

РАДОН КАК ИНДИКАТОР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**В.И. Уткин, А.К. Юрков***Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

Предложена модель эксхалляции (выхода из массива) радона в условиях сжатия или растяжения трещиновато-пористой среды, эквивалентной горным породам. Приведены примеры, подтверждающие эту модель для условий подготовки горных ударов в глубоких шахтах и тектонических землетрясений различного генезиса. Проведенное сопоставление данных деформографа и регистратора радона, расположенных в одной точке, показало, что изменению относительной деформации массива на уровне $n \cdot 10^{-7}$ соответствует относительное изменение выхода радона, равное 200 %. Такая высокая чувствительность определяет перспективность измерения выхода радона при исследовании геодинамических процессов.

*Мониторинг радона, напряженное состояние массива, подготовка землетрясения.***RADON AS A TRACER OF TECTONIC MOVEMENTS****V.I. Utkin and A.K. Yurkov**

We suggest a model of radon emanation under compression or extension strain from a medium equivalent to rocks containing pores and cracks. The model is shown in several examples to be suitable for simulating the nucleation of rock bursts in deep mines and earthquakes. According to correlation of strain and radon measurements at the same sites, a relative strain change of $n \cdot 10^{-7}$ corresponds to a 200 % change of radon activity concentration. This high sensitivity means that radon data can be good tracers of tectonic movements.

*Soil-gas radon surveys, strain, earthquake nucleation***ВВЕДЕНИЕ**

С самого начала изучения многочисленных предвестников землетрясений и горных ударов в глубоких шахтах всегда отмечалась роль радона [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. Можно сказать, что при корректно построенной модели поведение радона однозначно или детерминированно отражает изменение напряженно-деформированного состояния среды перед сейсмическим событием [King Chi-Yu et al., 1991; Булашевич и др., 1996а; Уткин, Юрков, 1997а,б, 1998]. Обзор результатов, полученных за последние годы в Институте геофизики УрО РАН и подтверждающих данный тезис, рассматриваются в статье.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ

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

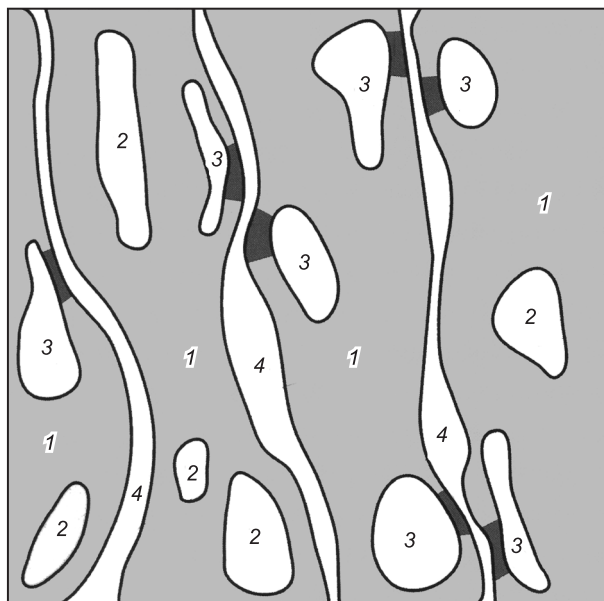


Рис. 1. Применяемая модель трещиновато-пористой среды.

1 — скелет (основа) горной породы; 2 — изолированные поры; 3 — разрушающиеся поры при изменении давления; 4 — трещины. Темным цветом выделены разрушающиеся части горной породы.

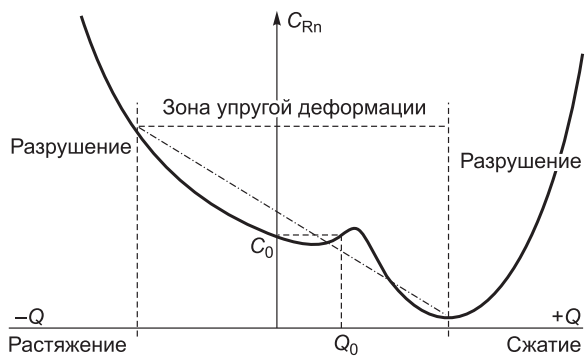


Рис. 2. Качественная характеристика изменения концентрации радона (C_{Rn}) в горной породе при изменении внешней нагрузки (Q).

Выделения радона из такой среды при изменении нагрузки имеют весьма специфическое поведение. Предположим, что начальной нагрузке Q_0 объемной активности радона в породе соответствует концентрация C_0 (рис. 2). При сжатии (Q увеличивается и становится больше Q_0) 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.

При растяжении массива (Q уменьшается и становится меньше Q_0) сначала происходит уменьшение выхода радона за счет увеличения объема трещин. Затем расширение трещин и раскрытие пор приводит к существенному увеличению выхода радона.

