

УДК 550.343

РАДОН – НАДЕЖНЫЙ ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2009 В.И. Уткин, А.К. Юрков

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, 620016; e-mail: voutkin@mail.ru

Мониторинг почвенного радона зарекомендовал себя с положительной стороны, хотя поведение R_n перед такими геодинамическими событиями как землетрясения и горные удары не укладываются в рамках одной схемы. Изучено поведение R_n при горных ударах в шахтах Североуральского бокситового рудника и при землетрясениях на разломе Сан-Андреас и на Северном Тянь-Шане. Показано, что заметные изменения в поле радона наблюдаются за 90-100 дней до сейсмического события. Представленные данные показывают высокую надежность показаний мониторинга радона при изучении процесса подготовки землетрясений.

Ключевые слова: мониторинг радона, напряженное состояние массива, подготовка землетрясения.

На фоне многочисленных предвестников землетрясений, начиная с пионерской работы (Мавлянов, Уломов, 1976), мониторинг почвенного радона зарекомендовал себя с положительной стороны, хотя поведение R_n перед такими геодинамическими событиями как землетрясения и горные удары не укладываются в рамках одной схемы (Булашевич и др., 1996а, 1996б; Уткин, Юрков 2007, 2008). Вместе с тем исследования последних лет показывают, что эта проблема связана с неоднозначностью используемых моделей геологической среды и интерпретацией результатов. При корректно построенной модели поведение R_n однозначно и надежно отражает изменение напряженно-деформированного состояния среды перед сейсмическим событием (Булашевич и др., 1996а; Уткин, Юрков, 1997а, 1997б, 1998, 2007, 2008; King Chi-Yu et al., 1991).

МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Горные породы в первом приближении можно описать моделью трещиновато-пористой среды состоящей из основного массива и хаотически расположенных проницаемых трещин и закрытых пор (Уткин, 2000). Выделяющийся из массива R_n , в горной породе находится в трех состояниях: в пространстве закрытых пор, в трещинах и сорбированный свободной внутренней поверхностью всего массива (Уткин, Юрков, 2007).

При изменении напряженного состояния

массива, выделение R_n из горной породы может идти по схеме приведенной на рис. 1. В начальный момент нагрузке P_0 в породе соответствует концентрация $R_n C_0$. При сжатии ($P+ > P_0$) в первый момент выход R_n увеличивается за счет уменьшения трещин, после чего трещины перекрываются и его выход уменьшается. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит разрушение массива, объединение поровых кластеров, что приводит к существенному увеличению выхода R_n . При растяжении массива ($P- < P_0$) на начальном этапе происходит уменьшение выхода R_n за счет увеличения объема трещин. Дальнейшее растяжение приводит к расширению трещин и раскрытие пор. Соответственно, происходит увеличение выхода радона.

Рассмотренная модель была положена в основу разработки метода прогноза тектонических событий — горных ударов в шахтах и землетрясений.

ГОРНЫЕ УДАРЫ В ШАХТАХ СЕВЕРОУРАЛЬСКОГО БОКСИТОВОГО РУДНИКА

Регистрация концентрации R_n в стенках на шахтах Североуральского бокситового рудника глубиной 350-700 м проводилась в начале 1990-х годов (Булашевич и др., 1996а, 1996б). В результате экспериментов выяснилось, что на расстояниях до 150 метров от будущего эпицентра наиболее сильного горного удара ($E = 1300$ Дж)

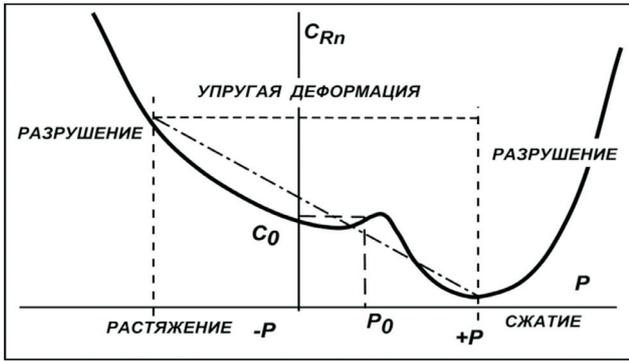


Рис. 1. Качественная характеристика изменения концентрации радона в горной породе при изменении внешней нагрузки.

