РАДОН – ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Уткин В.И., Юрков А.К. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Представлен обзор исследований по радоновому мониторингу как предвестнику сейсмических событий: тектонических землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах. Представлена схематическая модель среды и изменение объемной активности радона (ОАР) при воздействии нагрузки. На основании исследований в шахтах показано, что поведение ОАР перед событием различно в зависимости от расположения измерительного пункта. Аналогичные результаты получены при интерпретации эксперимента по радоновому мониторингу США и Северному Тянь-Шаню. Показана нелинейность выхода радона в зависимости от изменения напряженного состояния среды и особенности регистрации поля радона. Представлена геодинамическая модель и рассмотрены ожидаемые эффекты в поле радона. Приведены результаты изменения поля радона перед землетрясениями. Показано, что заметные изменения в поле радона наблюдаются за 90–100 дней до сейсмического события и характерные – за 3–5 дней. Показано как реагирует поле радона в пределах комплекса осадочных пород на прохождение волн удаленных землетрясений. Представленные данные показывают высокую однозначность показаний мониторинга радона при изучении процесса подготовки землетрясений.

RADON – THE INDICATOR OF GEODYNAMIC PROCESSES

Outkin V.I., Yurkov A.K. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The review of researches on radonic monitoring, as the predict of seismic events: tectonic earthquakes and mountain impacts in deep mines is presented. The schematic model of environment and change of volumetric activity of radon (VAR) at influence of loading is presented. On the basis of researches in mines it is shown, that behaviour VAR before event variously depending on an arrangement of measuring site. Similar results are received at interpretation of experiment on radonic monitoring the USA and in investigations Northern TIAN-Shan. Nonlinearity of an output of radon depending on change of the intense condition of environment and feature of registration of a radon field is shown. The geodynamic model is presented and expected effects in a radon field are considered. Results of a radon field change before earthquakes are resulted. It is shown, that appreciable changes in a radon field 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 breeds the radon field reacts to passage of waves of the removed earthquakes. The presented data show high unambiguity (determined) of indications of radonic monitoring at studying process of earthquakes

На фоне многочисленных предвестников землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах всегда отмечается роль радона, начиная с первых исследований этого предвестника (Мавлянов, 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. Можно сказать, что при корректно построенной модели поведение радона однозначно (или детерминировано) отражает изменение напряженно-деформированного состояния среды перед сейсмическим событием. Обзор результатов, полученных за последнее десятилетие в Институте геофизики УрО РАН, подтверждающих данный тезис, рассматривается в данной статье.

Модель среды

Все горные породы можно описать моделью некоторой трещиновато-пористой средой, которая состоит из основного скелета и хаотически расположенных открытых, проницаемых трещин и закрытых пор (Уткин, 2000). Выделяющийся из массива (скелета) радон находится частично в пространстве закрытых пор и частично в трещинах (рис. 1).

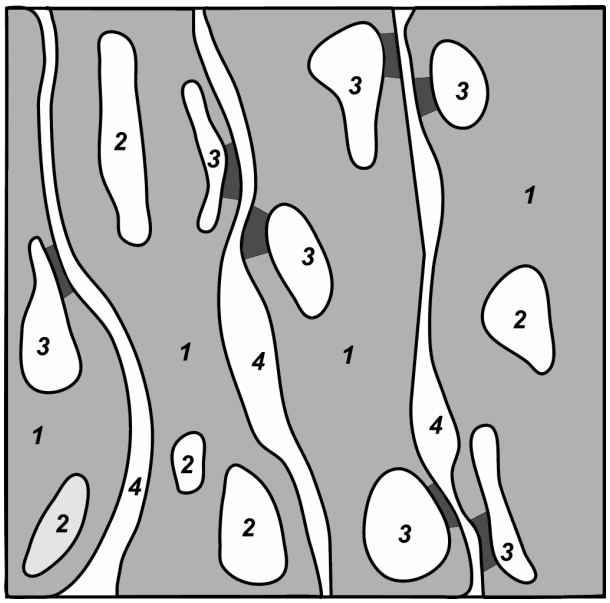

Рис. 1. Применяемая модель трещиновато-пористой среды: 1 – скелет (основа) горной породы; 2 – изолированные поры; 3 – разрушающиеся поры при изменении давления; 4 – трещины

Выделение радона из такой среды при изменении нагрузки имеет весьма специфическое поведение. Предположим, что начальной нагрузке Ро объемной активности радона в породе соответствует концентрация Со (рис. 2). При сжатии (Р увеличивается и становится больше Ро) за счет уменьшения трещин в первый момент выход радона увеличивается. Затем трещины перекрываются, выход радона уменьшается.

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

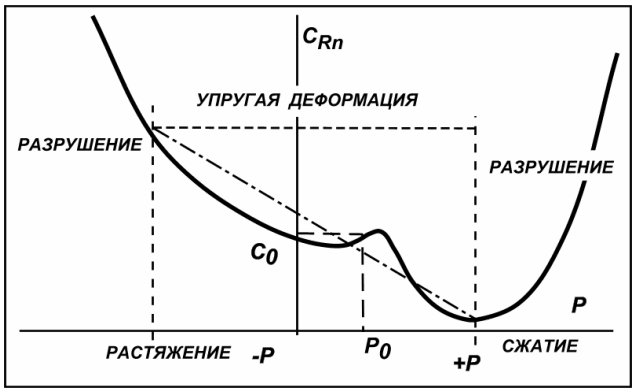

Рис. 2. Качественная характеристика изменения концентрации радона в горной породе при изменении нагрузки

При растяжении массива (Р уменьшается и становится меньше Ро) сначала происходит уменьшение выхода радона за счет увеличения объема трещин. Затем расширение трещин и раскрытие пор приводит к сущесвыхода радонатвенному увеличению .

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

Рассмотренная модель была положена в основу разработки методов прогноза тектонических событий – землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах.