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 (ОАР) в стенках шахты [Булашевич и др., 1996а,б]. Итоговые результаты данных экспериментов показали следующее. На расстояниях до 150 м от эпицентра будущего горного удара всегда наблюдается существенное снижение концентрации радона (иногда в 3—4 раза). На рис. 3, а приведены графики снижения объемной активности почвенного радона перед горным ударом. 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 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

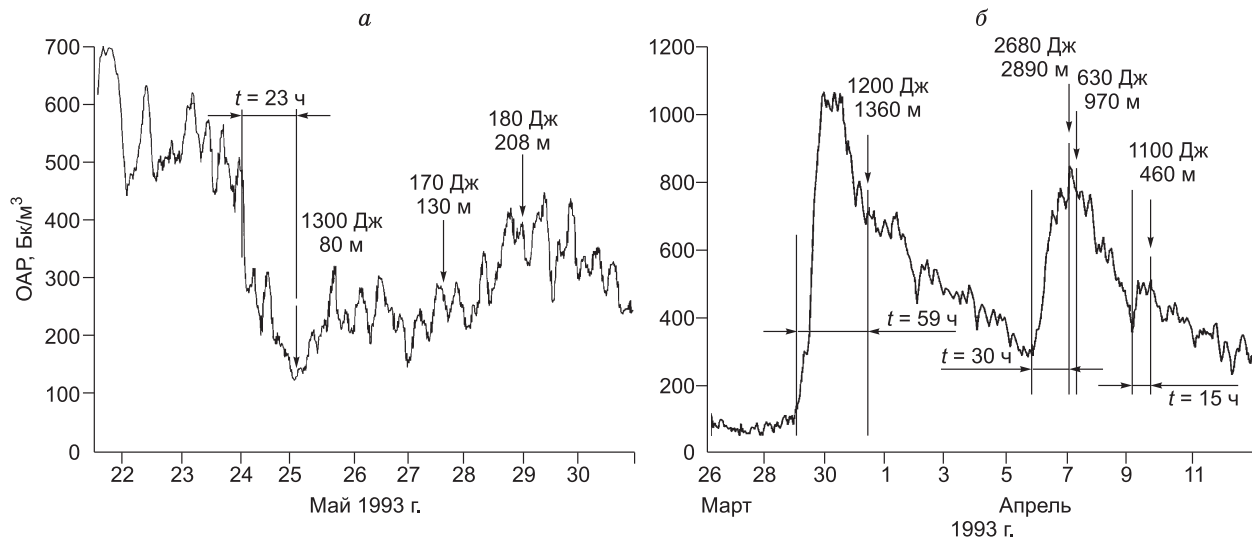


Рис. 3. Поведение ОАР перед горным ударом на малых (а) и больших (б) расстояниях от будущего эпицентра.

Стрелками отмечены горные удары, их энергия и расстояние эпицентра от точки наблюдения. а — датчик радона был расположен в бокситах.

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 ч (см. рис. 3, *а*).

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. 3, *б*).

Указанное поведение радона легко объяснить в рамках предлагаемой модели: такая ситуация возможна, 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. Значит, 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 зонах сжатия (снижение ОАР), растяжения (увеличение ОАР) или нейтральной (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; King, 1991], суть которого состоит в следующем. 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 приведены на рис. 4, *а*, *б* [Уткин, Юрков, 1997а,б, 1998].

Практически по всем точкам измерения (42, 44, 45, 46, 47, 49, см. рис. 4, *а*) наблюдается снижение ОАР (графики на правой стороне рисунка). 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 наблюдения (10, 29, 30), расположенных на значительном удалении от эпицентра, происходит увеличение ОАР приблизительно за то же время (90—100 дней).

Данные поведения радона перед землетрясением 5 августа 1979 г. с магнитудой 5.8 представлены на рис. 4, *б*. Из приведенной схемы видно, что во всех точках измерения, расположенных на небольших расстояниях от будущего эпицентра (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), наблюдаются сложные изменения ОАР, так как на эти данные влияет подготовка различных землетрясений (апрель, май, август 1979 г.).

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

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ, ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ И ДЕЙСТВУЮЩИЕ ПОМЕХИ

Как показали проведенные эксперименты, основными помехами при измерении объемной активности радона (ОАР) являются земные приливы и метеоусловия [Козлова, Юрков, 2005]. Поэтому для снижения уровня этих помех была предложена методика измерений ОАР с откачкой почвенного воздуха из измерительной скважины. Сопоставление «классической» схемы измерений, условно названной «диффузионной», и предлагаемой с откачкой воздуха, которую можно назвать «конвекционной», представлено на рис. 5.