за 23 часа наблюдалось существенное снижение концентрации R_n , иногда, даже в 3-4 раза (с 55 имп/мин до 15 имп/мин). События меньшей энергии ($E = 170-180$ Дж), и происходящие на большем расстоянии от точки регистрации, задерживают восстановление концентрации до фоновой (рис. 2). Согласно предложенной модели, это свидетельствует о сжатии массива вблизи эпицентра горного удара.

Как показали исследования, временные параметры предвестниковых аномалий также существенно зависят от механических свойств горных пород. В известняках уменьшение концентрации R_n начинается приблизительно за час до удара, а в бокситах или аргиллитах более чем за 20 часов. В тоже время на больших расстояниях (400-1000 м) от эпицентра горного удара происходило увеличение концентрации R_n (рис. 3) в 8-10 раз (с 10 до 105 имп/мин). Со-

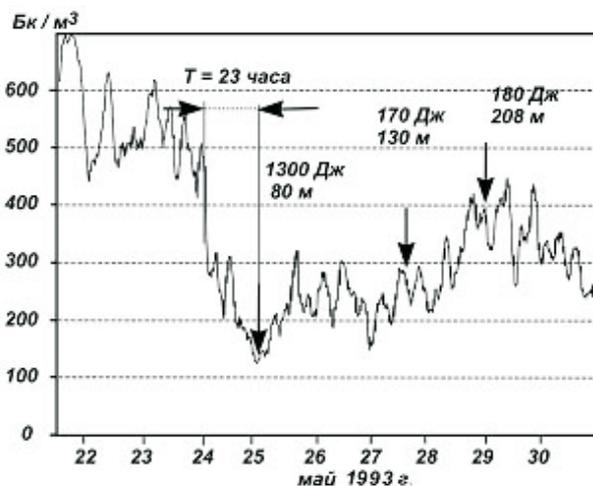


Рис. 2. Поведение ОАР перед горным ударом на малых расстояниях от будущего эпицентра на Североуральском бокситовом руднике. Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения. Датчик радона был расположен в бокситах.

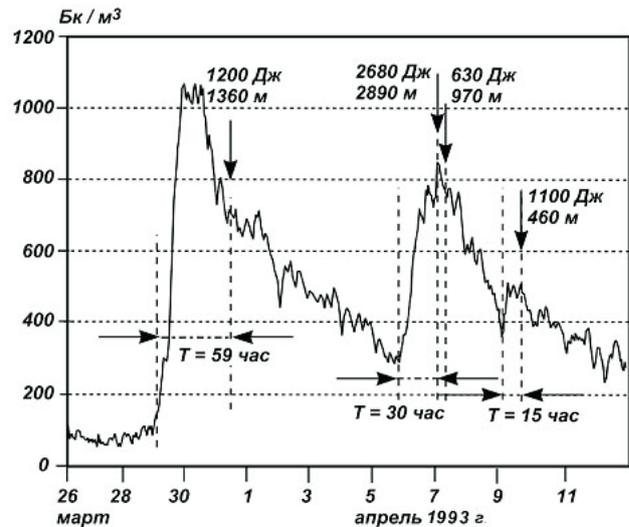


Рис. 3. Поведение ОАР перед горным ударом на больших расстояниях от будущего эпицентра на Североуральском бокситовом руднике. Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения. Датчик радона был расположен в бокситах.

гласно рассмотренной выше модели среды, такое поведение концентрации R_n указывает, что регистрация осуществлялась в зоне растяжения (Уткин, Юрков, 2007, 2008).

Кроме зон растяжения и сжатия существует и третья нейтральная зона. Эти зоны определяют динамику R_n в зависимости от пространственного расположения детектора относительно очага готовящегося события – в зоне сжатия $C_+ < C_0$, в зоне растяжения $C_- > C_0$ и в нейтральной зоне $C_{\pm} \approx C_0$, что и объясняет неоднозначность предвестниковых аномалий в динамике R_n перед горными ударами и землетрясениями.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ НА РАЗЛОМЕ САН-АНДРЕАС И НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

Апробация представлений о поведении R_n перед горными ударами была выполнена при интерпретации результатов уникального эксперимента Геологической службы США, которая несколько лет осуществляла мониторинг концентрации почвенного R_n с помощью треновых детекторов, установленных в наблюдательных скважинах вдоль разлома Сан-Андреас (King Chi-Yu, 1980; King Chi-Yu, et al., 1991).

