землетрясение 15.08.2012 г. аномалией ОАР не отмечено.

В течение временного интервала, которому соответствует несглаженный ряд активности радона в воздухе помещения (см. рис. 2, б), произошло 5 землетрясений с $K \geq 10$. Их эпицентры локализованы в небольшой зоне – области максимального сгущения эпицентров (таблица, рис. б). Отметим, что эта область совпадает с афтершоковой областью

Параметры землетрясений, произошедших на территории Республики Алтай с 24.11.2012 г. по 30.04.2014 г. в области, совпадающей с афтершоковой областью Чуйского землетрясения 2003 г. (см. рис. б)

№ п/п	Дата	Координаты		K
		в.д., град.	с.ш., град.	
1	24.11.2012 г.	87.71	50.13	10.5
2	24.01.2013 г.	87.73	49.87	13.4
3	25.01.2013 г.	87.84	49.80	10.5
4	26.01.2013 г.	87.66	49.83	10.6
5	28.01.2013 г.	87.66	49.83	10.6
6	03.03.2013 г.	87.70	50.09	10.5
7	30.04.2013 г.	87.57	50.20	12.5
8	22.05.2013 г.	87.80	50.18	10.7
9	22.06.2013 г.	87.41	50.50	10.4
10	28.06.2013 г.	87.70	50.12	12.5
11	10.10.2013 г.	87.64	49.42	10.48
12	20.12.2013 г.	87.77	50.22	10.48
13	25.03.2014 г.	87.58	50.41	11.56
14	06.04.2014 г.	87.81	50.33	10.48
15	07.04.2014 г.	87.94	50.15	10.12
16	18.04.2014 г.	87.49	50.15	13.18
17	30.04.2014 г.	87.67	49.84	11.2

