

Поведение радона при подготовке геодинамических процессов

© В. И. Уткин, А. К. Юрков, 2010

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
Поступила 31 марта 2009 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

Представлені результати дослідження сейсмічних явищ (тектонічних землетрусів і гірських ударів у глибоких шахтах) ґрунтуються на вимірюванні об'ємної активності радону (ОАР). Створено схематичну модель середовища як умову формування ОАР. На основі досліджень у шахтах показано зміну ОАР під впливом навантаження гірських порід і залежність поведінки ОАР перед подією від положення точки вимірювання. Аналогічні висновки отримано під час інтерпретації результатів моніторингу в Каліфорнії (США) та Північному Тянь-Шані (Киргизстан). Виявлено нелінійність виходу радону залежно від зміни навантаження середовища і особливостей методу. Наведено геодинамічну модель і розглянуто очікувані ефекти в полі радону. Згідно з аналізом результатів реальних досліджень поля радону, значні зміни спостерігаються за 90—100 діб до сейсмічного явища, характерні — за 3—5 діб. Досліджено, як реагує поле радону (в межах комплексу осадових порід) на проходження коливань, що виникають внаслідок далеких землетрусів. Установлено високу надійність моніторингу ОАР під час вивчення процесу підготовки землетрусів.

The review of researches on radonic monitoring, as is presented to a harbinger of seismic events: tectonic earthquakes and mountain impacts in deep mines. The schematic model of environment and change of volumetric activity of radon (VAR) is presented at influence of loading. On the basis of researches in mines it is shown, that behaviour VAR before event variously depending on an arrangement of measuring item. Similar results are received at interpretation of experiments on radonic monitoring in the USA and Northern Tien Shan. Nonlinearity of an output of radon depending on change of the intense condition of environment and feature of registration of a field of radon is shown. The geodynamic model is presented and expected effects in a floor of radon are considered. Results of change of a field of radon before earthquakes are resulted. It is shown, that appreciable changes in a floor of radon are observed 90—100 days prior to seismic event and characteristic for 3—5 days. It is shown as within the limits of a complex of sedimentary rocks the field of radon reacts to passage of waves of the removed earthquakes. The presented data show high reliability of indications of monitoring of radon at studying process of preparation of earthquakes

На фоне многочисленных предвестников землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах всегда отмечается роль радона, начиная с первых исследований этого предвестника [Мавлянов, Уломов, 1976] как постоянного, но неоднозначного признака. Вместе с тем исследования последних лет показывают, что проблема неоднозначности поведения радона перед сейсмическим событием связана с проблемами построения геодинамической модели подготовки события и правильной интерпретации существующей обстановки. Можно отметить, что при корректно построенной модели поведение радона однозначно или детерминировано и отражает изменение напряженно-деформированного состояния среды пе-

ред сейсмическим событием [Булашевич и др., 1996а; 1996б; Уткин, Юрков, 1997а; 1997б; King Chi-Yu et al., 1991]. В статье представлен обзор результатов, полученных в Институте геофизики Уральского отделения (УрО) РАН и подтверждающих данный тезис.

Модель среды. Все горные породы можно описать моделью некоторой трещиновато-пористой среды, которая состоит из основного скелета и хаотически расположенных открытых, проницаемых трещин и закрытых пор [Уткин, 2000]). Выделяющийся из массива (скелета) радон находится в трех средах: частично в пространстве закрытых пор, частично в трещинах, сорбируется свободной внутренней поверхностью (рис. 1).

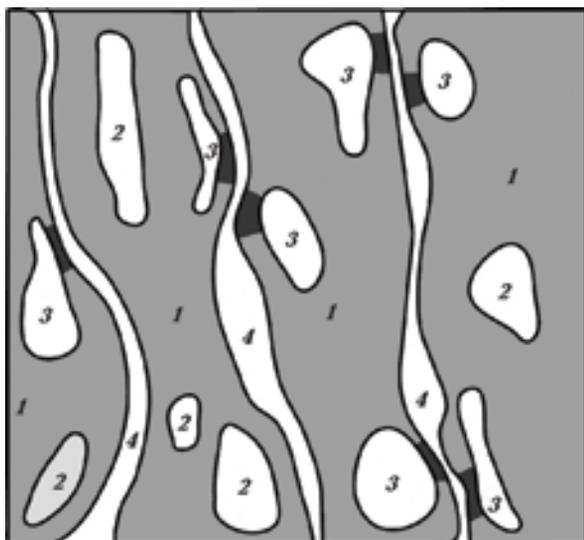


Рис.1. Модель трещиновато-пористой среды: 1 — скелет (основа) горной породы; 2 — изолированные поры; 3 — разрушающиеся поры при изменении давления; 4 — трещины.

Выделение радона из таких сред при изменении нагрузки имеет весьма специфическое поведение. Предположим, что начальной нагрузке P_0 объемной активности радона (ОАР) в породе соответствует его концентрация C_0 (рис. 2). При сжатии (P увеличивается и становится больше P_0) в условиях уменьшения трещин в первый момент выход радона увеличивается. Затем трещины перекрываются, выход радона уменьшается.

При увеличении нагрузки происходит разрушение массива, ломаются слабые перемычки между порами и выделение радона существенно увеличивается.

При растяжении массива (P снижается и становится меньше P_0) сначала выход радона уменьшается вследствие увеличения объема трещин, затем расширение трещин и раскрытие пор приводят к существенному увеличению.

Таким образом, существует некоторая область квазиупругих деформаций, при которых сжатие вызывает уменьшение выхода радона, а растяжение — его увеличение.

Рассмотренная модель была положена в основу разработки методов прогноза тектонических собы-



Рис.2. Качественная характеристика изменения объемной активности радона в горной породе при изменении внешней нагрузки на массив породы.

тий — землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах.