При диффузионной технологии регистрации (см. рис. 5, *а*) радон поступает в обсадную трубу, ее нижний край обычно находится на глубине 800—1000 мм, и далее, соответственно, в измерительный прибор. Поэтому поток радона определяется только диффузионными свойствами среды. При таком способе регистрации радиус (r) зоны поступления радона в область измерения ОАР не превышает 250 мм.

При конвекционном способе измерений (см. рис. 5, *б*) 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 (r) эффективной зоны сбора радона составляет около 700 мм. Это позволяет увеличить чувствительность метода измерений почти в три раза. Одновременно снижается зависимость показаний от приливных движений и метеоусловий.

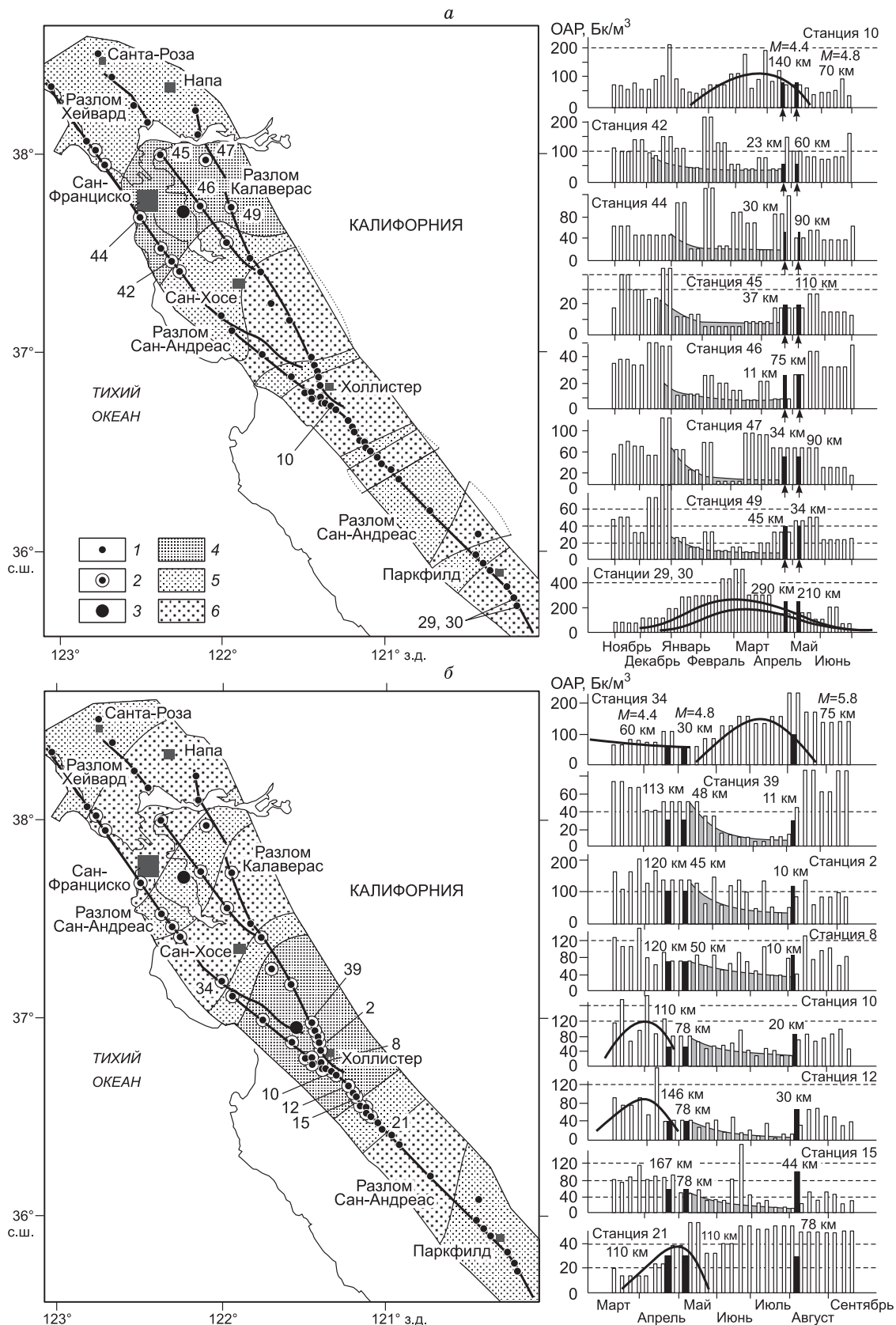
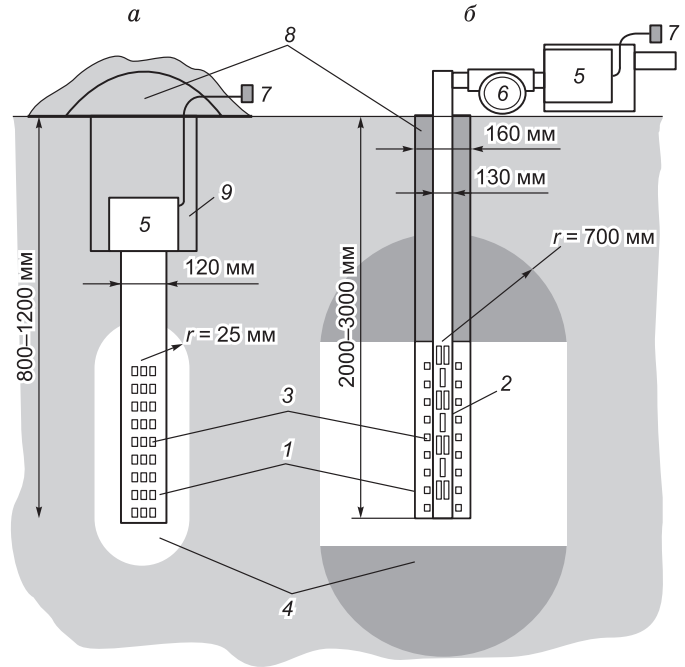