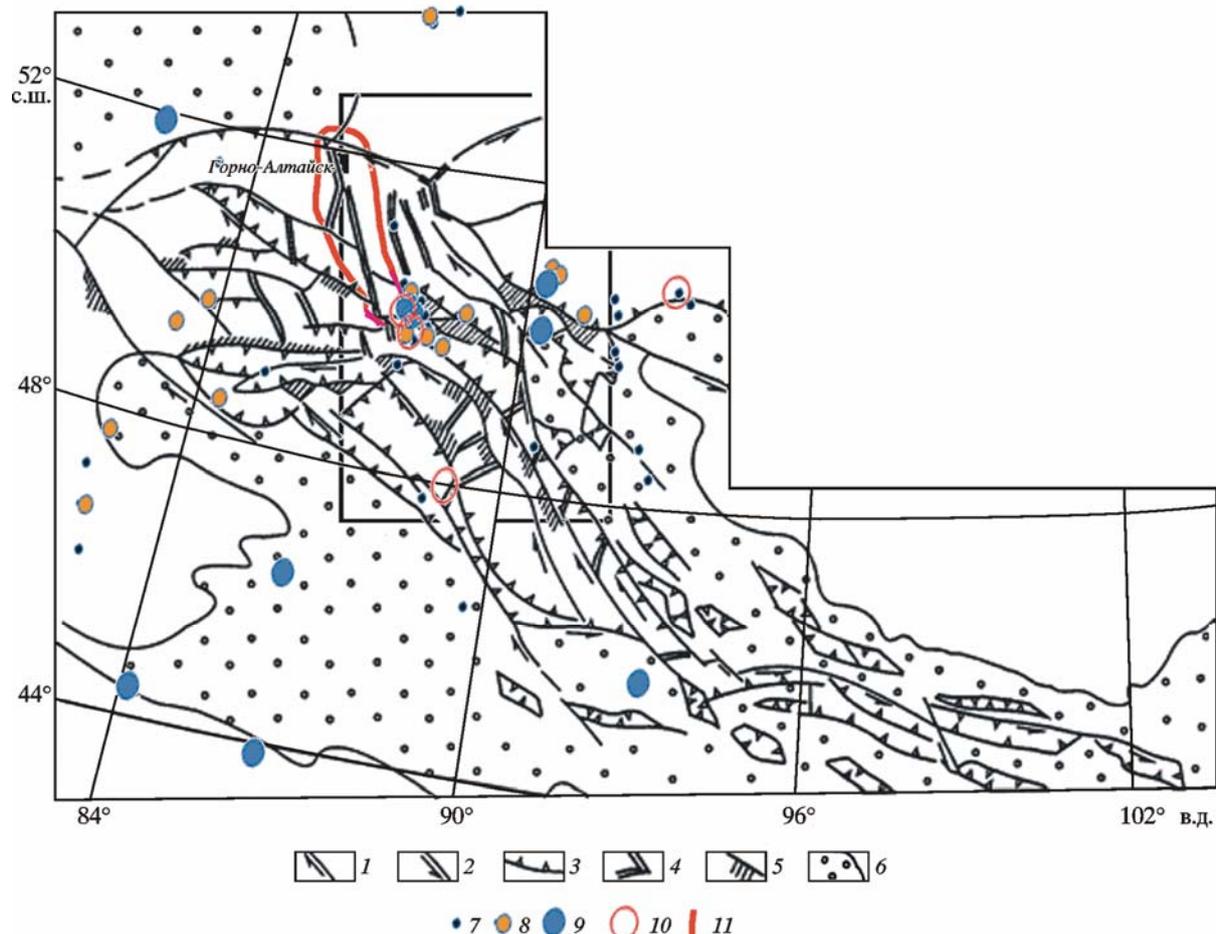


Рис. 6. Тектоническое строение района исследований и положение эпицентров землетрясений, которые произошли с 19.10.2012 г. по 09.05.2014 г.

1 – правые сдвиги; 2 – левые сдвиги; 3 – взбросы и надвиги; 4 – сбросы и раздвижки; 5 – приразломные впадины; 6 – впадины в пределах блоков (микроплит) обрамления; 7–10 – эпицентры землетрясений различной мощности: 7 – 10 $< K \leq 11$; 8 – 11 $< K \leq 12$; 9 – 12 $< K \leq 13$; 10 – $K > 13$; 11 – граница области повышенной плотности очагов радонопроявлений

Чуйского землетрясения 2003 г. Как и в случае подпочвенного радона, однозначного соответствия между ходом активности радона в воздухе помещения и моментами возникновения землетрясений установить не удастся. Если серия из четырех землетрясений отмечена несколькими пиками ОАР, то одиночное землетрясение в вариациях активности радона никак не выражено. Вместе с тем на вейвлет-диаграмме, соответствующей длинным периодам (рис. 7, а), моменты возникновения как одиночного землетрясения, так и серии землетрясений характеризуются возмущением радонового поля, перестройкой его ритмической структуры, дрейфом преобладающих ритмов в сторону длинных периодов. В то же время на вейвлет-диаграмме в диапазоне более коротких периодов (рис. 7, б) наблюдается ослабление (вплоть до исчезновения) суточного ритма. Таким образом, располагая результатами вейвлет-анализа, можно с большей уверенностью выделять интервалы возмущения радонового поля, связанные с возникновением землетрясения. Говорить же о поведении суточного ритма температуры и влажности при условии их регистрации в помещении недостаточно корректно. Однако уместно отметить, что перед сильными землетрясениями наблюдается ослабление