Методы измерения, особенности аппаратуры и действующие помехи. Как показали данные измерений, основными помехами в проведенном эксперименте являются земные приливы и метеоусловия [Козлова, Юрков, 2005]. Поэтому для снижения уровня данных помех была предложена методика измерений ОАР с откачкой почвенного воздуха из измерительной скважины. Сопоставление «классической» схемы измерений, которую услов-

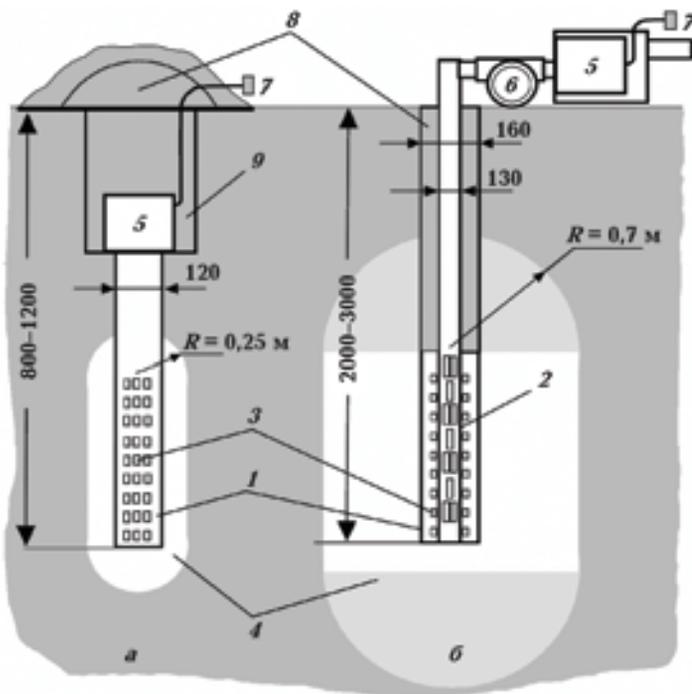


Рис.3. Сопоставление измерительных схем для регистрации объемной активности радона: а — диффузионной; б — конвекционной; 1 — обсадная труба; 2 — труба откачки воздуха; 3 — перфорационные отверстия; 4 — ориентировочная зона поступления радона; 5 — измерительный прибор (РГА); 6 — насос; 7 — выход на компьютер (RS-232); 8 — глиняный затвор; 9 — зумпф.

но можно назвать «диффузионной», и предлагаемой схемой с откачкой воздуха, которую можно назвать «конвекционной», представлено на рис. 3.

При диффузионной технологии регистрации (рис. 3, а) радон поступает в обсадную трубу, нижний край которой обычно находится на глубине 0,8—1,0 м, и далее, соответственно, в измерительный прибор в результате диффузии. Поэтому поток радона определяется только диффузионными свойствами среды. При таком способе регистрации радиус зоны поступления радона в область измерения ОАР не превышает 0,25 м.

При конвекционном способе измерений насос откачивает из обсадной трубы почвенный воздух, понижая в ней давление до 20—30 мм водяного столба. Откачанный воздух далее поступает в измерительный прибор, который регистрирует ОАР в потоке почвенного воздуха. В образовавшееся разреженное пространство радон поступает уже со значительно большего объема среды. Экспериментальные оценки показывают, что радиус эффективной зоны сбора радона составляет около 0,7 м. Это позволяет увеличить чувствительность детектора почти в 3 раза. Одновременно снижается зависимость показаний детектора от приливных движений и метеоусловий.

Сопоставление результатов, полученных при различных методах регистрации (рис. 4), показало, что при диффузионной методике измерений вариации радона, вызванные приливными движениями, достигают 50% среднего значения (около 1500 Бк/м³). Этот эффект достаточно давно известен. Поэтому для повышения точности измерений ОАР, например для целей санитарии, предлагается проводить их неоднократно и в различное время суток.

При конвекционной методике измерений приливные вариации ОАР снижаются до 7—10%. Как следствие появляется возможность выделения лунной вариации (28 сут) и, соответственно, тектонического сигнала, связанного с изменением напряженного состояния массива. Поэтому данная методика была положена в основу регистрации ОАР в эксперименте по изучению процессов подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане.

Горные удары в глубоких шахтах. Первые опыты были проведены в глубоких (500—700 м) шахтах Североуральского бокситового рудника (СУБР). В процессе экспери-

ментов регистрировалась ОАР в стенках шахты [Булашевич и др., 1996а; 1996б]. Итоговые результаты данных экспериментов показали следующее. На расстоянии до 150 м от эпицентра будущего горного удара всегда наблюдается существенное снижение концентрации радона, иногда в 3—4 раза (рис. 5, а).

Заметное снижение ОАР начинается приблизительно за 23 ч до основного события. События меньшей энергии, но происходящие на большем расстоянии от измерительной аппаратуры, задерживают восстановление ОАР до ее фонового (55 имп/мин) значения. На основании полученных данных можно утверждать, что вблизи будущего эпицентра перед событием всегда происходит сжатие массива. Кроме того, определено, что временные параметры предвестника существенно зависят от упругих свойств среды, в которой расположен детектор: в жестких известняках уменьшение ОАР начинается приблизительно за 1 ч до удара, а в более пластичных бокситах или аргиллитах за 20—25 ч (см. рис. 2).

На больших расстояниях от будущего эпицентра поведение ОАР оказалось совершенно противоположным. Перед горным ударом наблюдалось не уменьшение, а увеличение ОАР в 8—10 раз (рис. 5, б). Указанное поведение радона легко объяснить. Согласно предлагаемой модели, такое поведение ОАР возможно, если датчик расположен в зоне растяжения. Это обстоятельство очевидно, ибо в сплошной среде при ее деформации обязательно должны наблюдаться зоны как сжатия, так и растяжения. Вероятно, должна существовать и третья зона — нейтральная, в которой при деформации массива не происходит значительных изменений напряженного состояния среды. Следовательно, поведение радона при подготовке сейсмического события определяется условиями расположения детектора: в зоне сжатия — снижение ОАР, в зоне растяжения — увеличение ОАР, в нейтральной зоне — ОАР практически неизменна. Проведенные эксперименты объяснили причины неоднозначности поведения радона как предвестника сейсмического события.

Интерпретация данных по радоновому мониторингу вдоль разлома Сан-Андреас. Разработанные принципы были положены в основу интерпретации результатов уникального эксперимента Геологической службы США [King Chi-Yu et al., 1991; King Chi-Yu, 1980]. Суть эксперимента следующая. Вдоль системы разломов Калифорнии (Сан-Андреас, Ка-