Рассматривалась динамика R_n перед землетрясениями 25 апреля 1979 г. с магнитудой $M = 4.4$. и 5 августа 1979 г., с $M = 5.9$ (Уткин, Юрков, 1997а, 1997б, 1998, 2007, 2008). Оказалось, что за 90-100 дней перед землетрясениями во всех точках, расположенных близко к эпицентру, наблюдалось снижение концентрации R_n , которые

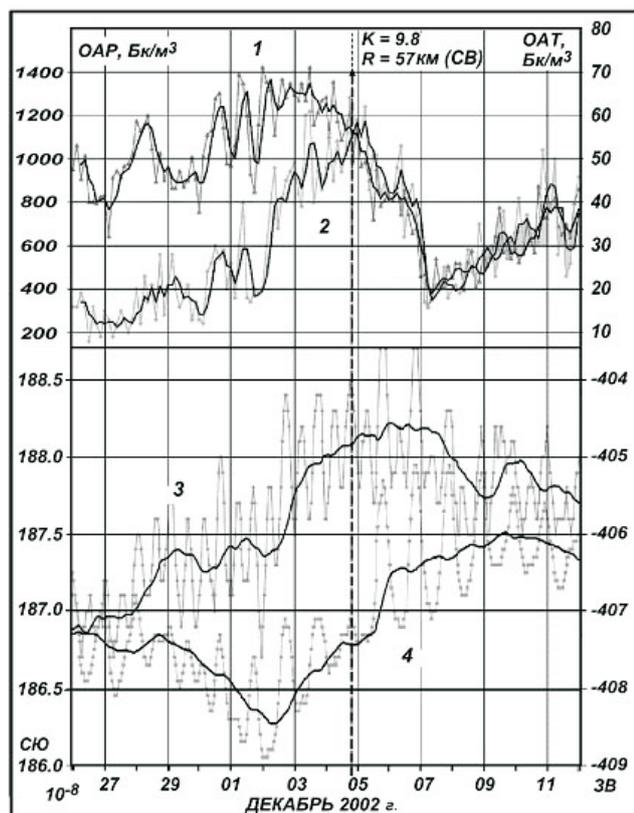


Рис. 4. Сопоставление вариаций ОАР и объемной активности торона с деформациями верхней части земной коры. 1 – вариации ОА Rn; 2 – вариации ОА Tn; 3 – деформация в направлении Север-Юг; 4 – деформации в направлении Запад-Восток. Прерывистой линией отмечен момент землетрясения. К – класс землетрясения; R – расстояние от пункта регистрации.

иногда искажаются короткими выбросами, связанными, как правило, с форшоками. В точках наблюдения, расположенных на значительном удалении от эпицентров за то же время наблюдалась тенденция к увеличению концентрации Rn, что хорошо согласуется с описанной выше моделью.

В дальнейшем авторами была организована сеть пунктов радонового мониторинга на Северном Тянь-Шане, где за последние 120 лет произошло 8 разрушительных землетрясений (Уткин и др., 2006).

В этом эксперименте, применяемая аппаратура (радиометр РГА-01М-03), позволяла производить измерения не только ОА Rn, но и ОА торона, радиоактивного газа с периодом полураспада 55.6 с. Применялась конвекционная методика измерений ОА Rn и Tn в почвенном воздухе, которая заключалась в откачке газа из герметизированных скважин глубиной 2-3 м (Козлова, Юрков, 2005; Уткин и др., 2005, 2006).

Были получены интересные результаты на основании сопоставления динамики подпочвенных радиоактивных газов с деформациями

земной коры на станции «Ала-Арча» перед землетрясением 4 декабря 2002 г. с энергетическим классом $K = 9.8$ на удалении 57 км (Уткин и др., 2005, 2006; Уткин, Юрков, 2007, 2008). На графиках, приведенных на рис. 4, видно, что заметное увеличение концентрации радона началось приблизительно за 90 дней. К началу декабря уровень концентрации радона составил приблизительно два фоновых значения (1200 по отношению к фоновым 600 Бк/м³). В это же время наблюдается существенное увеличение деформации растяжения в направлении Север-Юг. Интересно то, что кривая ОА Rn как бы опережает деформационные изменения в массиве. В то же время кривая ОА Tn практически следует за всеми изменения деформационной картины, что можно объяснить малым временем периода полураспада Tn. Землетрясение произошло спустя 48 часов после достижения максимума концентрации Rn и при максимальной концентрации Tn (рис. 4). Если увеличение Rn на больших расстояниях от очага тектонических событий наблюдалось в экспериментах как в глубоких шахтах (Булашевич и др., 1996а, 1998), так и при исследованиях в на разлома Сан-Андреас (Уткин, 2000; Уткин и др., 2006, Уткин, Юрков, 1997а, 1997б, 1998, 2007, 2008; King Chi-Yu et al., 1991), то поведение Tn требует дополнительных исследований. Интересно и то, что процессы восстановления деформационной картины и фонового значения ОА Rn происходят практически одновременно, в отличие от их поведения в начале подготовки сейсмического события.