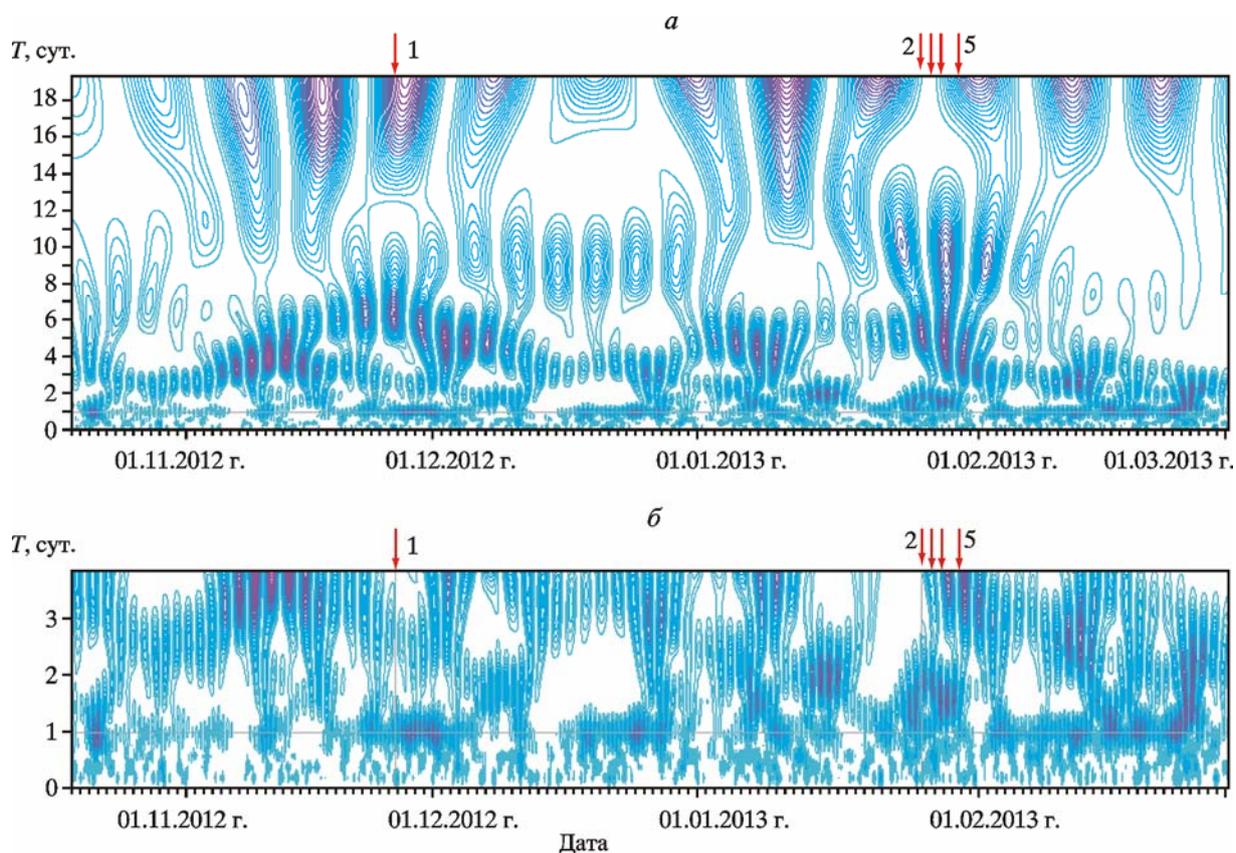


Рис. 7. Вейвлет-диаграммы хода активности радона в воздухе помещения (г. Горно-Алтайск) с 19.10.2012 г. по 01.03.2013 г. для длинных (а) и коротких (б) интервалов периодов

Стрелками показаны моменты возникновения землетрясений; цифры – номера землетрясений, приведенных в таблице

суточного ритма вариаций метеопараметров, например перед Алтайским землетрясением 2003 г. наблюдалось ослабление суточного ритма температуры и влажности [Антикаева, Шитов, 2014].

Рассмотрим теперь более продолжительные ряды суточных вариаций ОАР (рис. 8). Сравнивая среднесуточный ход атмосферного давления и активности радона, можно заметить, что их аномалии по времени не совпадают (см. рис. 8, а). Из этого следует, что в данном случае аномалии активности радона в большинстве своем не связаны с возмущениями барического поля. По-видимому, они могут обуславливаться геодинамическими процессами в некоторой сейсмоактивной области, например в области, ограниченной рамками карты, показанной на рис. 6.

При сопоставлении временного хода среднесуточной активности радона (см. рис. 8, б) с моментами возникновения землетрясений в районе, ограниченном рамками карты, приведенной на рис. 6, складывается впечатление, что наиболее тесная связь существует между активностью радона и землетрясениями, эпицентры которых локализованы в афтершоковой области Чуйского землетрясения. Обращает на себя внимание, что эта область связана с пунктом наблюдения активным разломом. Свидетельством тому является повышенная плотность очагов радонопроявлений и повышенная сейсмическая активность этой зоны (см. рис. 6, таблицу).