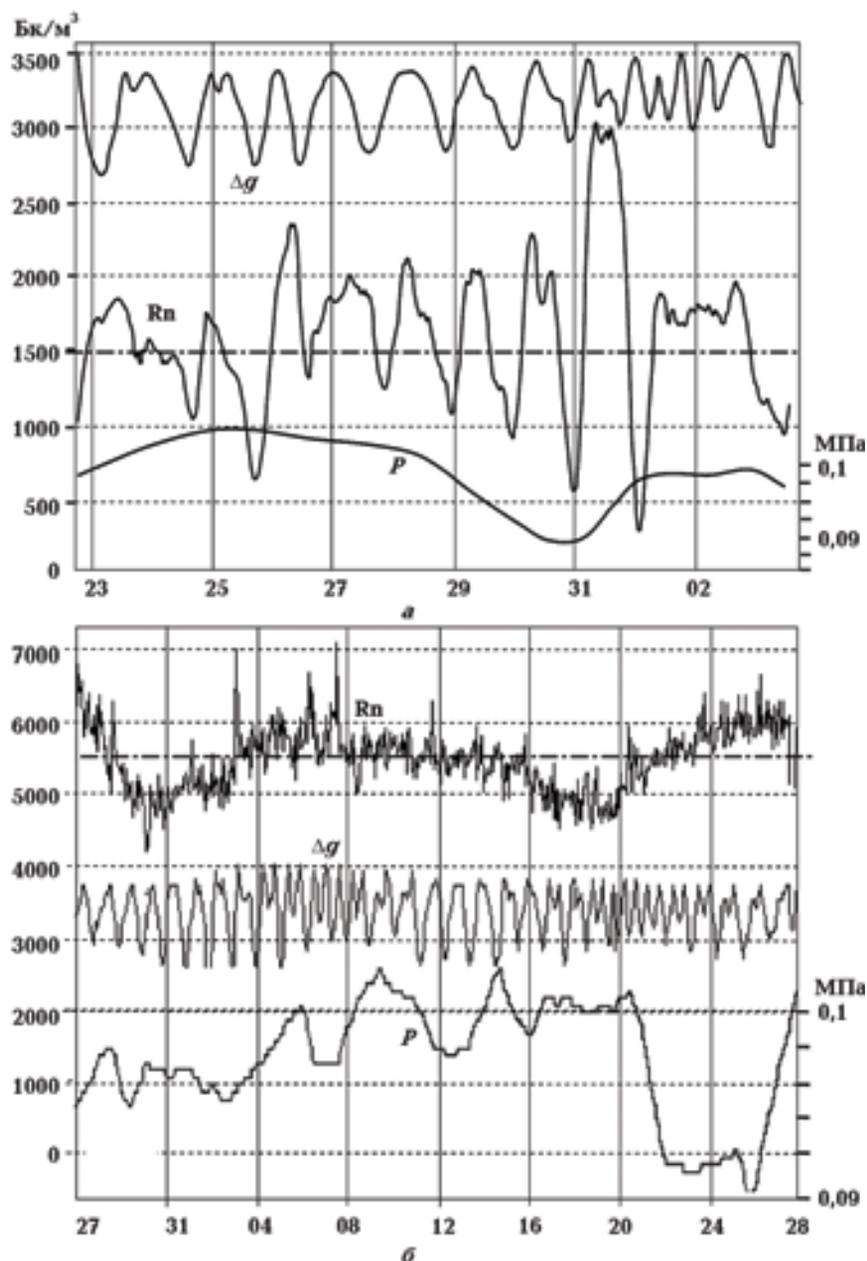


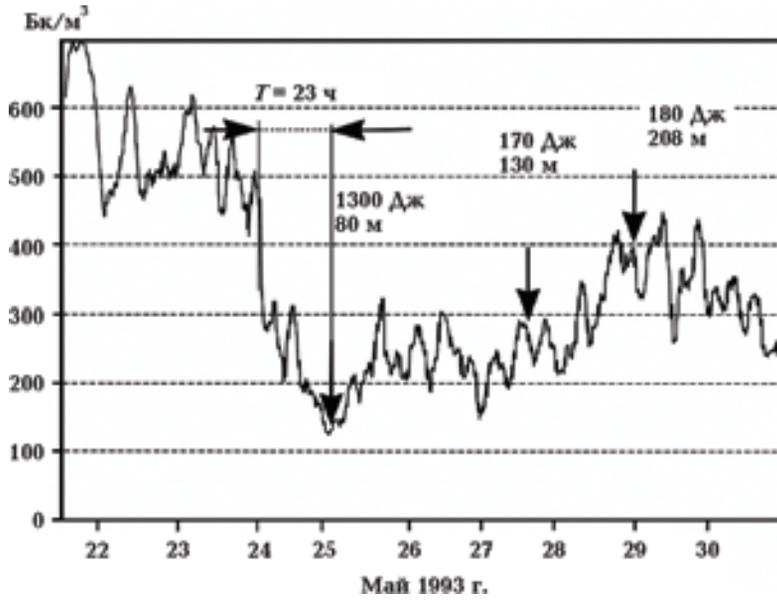
Рис. 4. Вариации объемной активности радона при различных методиках регистрации: *а* — диффузионная; *б* — конвекционная; Δg — приливные вариации; R_n — вариации ОАР; P — вариации атмосферного давления.

лаверас, Хайвард) было расположено 60 точек наблюдения за выходом радона. В каждой точке измерения проводились трековым детектором при экспозиции от 7 до 50 сут. Полученные результаты проинтерпретированы нами на основе изложенных принципов (рис. 6, 7) [Уткин, Юрков, 1997а; 1997б; 1998].

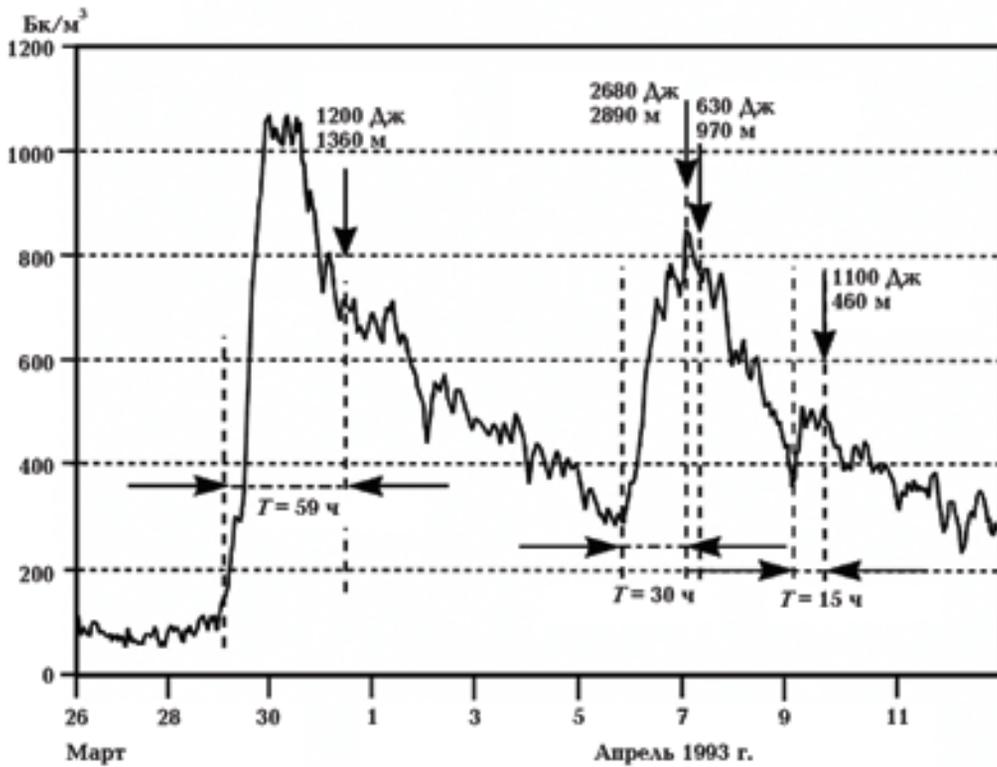
Практически по всем точкам измерения (42, 44—47, 49), наблюдается снижение ОАР (графики на правой стороне рис. 6). Эти изменения искажаются короткими выбросами радо-

на, которые связаны, как правило, с форшоками (землетрясениями малого энергетического класса). Заметное уменьшение ОАР начинается приблизительно за 90—100 сут до основного события. В точках наблюдения, расположенных на значительном удалении от эпицентра (точки 10, 29, 30) отмечается тенденция увеличения ОАР приблизительно за то же время (90—100 сут).