Горные удары в глубоких шахтах

Первые опыты были проведены в глубоких (500–700 м) шахтах Североуральского бокситового рудника (СУБР). В процессе экспериментов регистрировалась объемная активность радона в стенках шахты (Булашевич, 1996а, 1996б). Итоговые результаты данных экспериментов показали следующее. На расстояниях до 150 метров от эпицентра будущего горного удара всегда наблюдается существенное снижение концентрации радона (иногда в 3–4 раза). На рис. 3 приведены графики снижения объемной активности почвенного радона (ОАР) перед горным ударом. Заметное снижение ОАР начинается приблизительно за 23 часа до основного события. События меньшей энергии, но происходящие на большем расстоянии от измерительной аппаратуры, задерживают восстановление ОАР до фонового (55 имп/мин) значения ОАР. На основании представленных данных можно утверждать, что вблизи будущего эпицентра перед событием всегда наблюдается сжатие массива. Кроме того, было определено, что временные параметры предвестника существенно зависят от упругих свойств среды, в которой расположен детектор: в жестких известняках начало уменьшения ОАР начинается приблизительно за час до удара, а в более пластичных бокситах или аргиллитах за 20–25 часов (рис. 3).

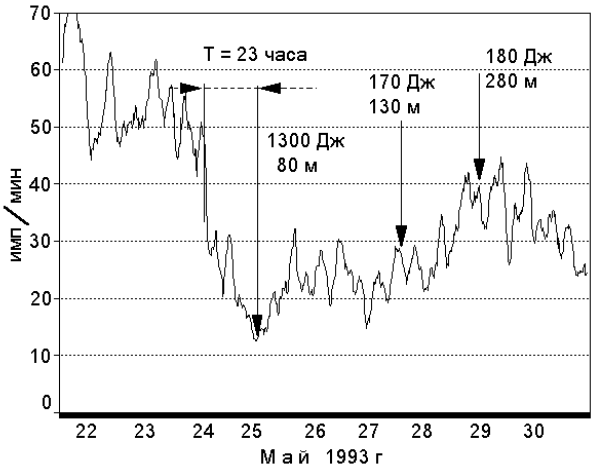

Рис. 3. Поведение ОАР перед горным ударом на малых расстояниях от будущего эпицентра. Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения. Датчик радона был расположен в бокситах

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. 4).

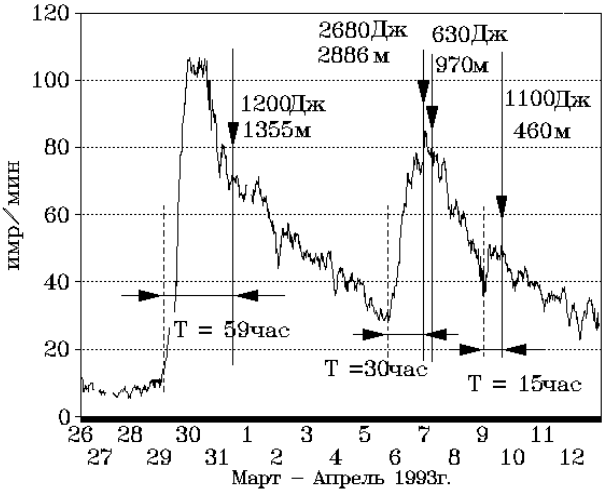

Рис. 4. Поведение ОАР перед горным ударом на больших расстояниях от будущего эпицентра. Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения

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. Очевидно, должна существовать и третья зона – нейтральная, в которой при деформации массива не происходит существенных 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) или в нейтральной зоне (ОАР практически неизменно). 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, 1980, 1991). Существо эксперимента следующее. Вдоль системы разломов Калифорнии (Сан-Андреас, Калаверас, Хайвард) было расположено 60 точек наблюдения за выходом радона. В каждой точке измерения проводились трековым детектором при экспозиции от 7 до 50 дней. Полученные результаты были проинтерпретированы нами на основе изложенных принципов. Примеры интерпретации приведены на рис. 5-6 (Уткин, 1997а, 1997б, 1998).

Практически по всем точкам измерения (станции 42, 44, 45, 46, 47, 49) наблюдается снижение ОАР (графики на правой стороне рисунков). Эти изменения искажаются короткими выбросами радона, которые связаны, как правило, с форшоками (землетрясениями малого энергетического класса). Заметное уменьшение ОАР начинается приблизительно за 90–100 дней до основного события. В точках, расположенных на значительном удалении от эпицентра (станции 10, 29, 30), наблюдается тенденция увеличения ОАР приблизительно за то же время (90–100 дней).