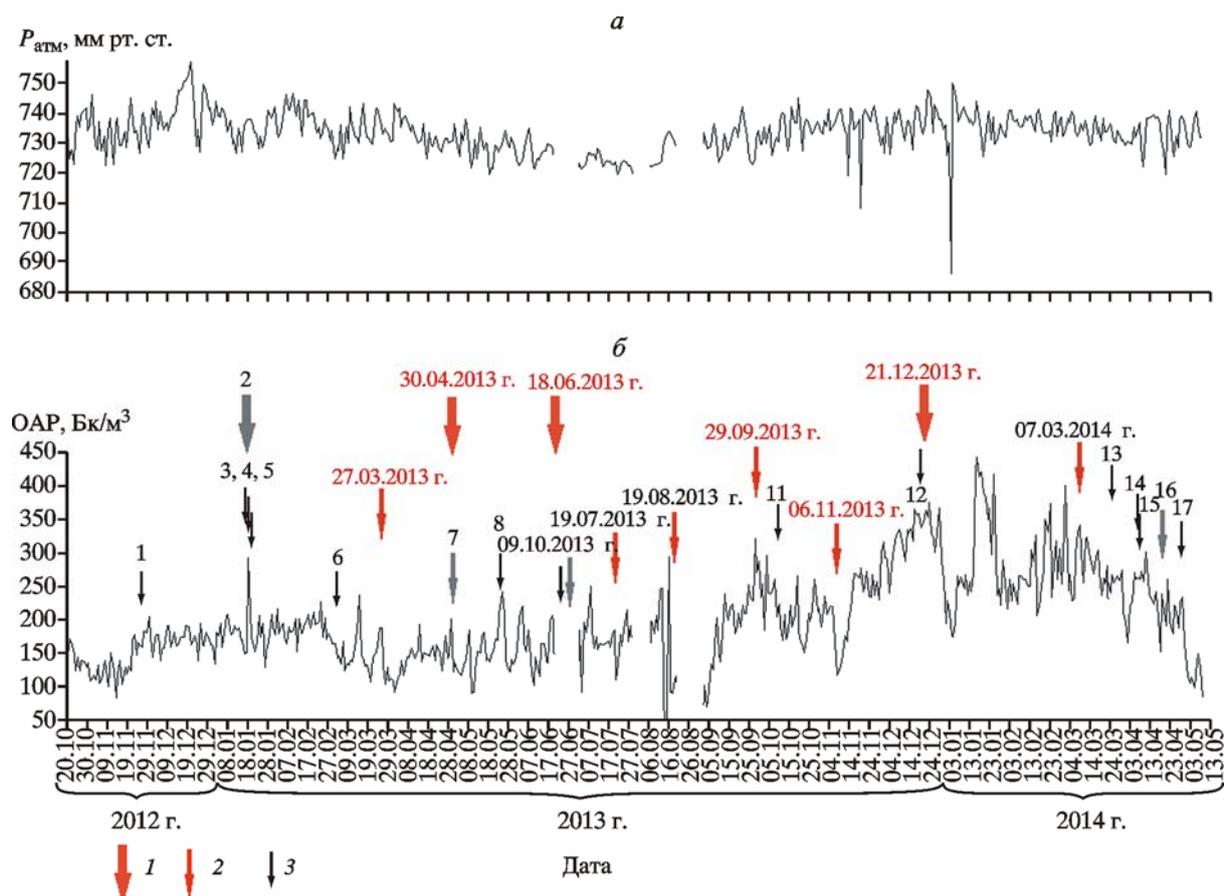


Рис. 8. Суточные вариации атмосферного давления (а) и объемной активности радона (б) в г. Горно-Алтайск за период исследований

1–3 – моменты возникновения землетрясений: 1 – с $M > 5$ из района, ограниченного координатами 49° – 54° с.ш., 86° – 93° в.д.; 2 – $12 < K \leq 13.5$; 3 – $10 < K \leq 12$ – из района, ограниченного рамками карты рис. 6, а. Цифры – номера землетрясений, приведенных в таблице

Обсуждение результатов

Известно, что механизмом миграции природного радона является захват его флюидами, в частности пузырьками водорода и метана, и субвертикальный перенос в область стока – атмосферу почв и подпочв, а также в приземную атмосферу [Войтов и др., 2000; Шулейкин, Резниченко, 2007]. Очевидно, что характер путей миграции – ослабленные зоны с высокой проницаемостью пород или добротные блоки, влияет на интенсивность миграции флюидов. Представляется также, что взаимное расположение ослабленных зон и добротных блоков относительно пункта наблюдений в конечном счете отражается на уровне эманацій радона.