На рис. 7 видно, что во всех точках измерения, расположенных на небольших рассто-



а



б

Рис.5. Поведение объемной активности радона перед горным ударом на малых (а) и больших (б) расстояниях от будущего эпицентра. Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения.

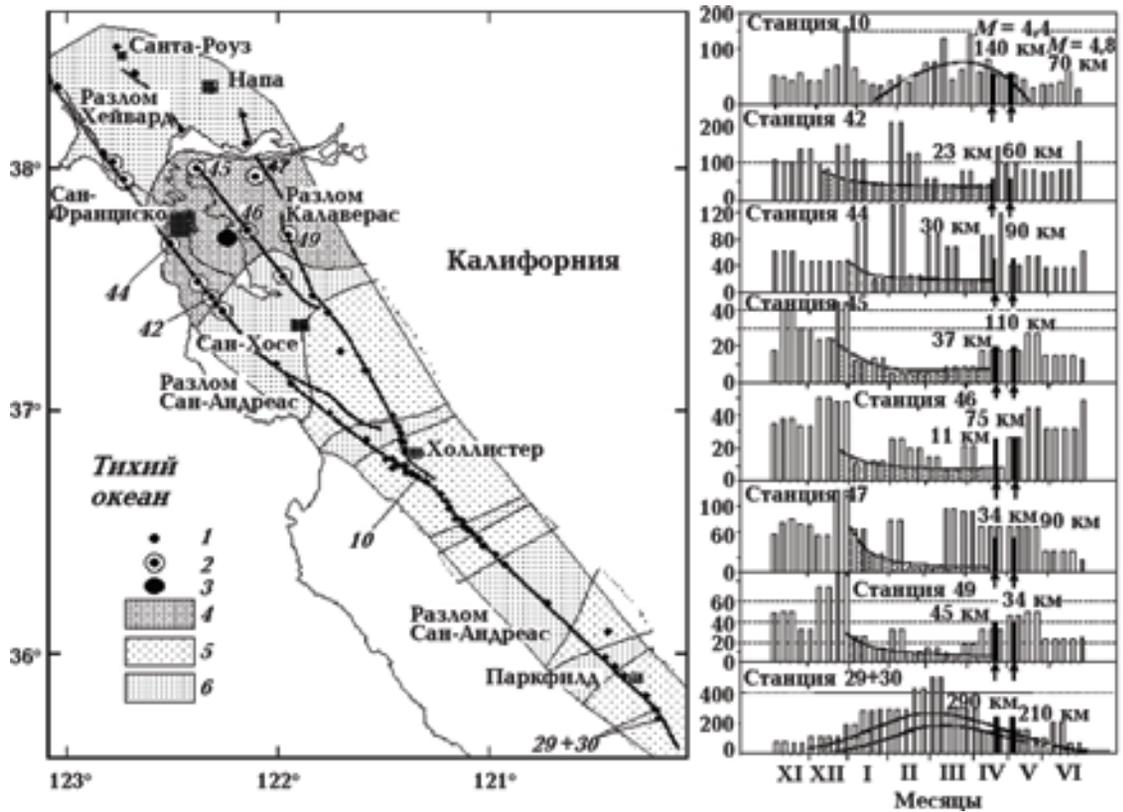


Рис.6. Поведение радона перед землетрясением с магнитудой 4,4, 25 апреля 1979г.: 1 — точка измерения; 2 — точка, в которой регистрировалось сейсмическое возмущение; 3 — эпицентр события; 4 — зона сжатия (уменьшение ОАР); 5 — зона растяжения (увеличение ОАР); 6 — нейтральная зона.

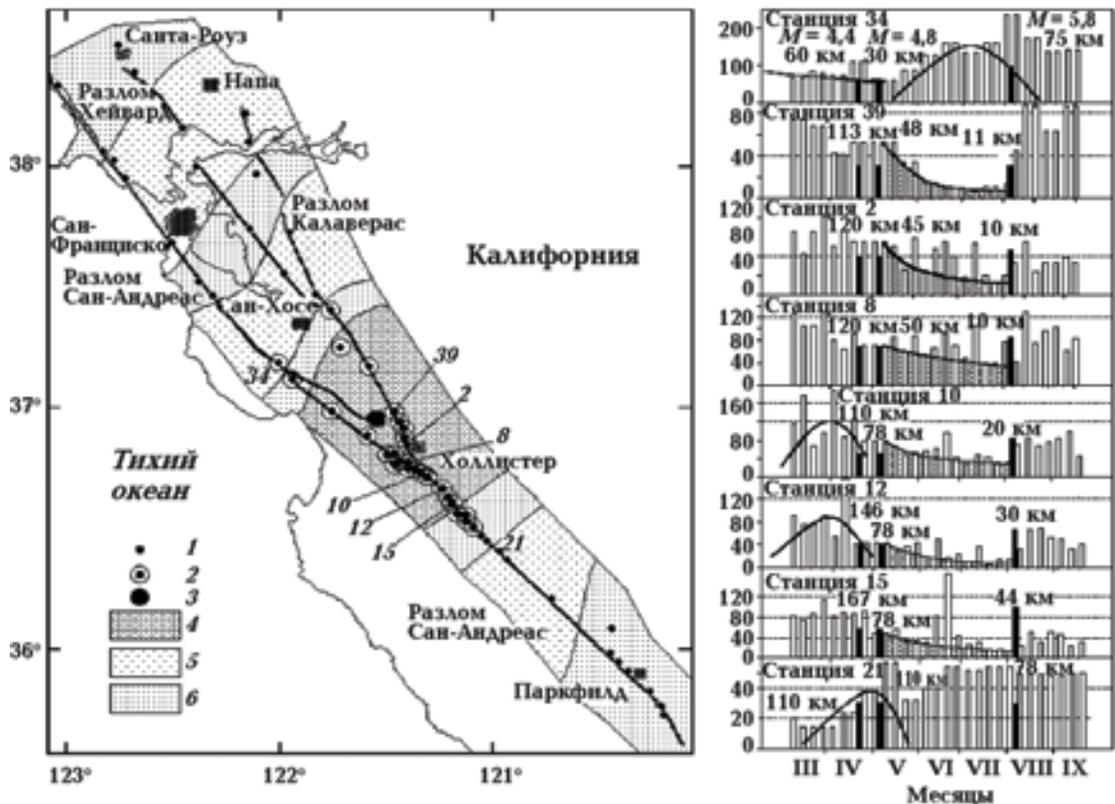


Рис.7. Поведение радона перед землетрясением с магнитудой 5,8, 05 мая 1979г. Условные обозначения см. на рис.6.