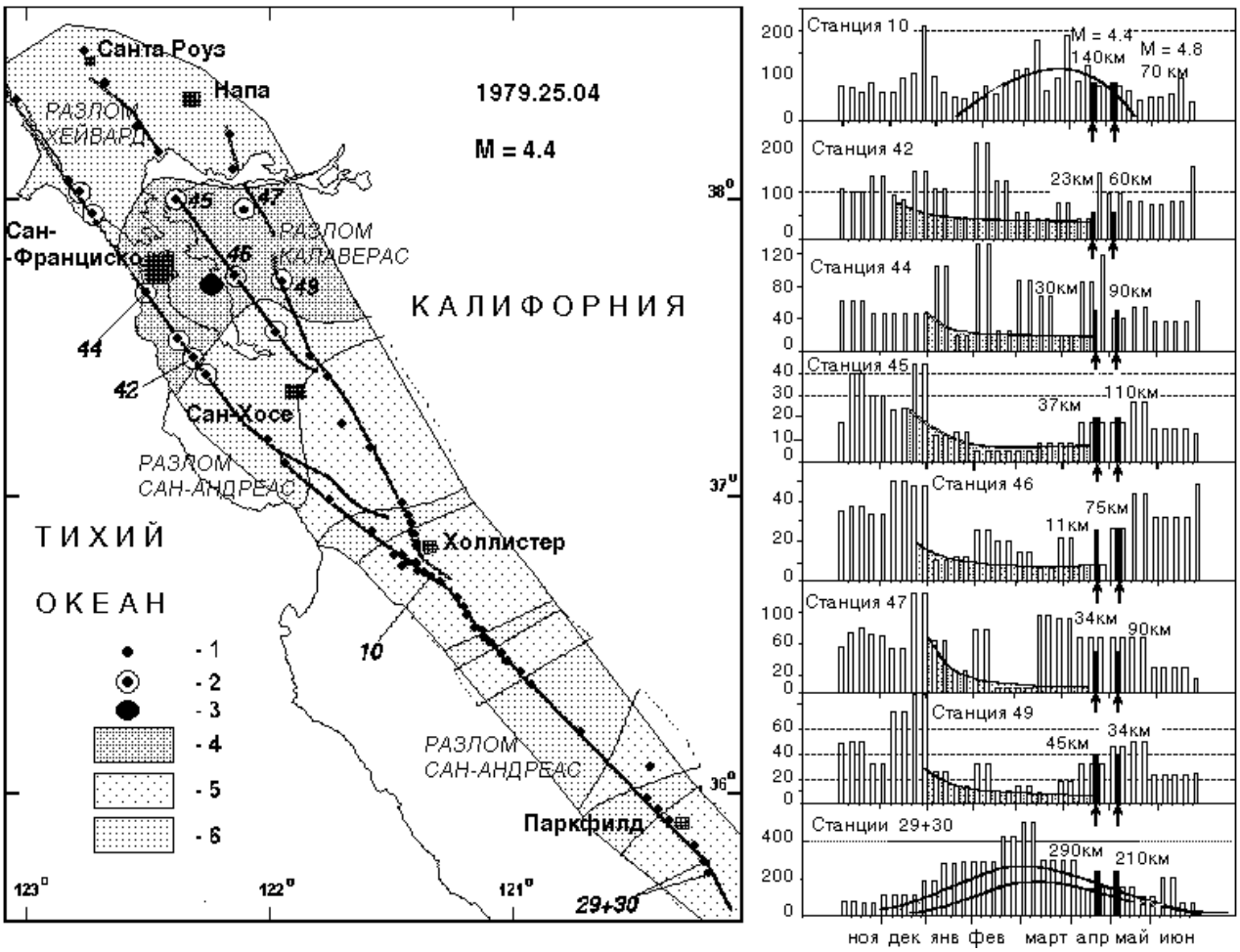

Рис. 5. Поведение радона перед землетрясением с магнитудой 4,4 25 апреля 1979 г.: 1 – расположение точек измерения; 2 – точки, в которых регистрировалось сейсмическое возмущение; 3 – эпицентр события; 4 – зона сжатия (зона уменьшения ОАР); 5 – зона растяжения (зона увеличения ОАР); 6 – нейтральные зоны

Данные поведения радона перед землетрясением 05 августа 1979 года с магнитудой 5,8 представлены на рис. 6.

Из приведенной схемы видно, что во всех точках измерения, расположенных на небольших расстояниях от будущего эпицентра (станции 39, 2, 8, 10, 12, 15), наблюдается значительное уменьшение ОАР – в 3–4 раза. В точках 21 и 34, расположенных на границе двух зон – растяжения и нейтральной, на временных изменениях ОАР не наблюдается закономерных изменений.

На приведенных примерах представлен интересный факт распределения в пространстве зон сжатия и растяжения, которые отражают достаточно сложную тектоническую структуру района и изменения ее напряженно-деформированного состояния.

Методы измерения, особенности аппаратуры и действующие помехи

Как показали данные проведенных измерений, основными помехами в эксперименте являются земные приливы и метеоусловия (Козлова, 2005). Поэтому для снижения уровня этих помех была предложена методика измерений объемной активности радона с откачкой почвенного воздуха из измерительной скважины.

Сопоставление «классической» схемы измерений, которую условно можно назвать «диффузионной», и предлагаемой с откачкой воздуха, которую можно назвать «конвекционной», представлены на рис. 7.