Сопоставление синхронных данных по вариациям Rn и деформациям массива, полученных в одной и той же точке, представляет несомненный методический интерес в плане подтверждения и обоснования высказанных ранее модельных представлений. Как видно из представленных на рис. 4. данных, вариации, как Rn, так и Tn в деталях повторяют данные деформографа. Видно, что деформации растяжения вызывают увеличение величины объемной активности, что соответствует качественно предложенной модели среды.

Наиболее крупным событием за время эксперимента на Северном Тянь-Шане было землетрясение 31 декабря 2003 г. с $K = 10.5$ на удалении 32 км от наблюдательной станции «Ананьево» (Уткин и др., 2005, 2006; Уткин, Юрков, 2007, 2008). Начиная с середины сентября 2003 г. уровень фонового значения ОА Rn (2 кБк/м³) стал плавно увеличиваться и достиг к началу декабря 3.5 кБк/м³ (рис. 5). При этом наблюдается синхронное поведение ОА Tn. Причем предшествующая этому событию серия землетрясений с $K = 8.1-9.5$ удаленных от пункта регистрации на более чем 90 км (землетрясения 4-7, рис. 5) не

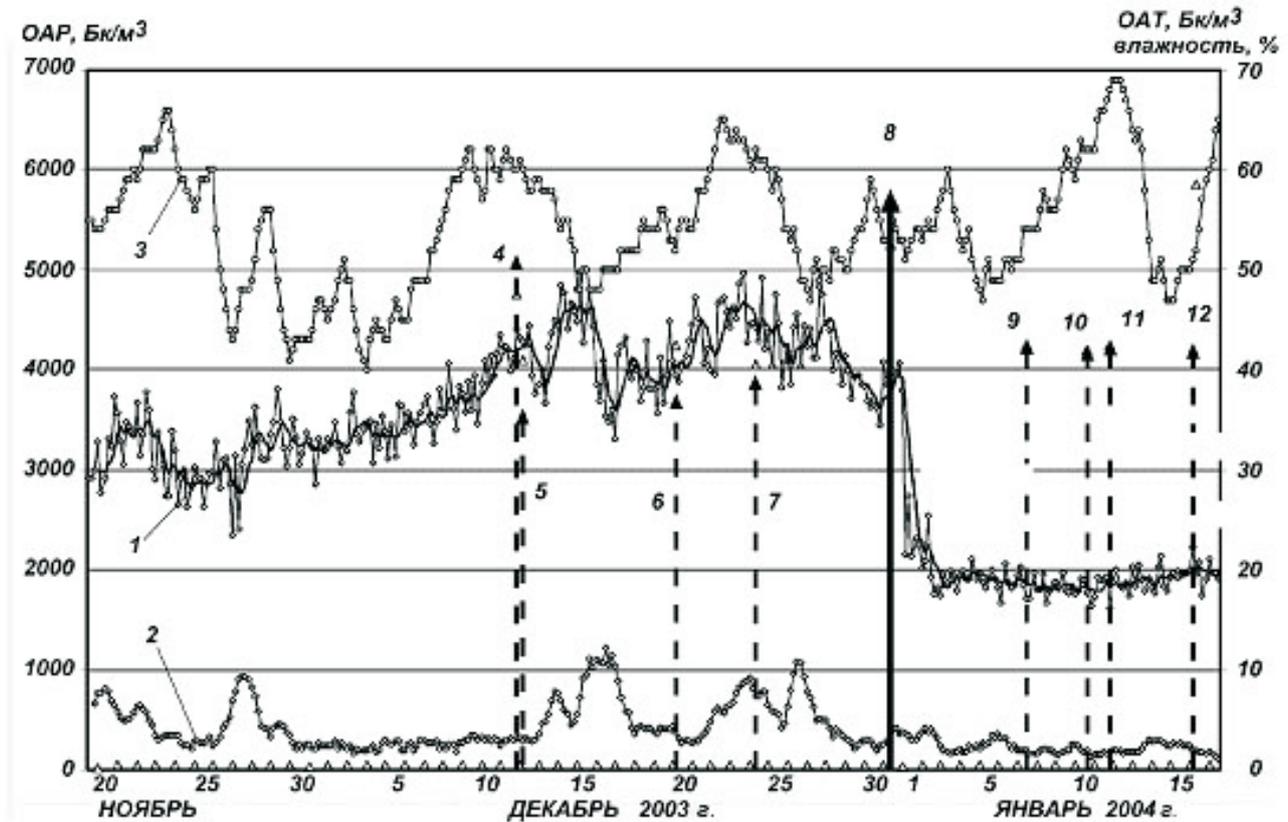


Рис. 5. Поведение объемной активности радона и торона перед событием 31 декабря 2003 г.: 1 – объемная активность радона (ОАР); 2 – объемная активность торона (ОАТ); 3 – влажность; 4-12 – землетрясения. Характеристики землетрясений приведены в таблице.

Характеристики землетрясений, представленных на рис. 5

№ землетрясения	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Класс землетрясения	9.5	8.2	8.5	8.1	10.5	8.5	8.4	8.5	8.4
Расстояние от пункта регистрации, км	303	301	93	169	32	117	8.1	103	223
Направление по странам света	З	З	СВ	ЗЮЗ	С	ЗСЗ	Ю	З	З

изменила тенденции увеличения ОА Rn. После землетрясения в начале января наблюдается резкое уменьшение ОА Rn до 2 кБк/м³, несколько ранее ОА Tn упала до фонового значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что вариации ОА Rn надежно фиксируют процесс подготовки горных ударов и землетрясений.

За 90-100 дней перед землетрясениями в дальней зоне происходит увеличение ОА Rn, что позволяет оптимистически оценивать перспективы использования пространственно-временного мониторинга Rn при контроле процессов подготовки землетрясений.

Выбор местоположения пунктов регистрации радона необходимо делать исходя из геологического строения района и тектонической ситуа-

ции, учитывая, что параметры предвестниковых аномалий существенно зависят от механических свойств горных пород.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект KR-187-2) и частично Программы 016 Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата. Направление 1: Сейсмические процессы и катастрофы».