яниях от будущего эпицентра (точки 2, 8, 10, 12, 15, 39), ОАР значительно уменьшается — в 3—4 раза. Точки 21 и 34 расположены на границе двух зон — растяжения и нейтральной, что отражается на временных изменениях ОАР.

Представляет интерес факт распределения в пространстве зон сжатия и растяжения, указывающий на достаточно сложную тектоническую структуру района и изменение ее ее напряженно-деформированного состояния.

Результаты исследований на Северном Тянь-Шане. Известно, что все землетрясения на Тянь-Шане происходят на «взбросе», т. е. при надвиге тектонических пластин под действием сжимающих сил Аравийской и Индостанской плит [Юдахин, 1988; Рогожин, 2004]. Поэтому гипоцентры практически всех землетрясений находятся в пределах восходяще-

го наклона тектонических плит, о чем свидетельствует и карта современных движений по данным спутникового позиционирования (GPS) [Брагин и др., 2001; Миди, Хагер, 2001]. Эти данные получены в результате усреднения за достаточно длительный период изменений (1993—1999 гг.) — они отражают некоторые «вековые» (длительные во времени, а не мгновенные) движения блоков земной коры Тянь-Шаня.

Наиболее крупные события последних 120 лет представлены в таблице.

Построенные по данным GPS «вековые» смещения земной коры указывают весьма сложную геодинамическую обстановку на Северном Тянь-Шане (рис. 8). Весьма характерно, что зоны с отрицательными значениями смещений (зоны растяжения) всегда соседствуют с зонами положительного смещения (зонами сжатия), что хорошо известно из работы [Stein et al., 1994].

На первом этапе на станции-обсерватории Ала-Арача было проведено сопоставление деформаций, зарегистрированных при подготовке землетрясения 4 декабря 2002 г. с магнитудой около 4, и вариаций ОАР в наблюдательной скважине, расположенной непосредственно на территории обсерватории. Сопоставление синхронных данных по вариациям радона и деформациям массива, полученным в одной и той же точке (рис. 9), представляет несомненный методический интерес

Крупнейшие сейсмические события на Северном Тянь-Шане

Год	Землетрясения	Магнитуда
1885	Беловодское	6,9
1887	Верненское	7,3
1889	Чиликское	8,3
1911	Кеминское	8,2
1938	Кемин-Чуйское	6,9
1970	Сарыкамышское	6,8
1978	Заланашское	7,1
1990	Байсорунское	6,4

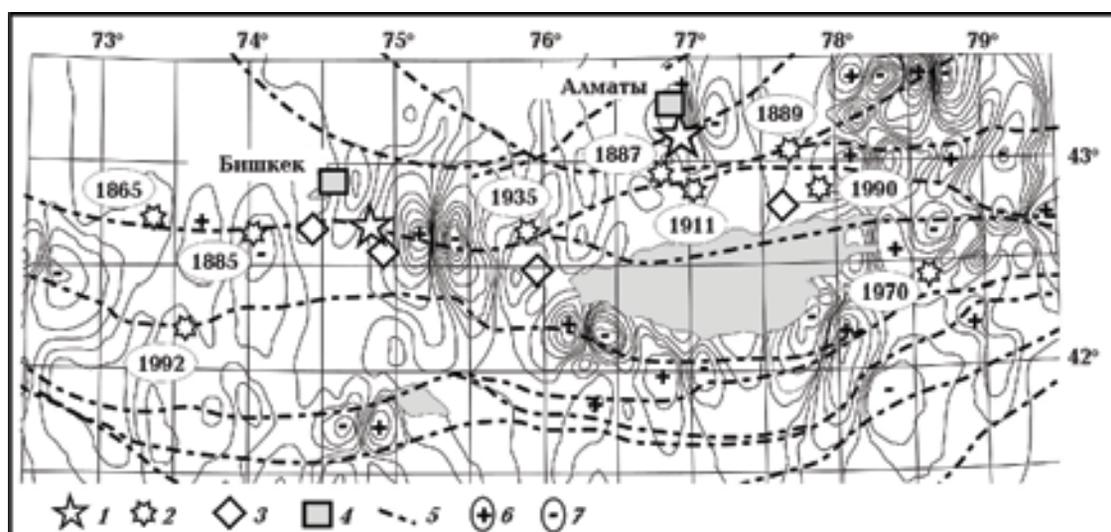


Рис. 8. Схема скоростей смещения относительно Казахстанской плиты (по В.Д.Брагину): 1 — опорные точки GPS (POL2 и SELE); 2 — крупнейшие сейсмические события за последние 120 лет; 3 — станции радонового мониторинга; 4 — крупные города; 5 — основные разломы; 6 — зоны сжатия; 7 — зоны растяжения.