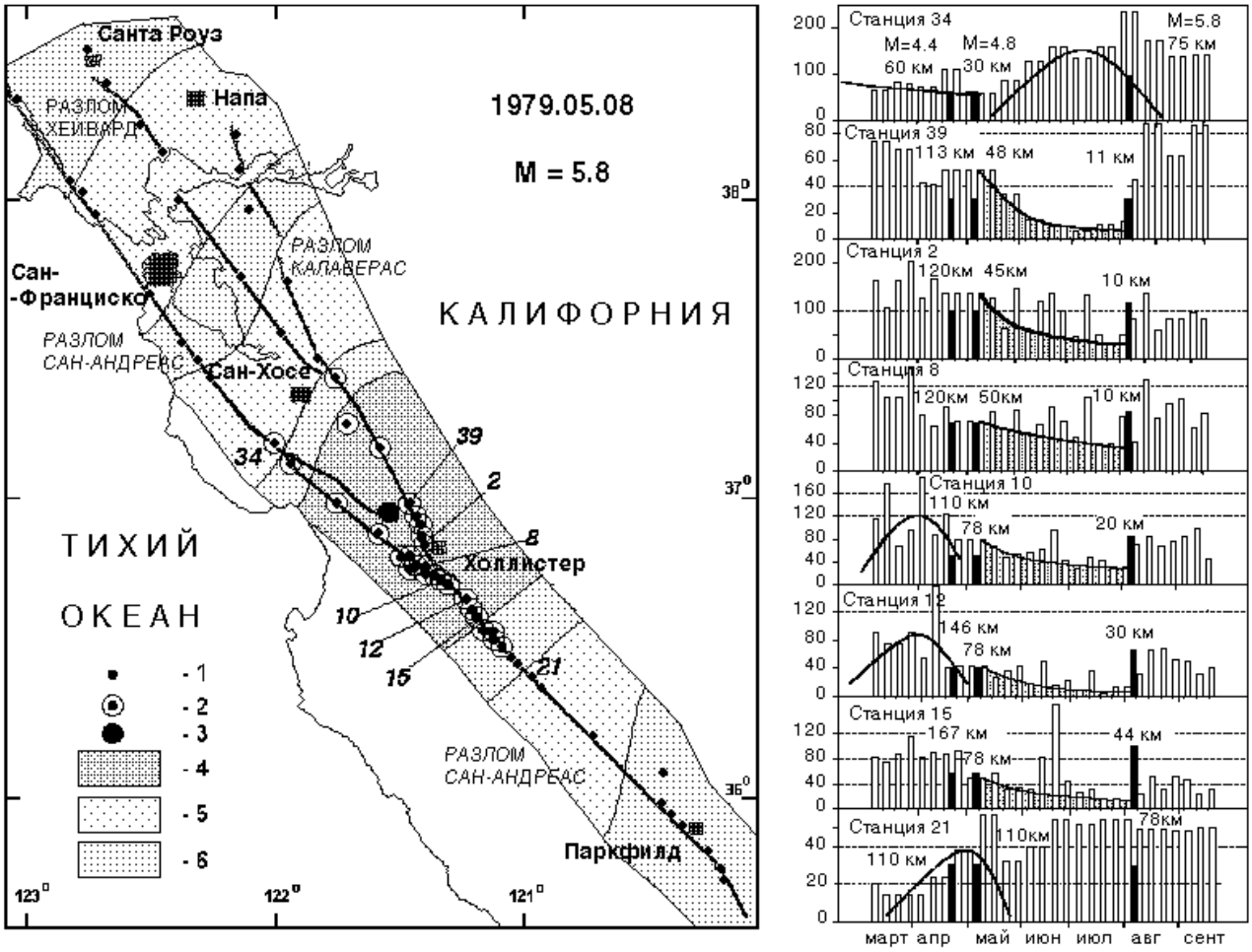

Рис. 6. Поведение радона перед землетрясением с магнитудой 5,8 05 мая 1979 г. Условные обозначения см. рис. 5

При диффузионной технологии регистрации (рис. 7а) радон поступает в обсадную трубу, нижний край которой обычно находится на глубине 0,8–1,0 м, и далее, соответственно, в измерительный прибор. Поэтому поток радона определяется только диффузионными свойствами среды. При таком способе регистрации радиус зоны поступления радона в область измерения ОАР (R) 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 три раза. Одновременно снижается зависимость показаний детектора от приливных движений и метеоусловий.

Сопоставление результатов, полученных при различных методах регистрации, показано на рис. 8. На представленных графиках видно, что при диффузионной методике измерений вариации радона, вызванные приливными движениями, достигают 50 % от среднего значения (около 1500 Бк/м^3). Этот эффект достаточно давно известен. Поэтому при точных измерениях ОАР, например для целей санитарии, предлагается делать неоднократно и в различное время суток.

При конвекционной методике измере-

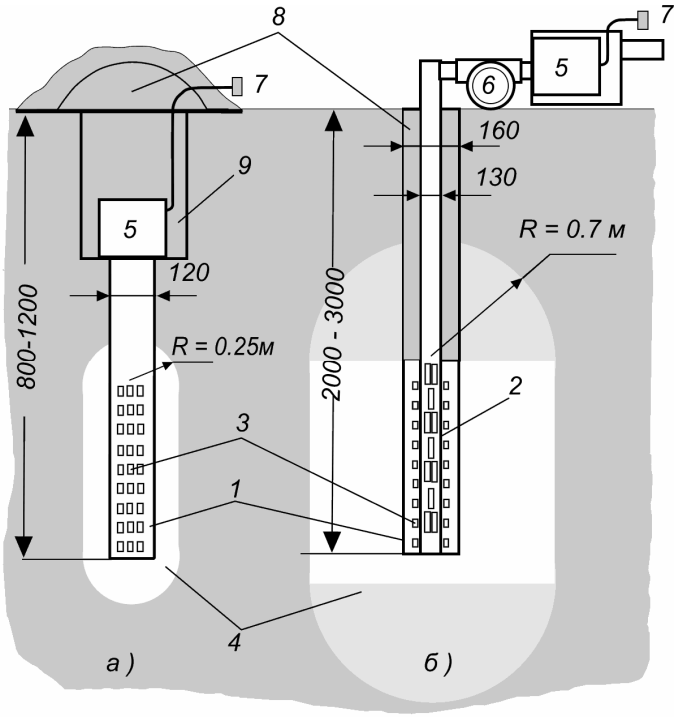

Рис. 7. Сопоставление измерительных схем для регистрации ОАР: а) диффузионная; б) конвекционная; 1 – обсадная труба; 2 – труба откачки воздуха; 3 – перфорационные отверстия; 4 – ориентировочная зона поступления радона; 5 – измерительный прибор (РГА); 6 – насос; 7 – выход на компьютер (RS-232); 8 – глиняный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

ний приливные вариации ОАР снижаются до 7–10 %. Как следствие этого появляется возможность выделения лунной вариации (25 дней) 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.

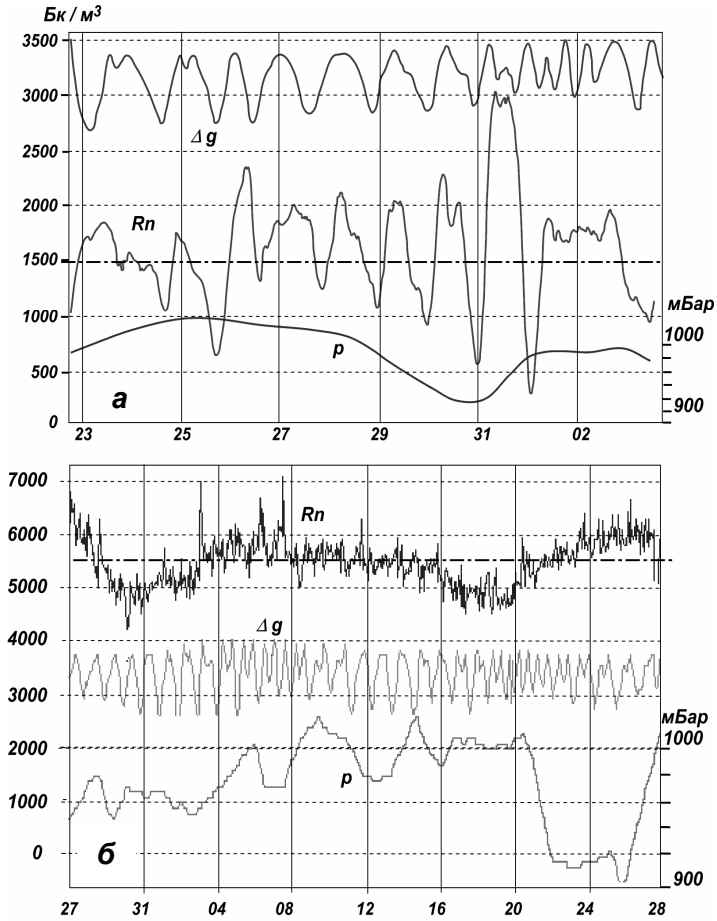

Рис. 8. Вариации ОАР при различных методиках регистрации:
а) диффузионная;
б) конвекционная;
Δg – приливные вариации;
Rn – вариации ОАР;
P – вариации атмосферного давления