Рис. 4. Поведение радона перед землетрясением: 25 апреля 1979 г., магнитуда 4.4 (а), 5 августа 1979 г., магнитуда 5.8 (б).

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. На графиках залитыми столбиками и стрелками показаны моменты землетрясений.

Рис. 5. 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.



Сопоставление результатов, полученных при различных методах регистрации, показано на рис. 6. На представленных графиках видно, что при диффузионной методике измерений вариации радона, вызванные приливными движениями, достигают 50 % от среднего значения (около 1500 Бк/м³). Этот эффект достаточно давно известен. Поэтому при точном определении ОАР, например для целей санитарии, необходимо производить измерения ОАР неоднократно в различное время суток и использовать для анализа средние значения, полученные за данный период.

При конвекционной методике измерений приливные вариации ОАР снижаются до 7—10 %. Как следствие этого появляется возможность выделения лунной вариации (28 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

Район работ с указанием наиболее крупных исторических землетрясений, расположения основных трансформных разломов, разделяющих весь район эксперимента на отдельные блоки [Рогожин, 2004], представлен на рис. 7.

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]. Поэтому гипоцентры практически всех землетрясений находятся в пределах восходящего наклона тектонических плит. Об этом свидетельствует и карта современных движений по данным спутникового

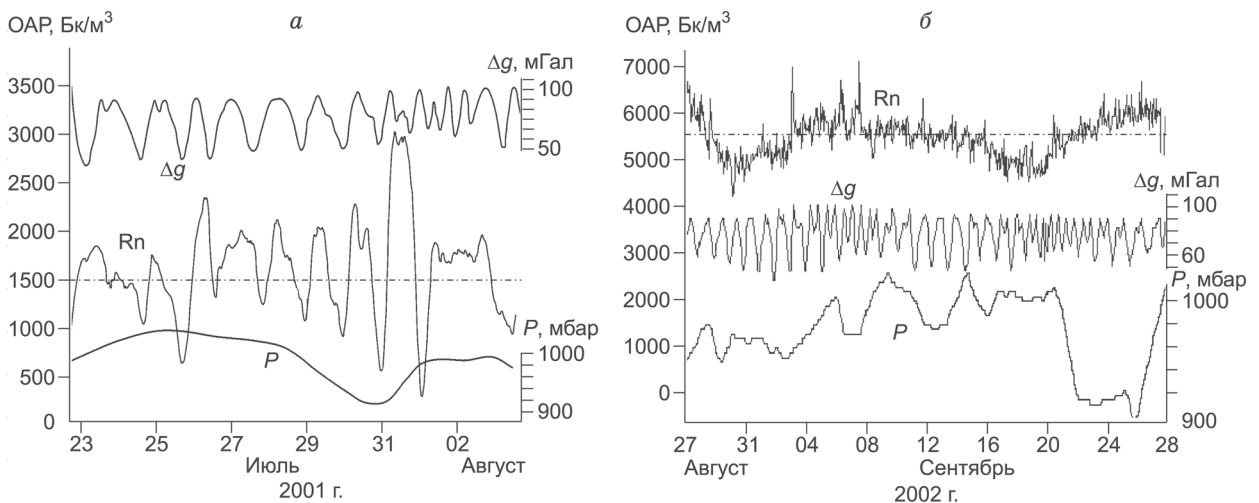


Рис. 6. Вариации ОАР при различных методиках регистрации.

а — диффузионная, *б* — конвекционная. Δg — приливные вариации; Rn — вариации ОАР; *P* — вариации атмосферного давления.