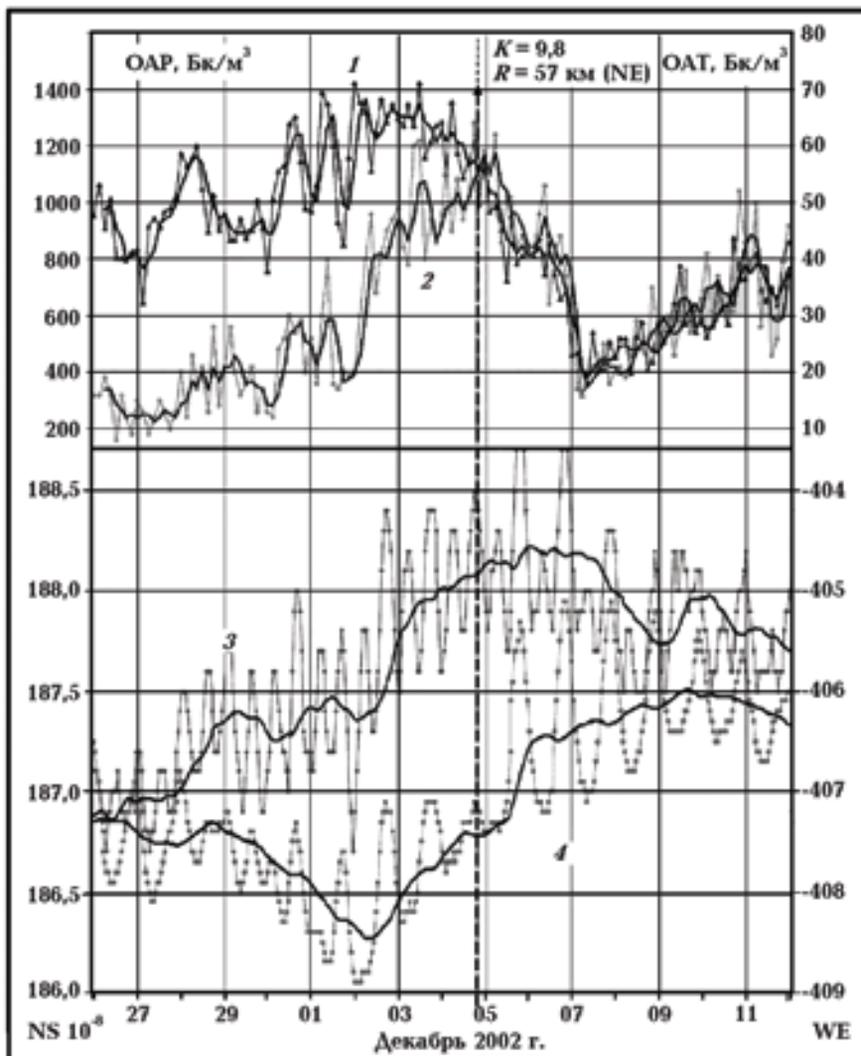


Рис.9. Сопоставление вариаций объемной активности радона (1) и торона (2) с деформациями верхней части земной коры в направлениях север—юг (3) и запад—восток (4). Прерывистой линией отмечен момент землетрясения.

в плане подтверждения и обоснования в изложенных ранее модельных представлений.

Как видно из кривых, представленных на рис.9, вариации и ОАР, и объемной активности торона (ОАТ) в деталях повторяют данные деформографа. Видно, что деформации растяжения вызывают увеличение объемной активности, что соответствует качественно предложенной ранее модели среды (см. рис.2). Однако размер вариаций существенно различен. Если деформации составляют величину порядка 10^{-7} , то вариации ОАР и ОАТ превышают сотни процентов.

При детальном рассмотрении данных рис.9 видно, что сейсмическое событие происходит на спаде концентрации радона во времени,

что уже наблюдалось ранее при изучении процесса подготовки горных ударов в глубоких шахтах (см. рис.4).

Значимое увеличение концентрации радона, по данным станции Ала-Арча (западное крыло района мониторинга), перед сейсмическим событием началось приблизительно за 90 сут. К началу декабря уровень концентрации радона составил приблизительно два фоновых (1200 по отношению к фоновым 600 Бк/м³). В то же время существенно увеличились деформации растяжения в направлении север—юг (NS). Интересно то, что кривая ОАР как бы опережает деформационные изменения в массиве. В то же время кривая (ОАТ) практически следует за всеми изменениями

деформационной картины. Это можно объяснить малым временем жизни торона (около 1 мин). Тектоническое событие произошло спустя 48 ч после достижения максимального значения ОАР и практически при максимальной ОАТ. Если первый признак (событие после максимума радона) известен и наблюдался в экспериментах как в глубоких шахтах [Булашевич и др., 1996а; 1996б], так и при исследованиях в пределах разлома Сан-Андреас [Уткин, Юрков, 1997б; 1998; King Chi-Yu et al., 1991; Уткин, 2000; King Chi-Yu, 1980], то поведение торона требует дополнительных исследований, поскольку его короткое время жизни (период полураспада составляет около 1 мин по сравнению с 3,8 сут для радона) позволяет получать более оперативную информацию. Интересно и то, что процессы восстановления деформационной картины и фонового значения ОАР происходят практически одновременно, в отличие от начала процесса подготовки сейсмического события.

Все указанные факты дают возможность предложить следующую геодинамическую модель подготовки землетрясения в Северном Тянь-Шане (рис. 10). Процесс подготовки начинается с возникновения препятствия для движения в виде либо неоднородности между движущимися навстречу друг к другу блоками либо при трении между двигающимися пластинами (рис. 10, а). Остановка блока неминуемо приводит к его деформации (рис. 10, б). При этом в головной части блока в результате *деформации изгиба* возникают напряжения сжатия (+), в приповерхностном слое — напряжения растяжения (–), а в самом массиве развивается явление дилатансии, сопровождающееся заполнением пор глубинными флюидами. Следствие этого процесса — замедление скорости прохождения упругих волн удаленных землетрясений через среднюю часть блока. При дальнейшем движении (рис. 10, в) зона дилатансии увеличивается, в зоне сжатия происходит закрытие трещин и пор, что отмечается снижением концентраций газов, а в зоне растяжения, наоборот, увеличиваются пористость и трещиноватость, что вызывает заметное увеличение газовых потоков. Наконец, упругие силы, накопленные в процессе деформации изгиба, сдвигают блок и происходит резкая разрядка напряжений с генерацией упругой волны (рис. 10, г). В дальнейшем упругие деформации уменьшаются и блок переходит в очередное квазистойчивое состояние (рис. 10, г).

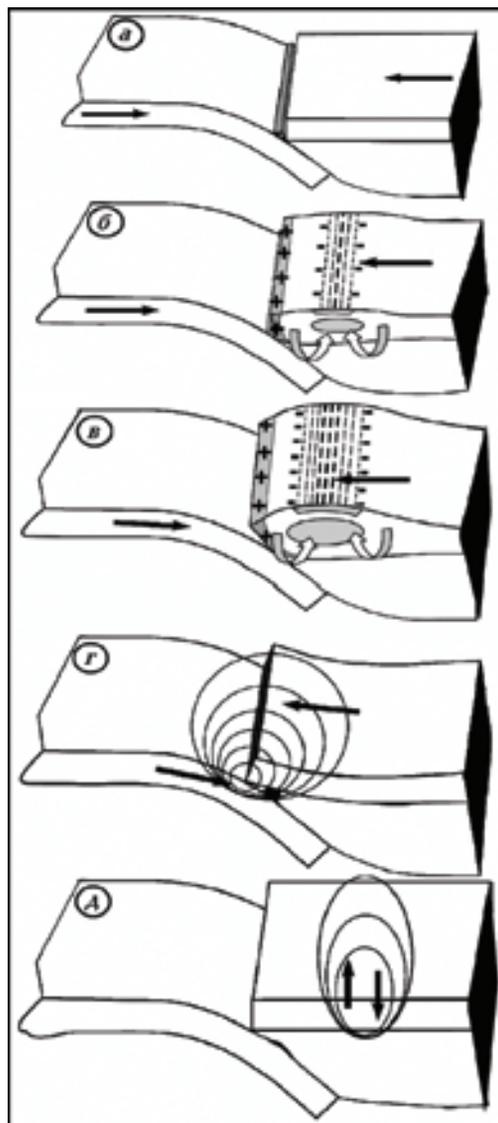


Рис. 10. Модель подготовки тектонического землетрясения для отдельного блока массива в предположении о преобладании процессов упругого сжатия перед процессами разрушения массива.