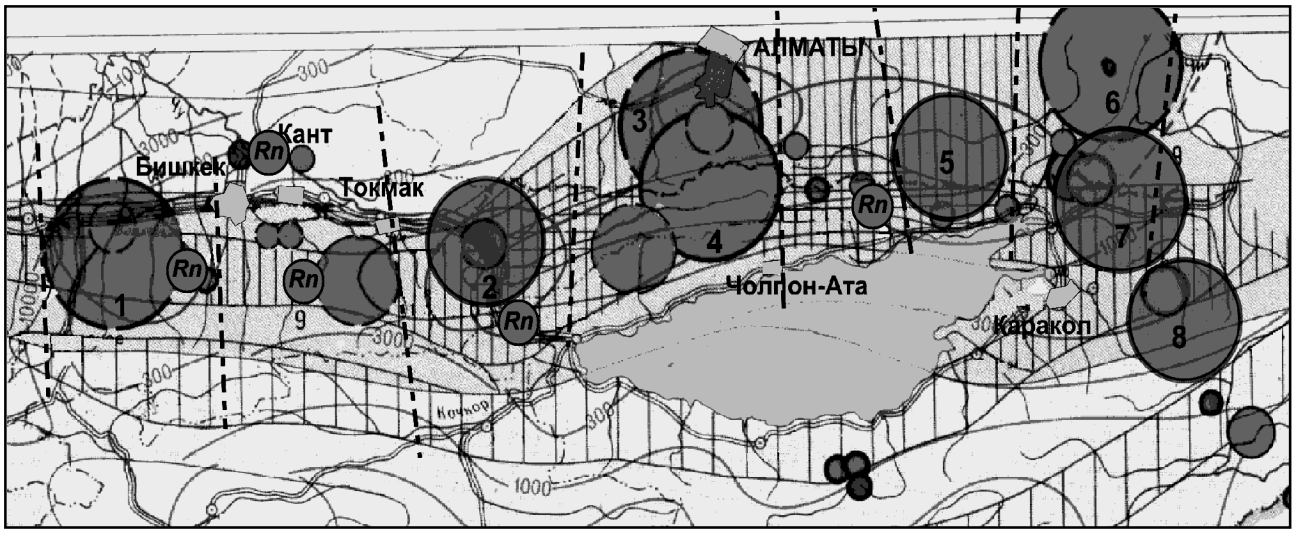

Рис. 9. Обзорная схема крупнейших тектонических землетрясений на Северном Тянь-Шане за последние 120 лет: 1 – Беловодское, M=6,9 (1885); 2 – Кемин-Чуйское, M=6,9 (1938); 3 – Верненское, M=7,3 (1887); 4 – Кеминское, M=8,2 (1911); 5 – Байсорунское, M=6,4 (1990); 6 – Чиликское, M=8,3 (1889); 7 – Заланашское, M= 7,1 (1978); 8 – Сарыкамышское, M=6,8 (1970); расположение основных трансформных разломов – прерывистая линия и мест установки радоновых станций – Rn

Результаты исследований на Северном Тянь-Шане

На рис. 9. представлен район работ с указанием наиболее крупных исторических землетрясений, расположения основных трансформных разломов, разделяющих весь район эксперимента на отдельные блоки (Рогожин, 2004).

Известно, что все землетрясения на Тянь-Шане происходят на «взбросе», то есть при надвиге тектонических пластин под действием сжимающих сил Аравийской и Индостанской плит (Юдахин, 1988). Поэтому гипоцентры практически всех землетрясений находятся в пределах восходящего наклона тектонических плит. Об этом свидетельствует и карта современных движений по данным спутникового позиционирования (GPS), предоставленная в статьях (О качестве…, 2001; Миди, 2001).

Эти данные получены в результате усреднения за достаточно длительный период измерений (1993-1999 гг.), поэтому они отражают, можно сказать, некоторые «вековые» (длительные во времени, а не мгновенные) движения блоков земной коры Тянь-Шаня. Построенные по данным GPS «вековые» смещения земной коры свидетельствуют о весьма сложной геодинамической обстановке на Северном Тянь-Шане (рис. 10). Весьма характерно, что зоны с отрицательными значениями смещений (зоны растяжения) всегда соседствуют с зонами положительного смещения (зонами сжатия), что хорошо известно из работы (Stein, 1994).

На первом этапе на станции-обсерватории Ала-Арча было проведено сопоставление деформаций, зарегистрированных при подготовке землетрясения 4 декабря 2002 г. с магнитудой около 4 деформографом этой станции, с вариациями объемной активности радона в наблюдательной скважине, расположенной непосредственно в пределах территории обсерватории (рис. 11).