позиционирования (GPS), предоставленная в статьях [Брагин и др., 2001; Миди, Хагер, 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. 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 исследований на станции-обсерватории Ала-Арча было проведено сопоставление деформаций, зарегистрированных деформографом при подготовке землетрясения 4 декабря 2002 г. с магнитудой около 4, и вариаций объемной активности радона в наблюдательной скважине, расположенной непосредственно на территории обсерватории (рис. 9). 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.

Вариации как радона, так и торона в деталях повторяют данные деформографа (см. рис. 9). Видно, что деформации растяжения вызывают увеличение объемной активности, что соответствует предложенной ранее модели среды (см. рис. 2). Однако размер вариаций существенно различен. Если деформации

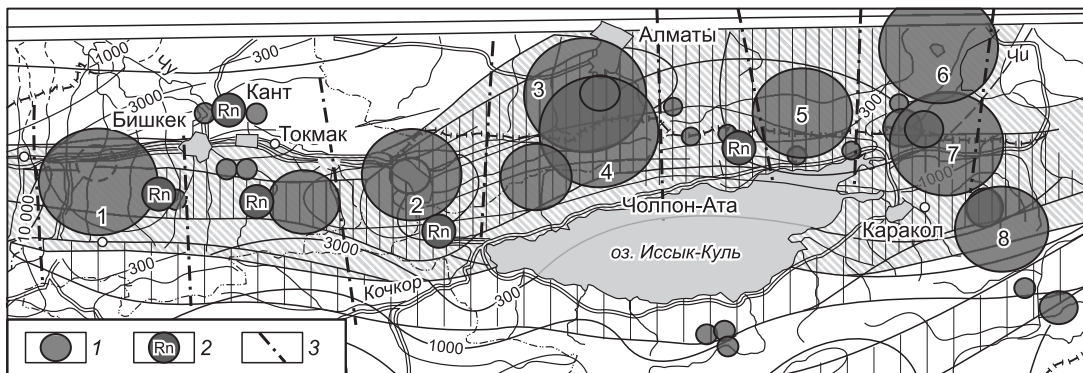


Рис. 7. Обзорная схема крупнейших тектонических землетрясений на Северном Тянь-Шане за последние 120 лет.

1 — землетрясения: 1 — Беловодское, $M = 6.9$, 1885 г.; 2 — Кемин-Чуйское, $M = 6.9$, 1938 г.; 3 — Верненское, $M = 7.3$, 1887 г.; 4 — Кеминское, $M = 8.2$, 1911 г.; 5 — Байсорунское, $M = 6.4$, 1990 г.; 6 — Чиликское, $M = 8.3$, 1889 г.; 7 — Заланашское, $M = 7.1$, 1978 г.; 8 — Сарыкамьшское, $M = 6.8$, 1970 г.; 2 — станции радонового мониторинга; 3 — трансформные разломы.

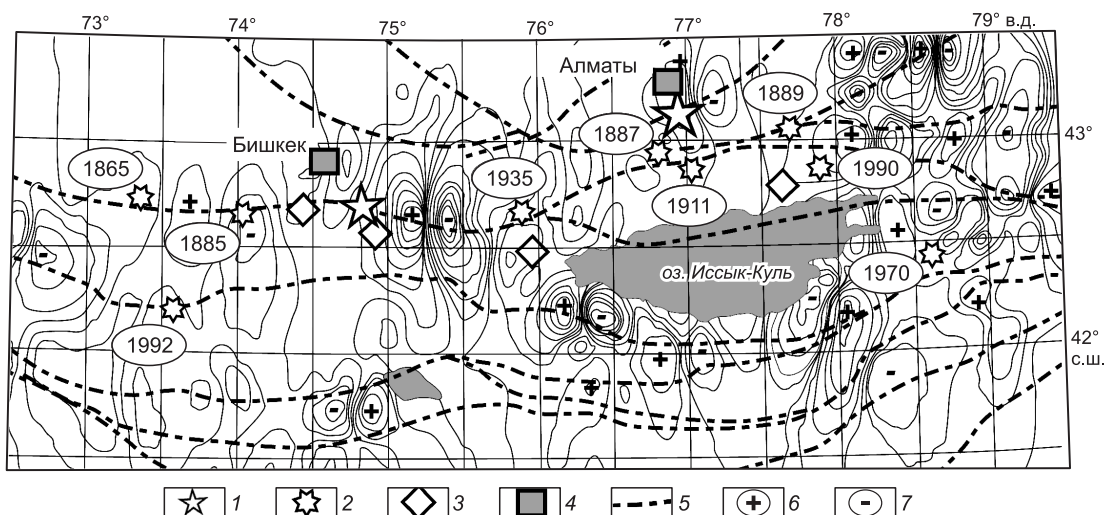


Рис. 8. Схема скоростей смещения относительно Казахской плиты, по [Брагин и др., 2001].

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.