Если предположить, что массив находится в системе тектонических блоков, находящихся в движении, то модель можно представить в следующем виде (рис. 11).

При «торможении» одного из блоков в массиве (блок А) он начинает испытывать деформационный процесс, показанный на рис. 10. Причем основное накопление энергии происходит вследствие *деформации изгиба*. Незаторможенные блоки продолжают движение, генерируя при этом землетрясения малого энергетического класса, которые обычно сейсмологи классифицируют как форшоки. В



Рис. 11. Объемная модель системы подготовки землетрясения при движении блоков под действием тектонических сил: 1 — общее направление движения всей системы блоков; 2 — направление движения отдельного блока; 3 — землетрясения малого энергетического класса; 4 — деформация растяжения, возникающая при остановке блока А.

пределах же самого блока А не происходит заметных сейсмических событий, а накапливается упругая энергия, сброс которой впоследствии генерирует сейсмическое событие. Аналогичный вывод можно сделать и на основании теоретических исследований, изложенных в работе [Гольдин, 2004].

Наиболее крупным событием за время эксперимента на Северном Тянь-Шане было землетрясение класса $K = 10,5$, зарегистрированное севернее наблюдательной станции «Ананьево» (восточный борт района мониторинга). Это событие с учетом опыта мониторинга ОАР на Северном Тянь-Шане уже было практически спрогнозировано (рис. 12).

Начиная с середины сентября 2003 г. уровень фонового значения (2000 Бк/м^3) ОАР стал плавно увеличиваться и достиг к началу декабря 3500 Бк/м^3 . Прошедшая серия удаленных от станции землетрясений не изменила тенденции увеличения ОАР. За резким снижением уровня ОАР 15 декабря ожидалось сейсмическое событие, но оно не последовало. Вероятно, часть энергии деформации разрядилась в процессе проскальзывания (крипа) тектонических плит. В дальнейшем было зафиксировано новое увеличение ОАР, и после его очередного снижения (до уровня 3600 Бк/м^3) произошло землетрясение класса 10,5. На восстановление фонового уровня ОАР потребовалось около 72 ч. Поведение торона в данном случае так же своеобразно и требует дальнейших объяснений.

Согласно данным, на показания мониторинга ОАР не оказывают влияния следующие

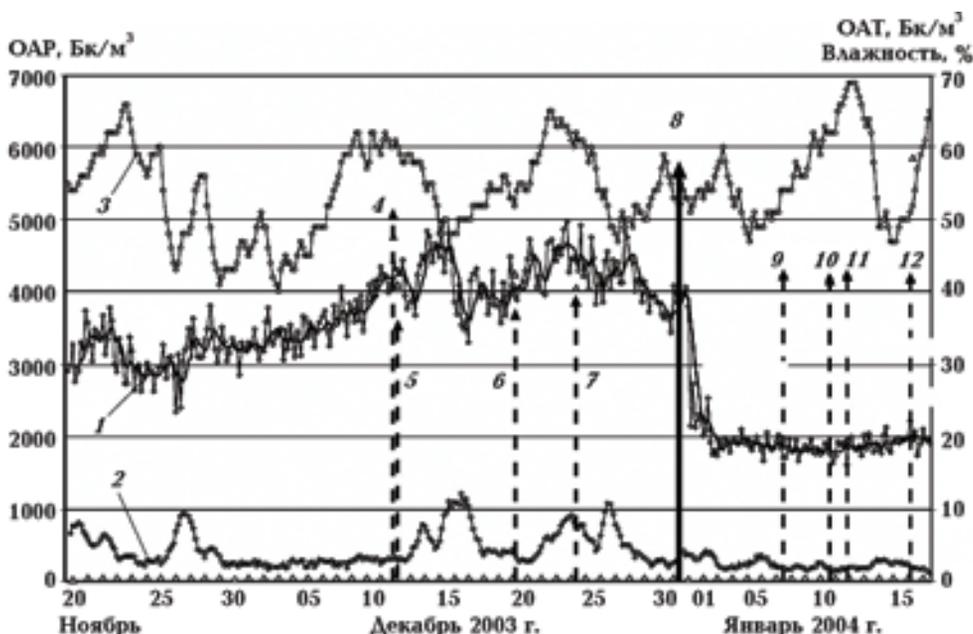


Рис. 12. Поведение объемной активности радона и торона перед событием 31 декабря 2003г: 1 — ОАР; 2 — ОАТ; 3 — влажность; сейсмические события: 4 — $K=9,5$; $R=303 \text{ км}$ (W — в западном направлении); 5 — $K=8,2$; $R=301 \text{ км}$ (W); 6 — $K=8,5$; $R=93 \text{ км}$ (NE — направление на северо-восток); 7 — $K=8,1$; $R=169 \text{ км}$ (WSW); 8 — $K=10,5$; $R=32 \text{ км}$ (N); 9 — $K=8,5$; $R=117 \text{ км}$ (WNW); 10 — $K=8,4$; $R=8,1$ (S); 11 — $K=8,5$; $R=103 \text{ км}$ (W); 12 — $K=8,4$; $R=223 \text{ км}$ (W).

щие факторы: 1) удаленные землетрясения, связанные с движением других блоков массива, например события 11 декабря 2003 г. (см. рис. 11); 2) события малого класса, происходящие в пределах того же блока, что является отражением нелинейности процессов выделения радона из массива при воздействии относительно малых усилий сжатия—растяжения; 3) малые события, радиус воздействия которых относительно мал.

Особый интерес представляют данные, полученные по наблюдательной станции «Боом» (рис. 13), расположенной в массиве осадочных пород так называемой «вулканической брекчии», характеризующейся высокой проницаемостью и малой устойчивостью.