Сопоставление синхронных данных по вариациям радона и деформациям массива, полученным 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. 11 данных, вариации как радона, так и торона в деталях повторяют данные деформографа. Видно, что деформации растяжения

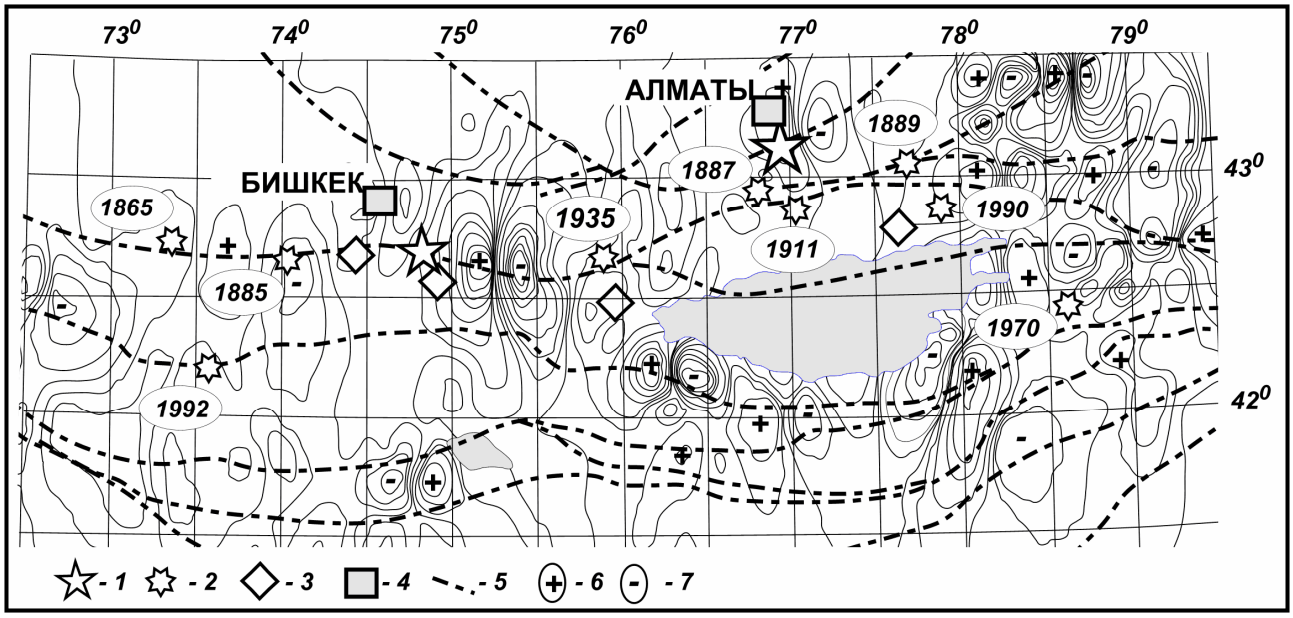

Рис. 10. Схема скоростей смещения относительно казахстанской плиты по В.Д. Брагину): 1 – опорные точки GPS: POL2 и SELE; 2 – крупнейшие сейсмические события за последние 120 лет; 3 – станции радонового мониторинга; 4 – крупные города; 5 – основные разломы; 6 – зоны сжатия; 7 – зоны растяжения

вызывают увеличение величины объемной активности, что соответствует качественно предложенной ранее модели среды (рис. 2). Однако размер вариаций существенно разный. Если деформации составляют величину порядка 10^{-7}, то вариации радона и торона превышают сотни процентов.

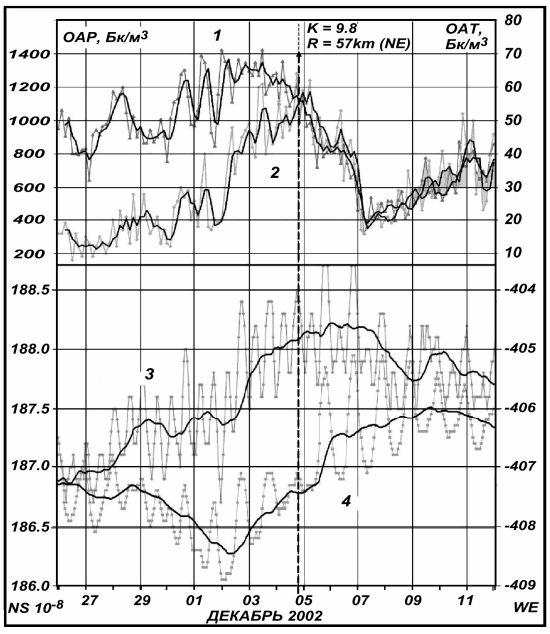

Рис. 11. Сопоставление вариаций ОАР и объемной активности торона с деформациями верхней части земной коры: 1 – вариации ОАР; 2 – вариации объемной активности торона; 3 – деформация в направлении Север-Юг; 4 – деформации в направлении Запад-Восток. Прерывистой линией отмечен момент землетрясения

При детальном рассмотрении данных рис. 11 видно, что сейсмическое событие происходит на спаде концентрации радона во времени, что уже наблюдалось ранее при изучении процесса подготовки горных ударов в глубоких шахтах (рис. 4).

Значимое увеличение концентрации радона по станции Ала-Арча (западное крыло района мониторинга) перед сейсмическим событием началось приблизительно за 90 дней. К началу декабря уровень концентрации радона составил приблизительно два фоновых (1200 по отношению к фоновым 600 Бк/м^3). В это же время наблюдается существенное увеличение деформации растяжения в направлении Север-Юг (NS). Интересно то, что кривая ОАР как бы опережает деформационные изменения в массиве. В то же время кривая объемной активности торона (ОАТ) практически следует за всеми изменения деформационной картины. Это можно объяснить малым временем жизни торона (около 1 минуты). Тектоническое событие произошло спустя 48 часов после достижения максимума концентрации радона и практически при максимальной концентрации торона. Если первый признак (событие после максимума радона)

известен и наблюдался в экспериментах как в глубоких шахтах (Булашевич, 1996а), так и при исследованиях в пределах разлома Сан-Андреас (Уткин, 1998; King Chi-Yu, 1991), то поведение торона требует дополнительных исследований, поскольку его короткое время жизни (время полураспада равно около 1 мин по сравнению с 3,8 дня для радона) позволяет получать более оперативную информацию. Интересно и то, что процессы восстановления деформационной картины и фонового значения концентрации радона 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. 12).