Объем наших исследований не настолько достаточен, чтобы отдать предпочтение какой-то конкретной модели формирования радонового поля в результате сейсмической активизации. Тем не менее наши результаты согласуются с положениями, предложенными в работе [Уткин и др., 2006], о том, что при интерпретации данных мониторинга за уровнем эманацій радона необходимо располагать информацией о блоковом строении района, так как сейсмические события, локализованные вне блока, к которому приурочен пункт наблюдения, равно как и слабые события, локализованные в общем с ним блоке, могут остаться незамеченными. Разные блоки по-разному реагируют на вариации региональных и локальных полей напряжений. Нельзя не учитывать также и

неоднородность поля деформаций, наличие зон сжатия и растяжения как во времени, так и в пространстве. В зоне сжатия будет наблюдаться закрытие трещин и пор, а значит, снижение концентраций газов, а в зоне растяжения, наоборот, увеличиваются пористость и проницаемость, что приводит к заметному увеличению газовых потоков. Из всего сказанного следует, что характер деформаций в пункте регистрации будет определять состояние поля радона. Это обстоятельство может быть одной из причин описанного нами неоднозначного поведения радона как предвестника землетрясений.

Приведенные выше примеры скачкообразной реакции уровня радона на серию удаленных землетрясений или на слабое единичное землетрясение, локализованное в непосредственной близости от места регистрации, имеют аналоги, описанные в других работах. Причиной этого феномена авторы работы [Уткин и др., 2006] считают изменение проницаемости среды при воздействии на нее упругих волн, инициированных землетрясениями, в том числе и удаленными событиями небольшой силы. Обнаруженная нами реакция поля радона в пункте наблюдения на сейсмическую активизацию в афтершоковой области Чуйского землетрясения может объясняться также тем, что в пределах разлома существует связанная сеть флюидопроводящих каналов.

В заключение еще раз отметим, что мы не располагаем достаточным объемом данных о блоковом строении района исследований (которое, кстати, может варьировать во времени), а также не имеем данных мониторинговых наблюдений за напряжениями и деформациями в пределах рассматриваемого района и данных площадного мониторинга за активностью радона. Поэтому мы не можем делать сколько-нибудь обоснованные выводы о взаимосвязи активности радона с процессами, сопровождающими возникновение землетрясений. Представленные в настоящей статье результаты говорят только о перспективности продолжения подобных работ и позволяют сделать самые предварительные выводы.

Заключение

Окрестности разломной зоны на территории г. Горно-Алтайск характеризуются высоким уровнем активности подпочвенного радона, который в 3–4 раза превышает уровень радона, зарегистрированный в г. Москва. Проведенные исследования еще раз продемонстрировали, что на активность эманаций подпочвенного радона воздействует множество факторов, в том числе рассмотренные в настоящей работе метеофакторы.

В воздухе помещения, в котором проводились наблюдения, значения ОАР в среднем не превышают 400 Бк/м^3 , что заметно меньше, чем можно было бы ожидать. Таким образом, мероприятия, предпринятые с целью ослабления потока радона из почвы в помещение, оказались действенными. Суточный и полусуточный ритмы в вариациях ОАР в воздухе помещений выражены заметно слабее, чем в атмосфере подпочв, а их корреляция с вариациями метеопараметров заметно ниже.

Ход содержания подпочвенного радона не указывает однозначно на готовящееся сильное событие. Некоторые аномалии радона по времени совпадают с моментами возникновения землетрясений, другие относятся к временным периодам, когда в радиусе более 500 км вокруг г. Горно-Алтайск не было сколько-нибудь сильных событий. Аномалии сглаженного среднесуточного хода радона более однозначно ассоциируются с конкретными сейсмическими событиями. Чаще всего они совпадают по времени с моментами возникновения ближайших к пункту наблюдения землетрясений, реже — предшествуют удаленным событиям со сдвигом по времени в несколько суток.