Список литературы

- Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // ДАН. 1996а. Т. 346. № 2. С. 245-248.
- Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. О возможности предсказания времени проявления горного удара по изменению концентрации радона // Горный журнал. 1996б. № 6. С. 33-37.

- Козлова И.А., Юрков А.К.* Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 7. С. 31-34.
- Мавлянов Г.А., Уломов В.И.* Поиски предвестников землетрясений в Узбекистане. Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН, 1976. С. 25-38.
- Уткин В.И.* Пространственно-временной мониторинг радона — основа среднесрочного прогноза землетрясений // Уральский геофизический вестник. 2000. № 1. С. 101-106
- Уткин В.И., Мамыров Э., Кан М.В. и др.* Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Физика Земли. 2006. № 9. С. 61-70.
- 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., Юрков А.К.* Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // ДАН. 1998. Т. 358. № 5. С. 675-680.
- Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон – индикатор геодинамических процессов // Уральский геофизический журнал. 2007. № 4 (13). С. 74-85.
- Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон как индикатор геодинамических процессов // АНРИ. 2008. № 2 (53). С. 10-17.
- Уткин В.И., Юрков А.К., Косякин Н.И. и др.* Первые результаты пространственно-временного мониторинга радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане // Уральский геофизический вестник. 2005. № 7. С. 53-60.
- King Chi-Yu.* Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes // J. of Geophys. Research. 1980. V. 85. № 6. P. 3065-3078.
- King Chi-Yu, Walkingstick C., Basler D.* Radon in soil gas along active faults in Central California. Field studies of radon in rocks, soil and water. // U.S. Geological survey bulletin. 1991. P. 77-133.

RADON AS THE INDICATOR OF GEODYNAMIC PROCESSES

V.I. Outkin, A.K. Yurkov

*Institute of Geophysics of Ural's Branch of RAS, Yekaterinburg, 620016;
e-mail: voutkin@mail.ru*

Monitoring of soil radon has showed the positive results, yet Rn behaviour prior to such geodynamic events as earthquakes and mountain impacts lies beyond one single scheme. We studied the Rn behaviour at the time of mountain impacts in the Severouralsk bauxite mines and during earthquakes at San Andreas Fault and at the Northern Tien Shan. The paper shows that the certain changes in the radon field are observed 90-100 days prior to the seismic event. The data prove high reliability of the results of radon monitoring while studying the earthquake preparation process.

Keywords: monitoring of the radon, stress condition, preparation of earthquake.