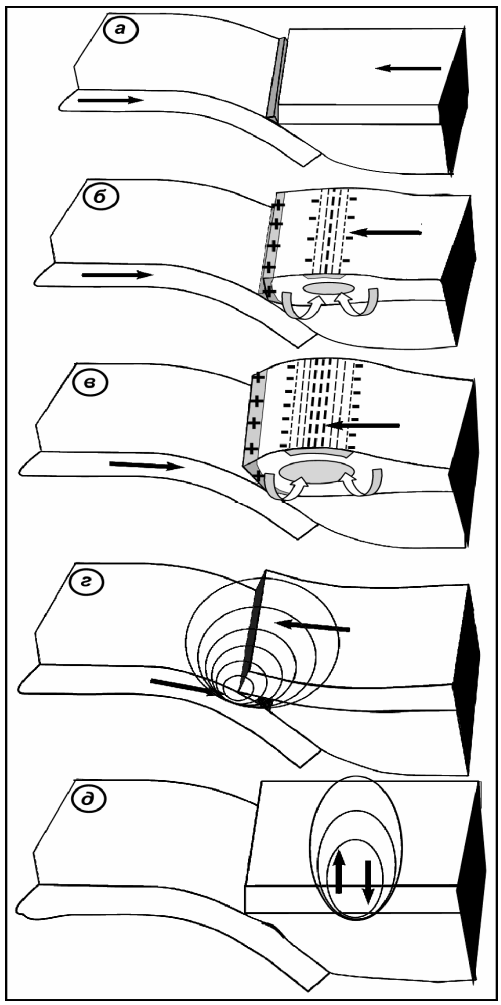

Рис. 12. Модель подготовки тектонического землетрясения для отдельного блока массива в предположении о преобладании процесов упругого сжатия перед процессами разрушения массива

Процесс подготовки начинается с возникновения препятствия для движения в виде либо неоднородности между движущимися навстречу друг другу блоками, либо за счет трения между двигающимися пластинами (рис. 12а). Остановка блока неминуемо приводит к его деформации (рис. 12*б*). При этом в головной части блока ***за счет деформации изгиба*** возникают напряжения сжатия (+), в приповерхностном слое напряжения растяжения (-), а в самом массиве развивается явление дилатансии, сопровождающееся заполнением пор глубинными флюидами. Следствием этого процесса является замедление прохождения упругих волн удаленных землетрясений через среднюю часть блока. При дальнейшем движении (рис. 12*в*) зона дилатансии увеличивается, в зоне сжатия наблюдается закрытие трещин и пор, что отмечается снижением концентраций газов, а в зоне растяжения, наоборот, увеличивается пористость и трещиноватость, что приводит к заметному увеличению газовых потоков. Наконец, упругие силы, накопленные в процессе деформации изгиба, сдвигают блок и происходит резкая разрядка напряжений с генерацией упругой волны (рис. 12*г*). В дальнейшем упругие деформации уменьшаются, и блок переходит в очередное квазиустойчивое состояние (рис. 12*д*).

Если предположить, что наш массив находится в системе движущихся тектонических блоков, то модель можно представить в следующем виде (рис. 13).

При «торможении» одного из блоков в массиве (блок ***А*** на графике рис. 13) он начинает испытывать деформационный процесс, представленный на рис. 12. Причем основное накопление энергии происходит ***за счет деформации изгиба.*** Незаторможенные блоки продолжают движение, генерируя при этом землетрясения малого энергетического класса, которые обычно сейсмологи

Рис. 13. 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 ***A***

классифицируют как форшоки. В пределах же самого блока ***A*** не происходит заметных сейсмических событий, а происходит накопление упругой энергии, сброс которой в последствии генерирует сейсмическое событие. Аналогичный вывод можно сделать и на основании теоретических исследований, изложенных в статье (Гольдин, 2004).

Наиболее крупным событием за время эксперимента на Северном Тянь-Шане было землетрясение класса К=10,5, зарегистрированное севернее наблюдательной станции «Ананьево» (восточный борт района мониторинга). Это событие, учитывая имеющийся к тому времени опыт мониторинга радона на Северном Тянь-Шане, можно сказать, уже было практически спрогнозировано (рис. 14.).

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

Из представленных данных видно, что на показания радонового мониторинга не

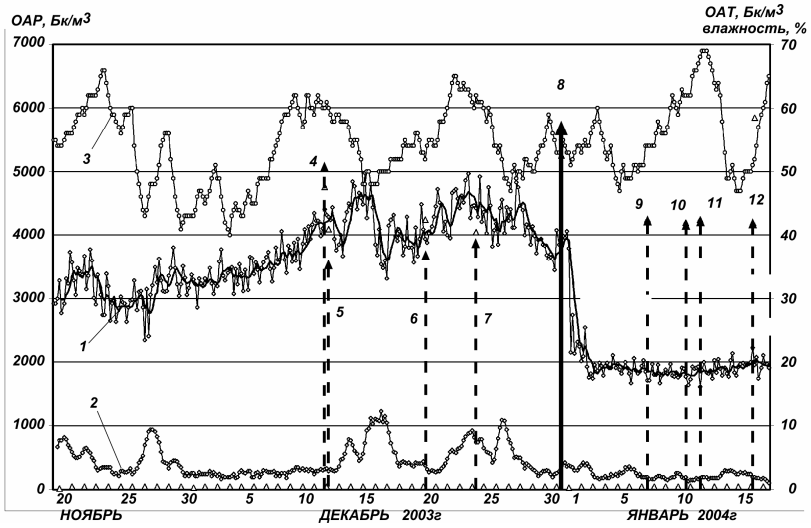

Рис. 14. Поведение объемной активности радона и торона перед событием 31 декабря 2003г: 1 – (ОАР); 2 – (ОАТ); 3 – влажность. Сейсмические события: 4 – К= 9,5; R=303 км (W – в западном направлени); 5 – К=8,2; R=301 км (W); 6 – К=8,5; R=93 км (NE – направление на северо-восток); 7 – К=8,1; R=169 км (WSW); 8 – К=10,5; R=32 км (N); 9 – К=8,5; R=117 км (WNW); 10 – К=8,4; R=8,1 км(S); 11 – К=8,5; R=103 км (W); 12 – К=8,4; R=223 км (W)

оказывают никакого влияния следующие факторы. Во-первых, удаленные землетрясения, связанные с движением других блоков массива, например события 11 декабря на графиках рис. 14. Во-вторых, 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. В-третьих, малые события, радиус воздействия которых относительно мал.