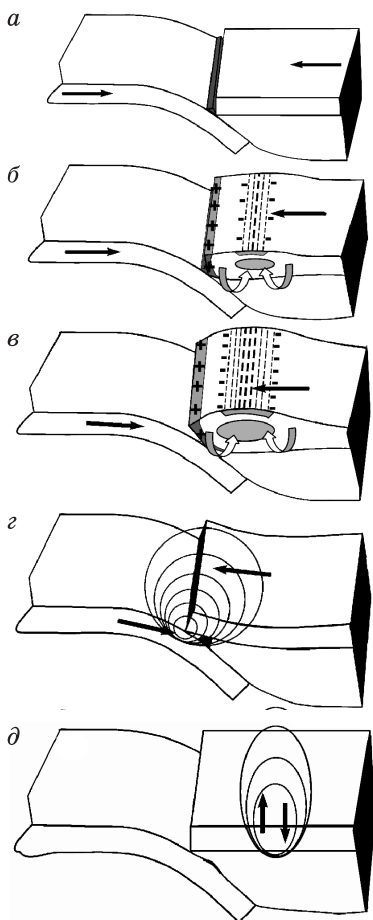
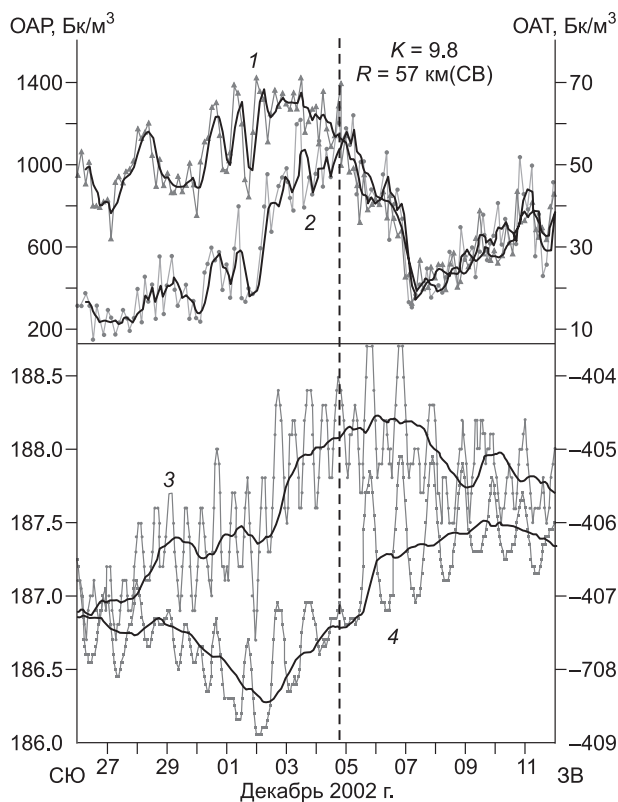
Рис. 9. Сопоставление вариаций ОАР и объемной активности торона с деформациями верхней части земной коры.

1 — вариации ОАР; 2 — вариации объемной активности торона; деформации в направлении: 3 — север—юг, 4 — запад—восток. Штриховой линией отмечен момент землетрясения. Здесь и далее R — расстояние от датчика до эпицентра.

составляют величину порядка 10^{-7} , то вариации радона и торона превышают сотни процентов.

При детальном рассмотрении данных (см. 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. 3, б).

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/м³). В это же время наблюдается существенное увеличение деформации растяжения в направлении север—юг. 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 изменениями деформационной картины. Это можно объяснить малым временем жизни торона (около 1 мин).



Это можно объяснить малым временем жизни торона (около 1 мин). Тектоническое событие произошло спустя 48 ч 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 и др., 1996а,б], так и при исследованиях в пределах разлома Сан-Андреас [King Chi-Yu et al., 1991; Уткин, Юрков, 1997а,б, 1998, 2000], 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. 10).

Процесс подготовки начинается с возникновения препятствия для движения литосферного блока в виде либо неоднородности между движущимися навстречу друг другу блоками, либо за счет трения между двигающимися пластинами (см. рис. 10, а). Остановка блока неминуемо приводит к его деформации (см. рис. 10, б). При этом в головной части блока возникают напряжения сжатия (+), в приповерхностном слое — напряжения растяжения (-), а в самом массиве развивается явление дилатансии, сопровождающееся заполнением пор глубинными

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

Описание см. в тексте.

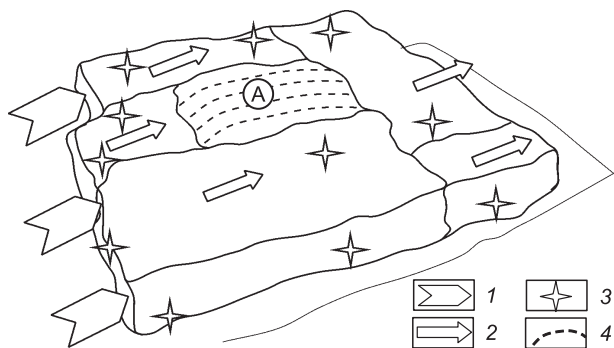


Рис. 11. Объемная модель системы подготовки землетрясения при движении блоков под действием тектонических сил.