Результаты мониторинга содержания радона в воздухе помещения с бетонным полом (несмотря на меньший уровень его активности по сравнению с уровнем активности подпочвенного радона) также могут быть использованы для выявления интервалов

возмущения радонового поля, связанных с возникновением землетрясения. Из анализа данных мониторинга ОАР следует, что корреляция активности радона в воздухе с землетрясениями, локализованными в афтершоковой области Чуйского землетрясения, более тесная, чем с иными сейсмическими событиями. Предположительно, причиной этого может быть наличие связи между этой областью и пунктом наблюдения посредством сети флюидопроводящих каналов в пределах активного разлома.

И, наконец, повышенный уровень эманаций радона в непосредственной близости от активных разломов, а также резкий их рост в периоды сейсмической активизации необходимо учитывать при планировании строительства жилых и производственных помещений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Российской академии наук «Фундаментальные науки – медицине», а также Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.577.21.0109).

Литература

- Аптикаева О.И., Шитов А.В.* Динамика заболеваемости населения до и после сильных землетрясений и ее связь с другими природными факторами (на примере Чуйского землетрясения 2003 г.) // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8, № 3. С. 46–55.
- Аптикаева О.И., Шитов А.В.* Результаты мониторинга метеопараметров на Горном Алтае до и после Чуйского землетрясения 2003 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 41, № 1. С. 34–46. [Engl. transl.: *Aptikaeva O.I., Shitov A.V.* Results of meteorological monitoring in Gorny Altai before and after the Chuya earthquake in 2003 // *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics.* 2014. V. 50, N 8. P. 766–775].
- Аптикаева О.И., Костенко К.А., Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т., Черепанов О.А.* К вопросу о возможности геодинамического мониторинга по эманациям радона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37, № 4. С. 51–65. [Engl. transl.: *Aptikaeva O.I., Kostenko K.A., Selyukov E.I., Stigneeva L.T., Cherepanov O.A.* Possibility of geodynamic monitoring by radon emanations // *Seism. Instrum.* 2011. V. 47, N 4. P. 357–367].
- Болотова М.В., Воеводин В.А., Коваленко В.В., Кургуз С.А.* Радоноопасность территории Красноярского края: Проблемы прогноза, обследования и принятия решений по ограничению облучения населения на примере г. Красноярска // Материалы II Междунар. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск: Тантем-Арт, 2004. С. 52–54.
- Бутаев А.М., Абдулаева А.С., Гуруев М.А.* Естественные радионуклиды в породах и почвах Дагестана и содержание радона в воздухе жилых помещений // Вестн. Даг. науч. центра. 2006. № 23. С. 59–65.
- Войтов Г.И.* Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27–38.
- Войтов Г.И., Гусев А.С., Козлова Н.С., Рудаков В.Р., Шулейкин В.Н.* Эманационные и электрические эффекты над сложнопостроенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) // Докл. РАН. 2000. Т. 370, № 1. С. 105–108.
- Гвоздарев А.Ю.* Построение карт-схем активности и плотности потока радона на территории Республики Алтай и анализ ее связи с заболеваемостью // Основные проблемы охраны окружающей среды и благополучия человека в Сибирском федеральном округе, перспективы их решения: Сб. материалов конф. Горно-Алтайск, 2006. С. 137–147.
- Зубков С.И.* Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.

- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36 (10). С. 20–30.
- Мавлянов Г.А., Уломов В.И. Поиски предвестников землетрясений в Узбекистане // Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН, 1976. С. 25–38.
- Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации почвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 2. С. 5–14. [Engl. transl.: Makarov E.O., Firstov P.P., Voloshin V.N. Hardware complex for recording soil gas concentrations and searching for precursor anomalies before strong earthquakes in South Kamchatka // Seism. Instrum. 2013. V. 49, N 1. P. 46–52].
- Паровик Р.И., Ильин И.А., Фирстов П.П. Математическая диффузионная модель массопереноса радона (^{222}Rn) в грунте и его эксхалации в приземный слой атмосферы // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Т. 1, № 7. С. 110–114.
- Романович И.К. Современное состояние и задачи обеспечения радиационной безопасности населения России // Материалы X Всерос. съезда гигиенистов и санитарных врачей / Ред. Г.Г. Онищенко, А.И. Потапов. М., 2007. Кн. II. С. 415–419.
- Рудаков В.П. Отображение геодинамических процессов сезонной (годовой) периодичности в динамике поля почвенного радона // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 558–561.
- Рудаков В.П. Эманиационный мониторинг геосред и процессов. М.: Науч. мир, 2009. 175 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
- Сейсмическая радоновая станция: Руководство по эксплуатации. М.: НТМ-Защита, 2009. 22 с.
- Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Сорокин В.М., Яценко А.К. Возмущение квазистационарного электрического поля в атмосфере над сейсмоактивными районами // Химическая физика. 2000. Т. 19, № 6. С. 71–80.
- Спивак А.А. Объемная активность почвенного радона в зонах тектонических нарушений // Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008. С. 235–246.
- Стамат Н.П., Кормановская Т.А. Уровни облучения населения России на территориях с повышенным радиационным фоном // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. С.-Петербург, 14–17 сентября 2008 г. СПб., 2008. С. 135–138.
- Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176, № 2. С. 35–37.
- Уткин В.И. Пространственно-временной мониторинг радона – основа среднесрочного прогноза землетрясений // Урал. геофиз. вестн. 2000. № 1. С. 101–106.
- Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997а. № 4. С. 84–92.
- Уткин В.И., Юрков А.К. Отражение сейсмических событий в поле эксхалации радона // Геофизика. 1997б. № 6. С. 50–56.
- Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В., Кривашев С.В., Юрков А.К., Косякин И.И., Шишканов А.Н. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61–70.
- Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации почвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Акбашев Р.Р. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 1. С. 60–80.
- Фирстов П.П., Исакевич В.В., Макаров Е.О., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Применение методики айгеноскопии для поиска предвестников сильных землетрясений в поле почвенного радона (^{222}Rn) на Камчатке (август 2012 г. – август 2013 г.) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 3. С. 63–75.