В ближайших окрестностях рассматриваемой зоны было зафиксировано только одно событие 12 сентября 2003 г., которое практически прошло незамеченным в поле радона и торона. Тем не менее в поле обоих газов наблюдаются характерные скачкообразные изменения объемной активности. Как видно из графика, этим изменениям предшествуют, как правило, либо серия удаленных землетрясений, либо события большей мощности, произошедшие не очень далеко от наблюдательной скважины. Данный эффект отмечался ра-

нее при обработке данных эксперимента Геологической службы США [King Chi-Yu et al., 1991; King Chi-Yu, 1980]. Его можно объяснить изменением проницаемости пород осадочного комплекса при воздействии на него упругими колебаниями даже небольшой энергии.

Выводы. Результаты эксперимента показали, что в режиме принудительной конвекции вариации концентрации почвенного радона (ОАР) надежно фиксируют процесс подготовки сейсмического события в пределах отдельного блока сейсмогенного массива, в котором располагается наблюдательная скважина.

1. Подготовка сейсмического события в соседнем блоке, отделенном тектоническим разрывом от блока, в котором установлена наблюдательная скважина, не отражается в поле радона этой скважины.

2. Начало значимого изменения концентрации радона перед сейсмическим событием происходит за 90—100 сут до события, что позволяет оптимистически оценивать перспективы использования пространственно-временного мониторинга ОАР при контроле процессов подготовки тектонических землетрясений на Северном Тянь-Шане.

3. Поле радона в породах осадочного комплекса существенно зависит от общей сейс-

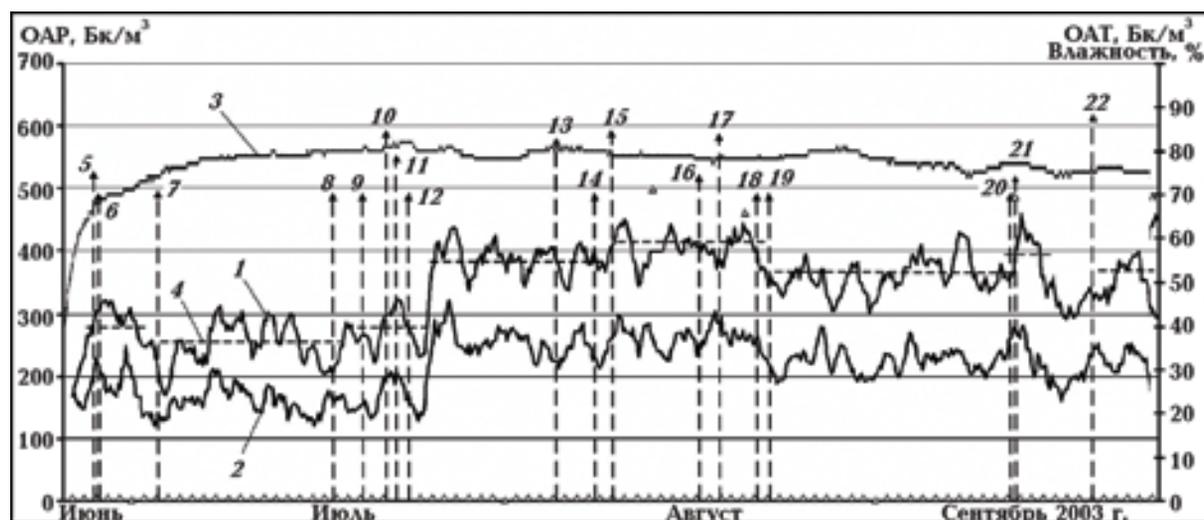


Рис. 13. Поведение объемной активности радона в районе наблюдательной станции «Боом»: 1 — ОАР; 2 — ОАТ; 3 — влажность; 4 — средние значения ОАР в периоды затишья сейсмической активности; сейсмические события: 5 — $K=8,7$; $R=189$ км (ENE); 6 — $K=8,1$; $R=241$ км (ESE); 7 — $K=8,6$; $R=134$ км (W); 8 — $K=8,1$; $R=102$ км (NW); 9 — $K=8,1$; $R=132$ км (NE); 10 — $K=9,8$; $R=132$ км (NE); 11 — $K=9,1$; $R=239$ км (E); 12 — $K=8,1$; $R=150$ км (ENE); 13 — $K=9,6$; $R=105$ км (NWN); 14 — $K=8,1$; $R=223$ км (E); 15 — $K=9,8$; $R=250$ км (E); 16 — $K=8,1$; $R=97$ км (NW); 17 — $K=9,7$; $R=144$ км (E); 18 — $K=8,1$; $R=112$ км (ENE); 19 — $K=8,1$; $R=178$ км (E); 20 — $K=8,1$; $R=97$ км (NW); 21 — $K=8,5$; $R=18$ км (NE); 22 — $K=10,2$; $R=12$ км (N).

могенной ситуации региона и скачкообразно изменяется при прохождении через массив упругих волн как местных, так и удаленных землетрясений.

4. Выбор точек регистрации ОАР необходимо проводить в пределах достаточно прочных массивов и в зонах наименьшего «веко-

вого» движения массивов, определяемого по данным GPS в течение 3—4 лет.

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

- Брагин В. Д., Баталев В. Ю., Зубович А. В., Рыбин А. К. О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности // Геология и геофизика. — 2001. — 42, № 10. — С. 1610—1621.
- Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Докл. РАН. — 1996а. — 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 // Горн. журн. — 1996б. — № 6. — С. 33—37.
- Гольдин С. В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. — 2004. — № 10. — С. 37—54.
- Козлова И. А., Юрков А. К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Урал. геофиз. вестн. — 2005. — № 7. — С. 31—34.
- Мавлянов Г. А., Уломов В. И. Поиски предвестников землетрясений в Узбекистане // Поиски предвестников землетрясений. — Ташкент, 1976. — С. 25—38.
- Мири Б. Дж., Харер Б. Х. Современное распределение деформаций в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геофизических данных // Геология и геофизика. — 2001. — 42, № 10. — С. 1622—1633.
- Рогожин Е. А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. — 2004. — № 10. — С. 81—95.
- 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. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Докл. РАН. — 1998. — 358, № 5. — С. 675—680.
- Уткин В. И., Юрков А. К. Отражение сейсмических событий в поле эксхалляции радона // Геофизика, ЕАГО. — 1997а. — № 6. — С. 50—56.
- Уткин В. И., Юрков А. К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. — 1997б. — № 4. — С. 84—92.
- Югахин Ф. Н. Геофизические поля и сейсмичность Тянь-Шаня. — Фрунзе: ФАН, 1988. — 324 с.
- King Chi-Yu Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes // J. Geophys. Res. — 1980. — 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. Geol. survey bull. — 1991. — P. 77—133.
- Stein R. S., King G. C. P., Lin J. Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors // Science. — 1994. — 265. — P. 1432—1435.