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.

флюидами. Следствием этого процесса является замедление прохождения упругих волн удаленных землетрясений через среднюю часть блока. При дальнейшем движении (см. рис. 10, в) зона дилатации 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 (см. рис. 10, г). В дальнейшем упругие деформации уменьшаются и блок приходит в очередное квазиустойчивое состояние (см. рис. 10, д).

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

При торможении одного из блоков (см. рис. 11, блок А) он начинает испытывать деформационный процесс (см. рис. 10). Причем основное накопление энергии происходит за счет деформации изгиба. Неторможенные блоки продолжают движение, генерируя при этом землетрясения малого энергетического класса, их обычно сейсмологи классифицируют как форшоки. В пределах же самого блока А не наблюдается заметных сейсмических событий, а происходит накопление упругой энергии, сброс которой впоследствии 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 $K = 10.5$, зарегистрированное севернее наблюдательной станции Ананьево (восточный борт райо-

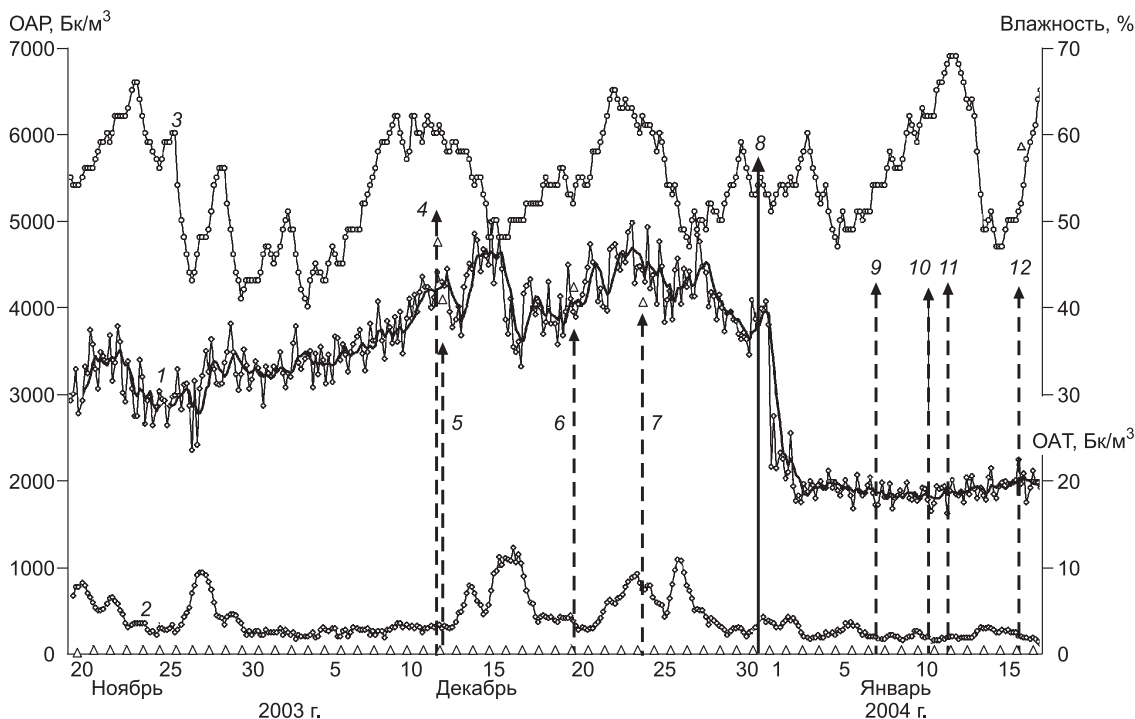


Рис. 12. Поведение объемной активности радона и торона перед событием 31 декабря 2003 г.

1 — объемная активность радона; 2 — объемная активность торона; 3 — влажность; сейсмические события: 4 — $K = 9.5, R = 303$ (3 — в западном направлении); 5 — $K = 8.2, R = 301$ (3); 6 — $K = 8.5, R = 93$ (СВ — направление на северо-восток); 7 — $K = 8.1, R = 169$ (ЗЮЗ); 8 — $K = 10.5, R = 32$ (С); 9 — $K = 8.5, R = 117$ (ЗСЗ); 10 — $K = 8.4, R = 8.1$ (Ю); 11 — $K = 8.5, R = 103$ (З); 12 — $K = 8.4, R = 223$ (З). Треугольники — метки времени.