- Хитаров Н.И., Войтов Г.И. Твердые приливы и дегазация Земли // Природа. 1982. № 3. С. 6–12.
- Широков В.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Степанов И.И., Степанов В.И. Возможный подход к краткосрочному и долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г., $M_w = 9.0$ // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 4. С. 5–22. [Engl. transl.: *Shirokov V.A., Firstov P.P., Makarov E.O., Stepanov I.I.* An approach to the short- and long-term forecasting of strong earthquakes: A case study of the $M_w = 9.0$ Tohoku earthquake, Japan, March 11, 2011 // *Seism. Instrum.* 2015. V. 51, N 3. P. 229–241].
- Шитов А.В., Бородин А.С., Тужилкин Д.А., Апрыаткина М.Л. Влияние физических полей активных геологических разломов на сердечно-сосудистую деятельность человека // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 3. С. 56–77. [Engl. transl.: *Shitov A.V., Borodina A.S., Tuzhilkin D.A., Apryatkina M.L.* Influence of physical fields of active geological faults on the human cardiovascular system // *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics.* 2014. V. 50, N 7. P. 696–711].
- Шулейкин В.Н. Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013а. Т. 12, № 2. С. 57–66. [Engl. transl.: *Shuleikin V.N.* Radon transport to the near-surface soil and air layers // *Izv. Atmosph. and Ocean. Physics.* 2013. V. 49, N 8. P. 853–859].
- Шулейкин В.Н. Реверсивный электродный эффект – расчеты и эксперимент // Наука и технологические разработки. 2013б. Т. 92, № 2. С. 17–27.
- Шулейкин В.Н. Пары воды, атмосферное электричество и поступление радона в приповерхностные слои грунта и атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 3. С. 31–39.
- Шулейкин В.Н., Резниченко А.П. Атмосферно-электрический и водород-радоновый контроль экологической безопасности территорий газохранилища // Сб. тр. VI Рос. конф. по атмосферному электричеству. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 292–295.
- Alaamer A.S. Radon awareness among Saudi people in Riyadh, Saudi Arabia // *World J. of Nuclear Sci. and Techn.* 2012. N 2. P. 165–168. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/wjnst.2012.24025>. <http://www.SciRP.org/journal/wjnst>
- Alharbi W.R., Abbady A.G.E. Measurement of radon concentrations in soil and the extent of their impact on the environment from Al-Qassim, Saudi Arabia // *Natural Sci.* 2013. V. 5, N 1. P. 93–98.
- Annex E: Sources-to-effects assessment for radon-222 in work place and homes. United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2006.
- Bergman H., Edling C., Axelson O. Indoor radon daughter concentrations and passive smoking // *Environ. Intern.* 1986. V. 12, N 1–4. P. 17–19. doi:10.1016/0160-4120(86)90005-X.
- Commission recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon // *Euratom, Europ. Com. Off. J.* 1990. V. 80. P. 26–28.
- King Chi-Yu. Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes // *J. of Geophys. Res.* 1980. V. 85, N 6. P. 3065–3078.
- Abd El-Zaher M. Seasonal variation of indoor radon concentration in dwellings of Alexandria City, Egypt // *Rad. Protect. Dosimetry.* 2011. V. 143, N 1. P. 56–62. doi:10.1093/rpd/ncq357.
- Pugliese M., Quarto M., Loffredo F., Mazzella A., Roca V. Indoor radon concentrations in dwellings of Ischia Island // *J. of Environ. Protect.* 2013. N 4. P. 37–39. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2013.48A2005>; <http://www.scirp.org/journal/jep>
- Soliman M.S.A., Saddig D.J. Physical factors affecting the interior radon-concentration // *Open J. of Biophysics.* 2013. N 3. P. 33–41. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ojbiphy.2013.31004>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR): Rep. to the General Assembly with Scientific Annexes. Ann. B. United Nations, 2000. P. 84–156.
- WHO Handbook on indoor radon: A public health perspective. World Health Organization (WHO) Press, 2009.

Zoran M. Anomalous high concentrations of radon and its alpha active descendents in the lower atmosphere afterward strong Romanian earthquake from March 4, 1977 // Seismological researches for Romanian earthquakes from March 4, 1977 / Eds C. Cornea, I. Radu. 1979. P. 447–452.

Сведения об авторах

АПТИКАЕВА Ольга Ивановна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-24-05. E-mail: aptikaevaoi@mail.ru

АПТИКАЕВА Olga Ivanovna – PhD (Physics and Mathematics), leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-24-05. E-mail: aptikaevaoi@mail.ru

ШИТОВ Александр Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Горно-Алтайский государственный университет. 649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, д. 1. Тел.: +7 (913) 999-81-61. E-mail: sav103@yandex.ru

SHITOV Alexander Viktorovich – Ph.D. (Geology and Mineralogy), docent, Gorno-Altai State University. Gorno-Altai, Russia. Tel.: +7 (913) 999-81-61. E-mail: sav103@yandex.ru

DYNAMICS OF RADON ACTIVITY DUE TO EARTHQUAKES (ON EXAMPLE OF A SEISMICALLY ACTIVE REGION OF THE ALTAI)

O.I. Aptikaeva¹, A.V. Shitov²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia

Abstract. We studied the monitoring data on radon emanation in Gorno-Altai due to seismic activity and issues of their influence on public health. It was found that in the fault zone vicinity on the territory of the Gorno-Altai level of activity of soil radon is 3–4 times higher than the level registered in Moscow. There is ambiguity in the behavior of radon as a precursor of a seismic event. Some radon anomalies in sync with moments of earthquakes, others correspond to quiet seismic periods. It was found that the radon anomalies are more closely associated with the occurrence of earthquakes in the aftershock zone of the Chui 2003 earthquake than other seismic events. It is assumed that the cause of the observed phenomenon is as follows. These areas are associated with the registration point through a network of fluid-conducting channels within an active fault.

Keywords: atmospheric processes, geodynamic processes, radon emanation, monitoring, ecology, rhythms, wavelet analysis.