Особый интерес представляют данные, полученные по наблюдательной станции «Боом» (рис. 15), расположенной в массиве осадочных пород, так называемой «вулканической брекчии», которая обладает 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 обеих газов наблюдаются характерные скачкообразные изменения объемных активностей. Как видно из графика, этим изменениям предшествуют, как правило, либо серия удаленных землетрясений, либо события большей мощности, произошедшие не очень далеко от наблюдательной скважины. Отмеченный эффект наблюдался ранее при обработке данных эксперимента Геологической службы США (Уткин, 1997б). Этот эффект можно объяснить изменением проницаемости пород осадочного комплекса при воздействии на него упругими колебаниями даже небольшой энергии.

ВЫВОДЫ

1. 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.

2. Подготовка сейсмического события в соседнем блоке, отделенном тектоническим

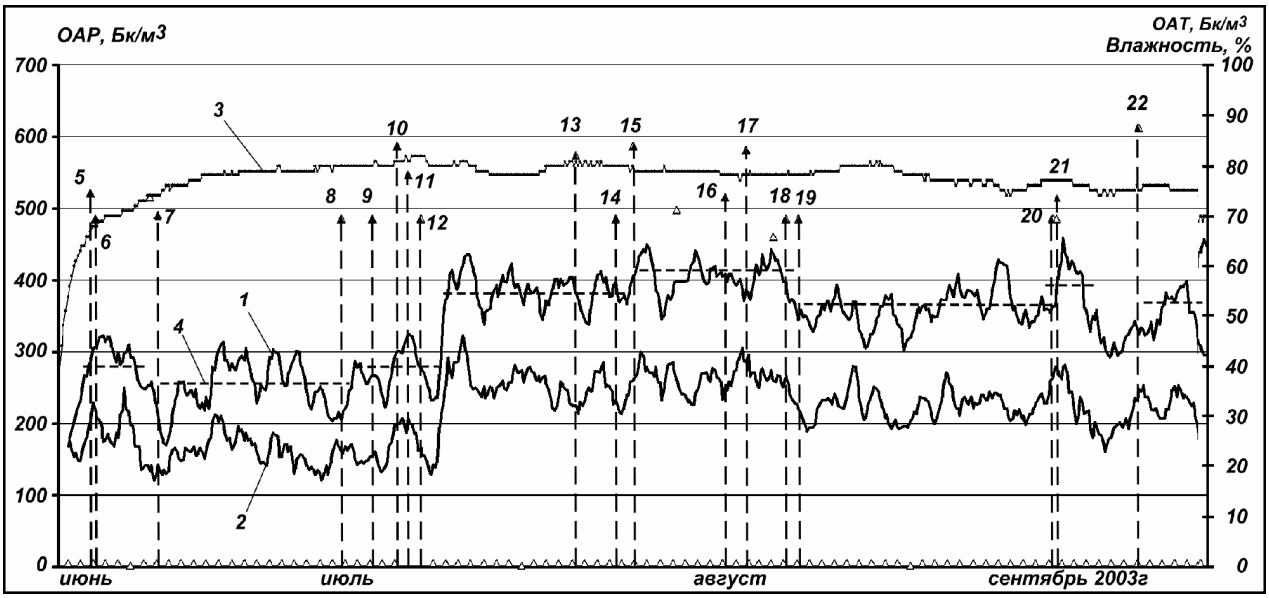

Рис. 15. Поведение объемной активности радона в районе наблюдательной станции «Боом» (осадочный комплекс пород): 1 – (ОАР); 2 – (ОАТ); 3 – влажность; 4 – средние значения ОАР в периоды затишья сейсмической активности. Сейсмические события: 5 – К = 8,7; R = 189 км (ENE); 6 – К = 8,1; R = 241 км (ESE);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

разрывом от блока, в котором установлена наблюдательная скважина, не отражается в поле радона наблюдательной скважины.

3. Начало значимого увеличения концентрации радона перед сейсмическим событием происходит за 90–100 дней до события, что позволяет оптимистически оценивать перспективы использования пространственно-временного мониторинга радона при контроле процессов подготовки тектонических землетрясений на Северном Тянь-Шане.

4. Поле радона в породах осадочного комплекса существенно зависит от общей сейсмогенной ситуации региона и скачкообразно изменяется при прохождении через массив упругих волн как местных, так и удаленных землетрясений.

5. Выбор точек регистрации объемной активности радона необходимо проводить в пределах достаточно прочных массивов и в зонах наименьшего «векового» движения массивов, определяемого по данным GPS в течение трех-четырех лет.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект KR-187-2) и частично Программы 013 Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата. Направление 1: Сейсмические процессы и катастрофы».

Литература

Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады Академии наук, 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.

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 // Уральский геофизический вестник, 2005. № 7. С. 31–34.

Мавлянов Г.А., Уломов В.И. Поиски предвестников землетрясений в Узбекистане. Поиски предвестников землетрясений. Ташкент, 1976. С. 25–38.

Миди Б.Дж., Хагер Б.Х. Современное распределение деформаций в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геофизических данных // Геология и геофизика, 2001. Т. 42. № 10. С. 1622–1633.

О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности / В.Д. Брагин, В.Ю. Баталев, А.В. Зубович и др. // Геология и геофизика, 2001. Т. 42. № 10 С. 1610–1621.

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 // Уральский геофизический вестник, 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 эксхаляции радона // Геофизика, 1997б. № 6. С. 50–56.

Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Доклады Академии наук, 1998. Т. 358. № 5. С. 675–680.

Юдахин Ф.Н. Геофизические поля и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе: НАН Кыргызстана. ФАН, 1988. 324 с.

King Chi-Yu Episodic radon changes in subsurface soil gas along activ faults and possible relation to earthquakes // J. of Geophys. Research, 1980. V. 85. N 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 / Gunderson L. and Wanty R. editors // U.S.Geological survey bulletin: 1991. P. 77–133.

Stein, R. S., G. C. P. King, and J. Lin. Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors // Science, 1994. 265. P. 1432–