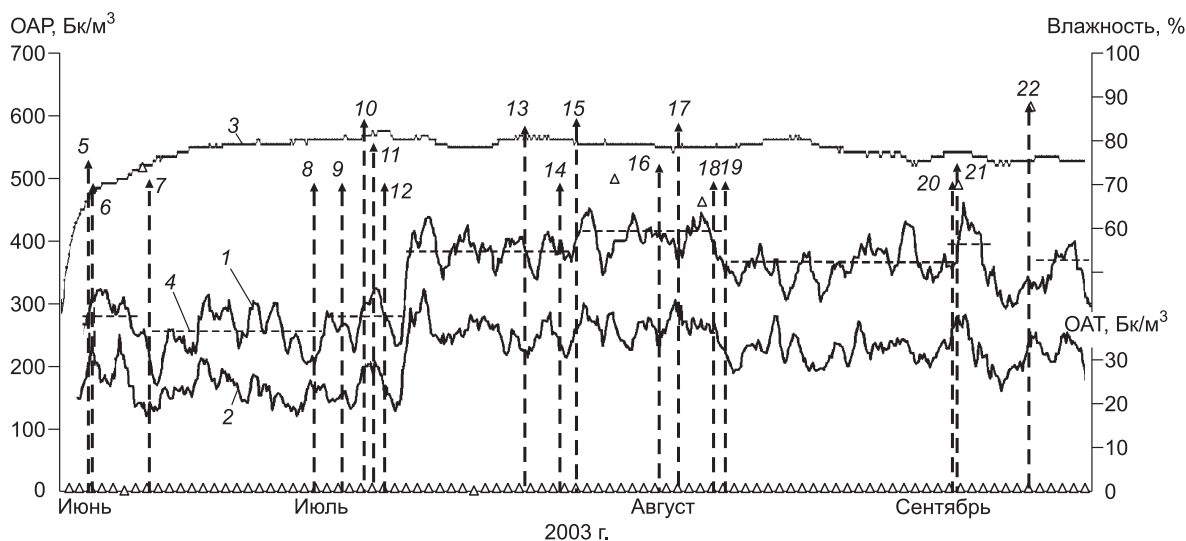


Рис. 13. Поведение объемной активности радона в районе наблюдательной станции Боом.

1 — объемная активность радона; 2 — объемная активность торона; 3 — влажность; 4 — средние значения ОАР в периоды затихания сейсмической активности; сейсмические события: 5 — $K=8.7, R=189$ (BCB); 6 — $K=8.1, R=241$ (BЮB); 7 — $K=8.6, R=134$ (З); 8 — $K=8.1, R=102$ (СЗ); 9 — $K=8.1, R=132$ (СВ); 10 — $K=9.8, R=132$ (СВ); 11 — $K=9.1, R=239$ (B); 12 — $K=8.1, R=150$ (BCB); 13 — $K=9.6, R=105$ (СЗС); 14 — $K=8.1, R=223$ (B); 15 — $K=9.8, R=250$ (B); 16 — $K=8.1, R=97$ (СЗ); 17 — $K=9.7, R=144$ (B); 18 — $K=8.1, R=112$ (BCB); 19 — $K=8.1, R=178$ (B); 20 — $K=8.1, R=97$ (СЗ); 21 — $K=8.5, R=18$ (СВ); 22 — $K=10.2, R=12$ (С). Треугольники — метки времени.

на мониторинга). Это событие, учитывая имеющийся к тому времени опыт мониторинга радона на Северном Тянь-Шане, можно сказать, уже было практически спрогнозировано (рис. 12).

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 ч. Поведение торона в данном случае также своеобразно и требует дальнейших объяснений.

Из представленных данных видно, что на показания радонового мониторинга не оказывают никакого влияния следующие факторы. Во-первых, удаленные землетрясения, связанные с движением других блоков массива, например, события 11 декабря 2003 г. (см. рис. 12). 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. 13). Она расположена в массиве осадочных пород, так называемой «вулканической брекчии», обладающей 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 объемных активностей, последним 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 [King Chi-Yu, 1980; King Chi-Yu et al., 1991]. 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, отделенным тектоническим разрывом от блока, где установлена наблюдательная скважина, не отражается в поле радона наблюдательной скважины.

3. Начало значимого изменения концентрации радона перед сейсмическим событием происходит за 90—100 дней до него, 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 016 Президиума РАН «Изменения окружающей среды и климата. Направление 1: сейсмические процессы и катастрофы».

ЛИТЕРАТУРА

Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Zubovich A.B., Лобанченко А.Н., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. О качественных связях современных движений с геоэлектрическим разрезом земной коры Центрального Тянь-Шаня и распределением сейсмичности // Геология и геофизика, 2001, т. 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, 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, ФАН, 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.

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 эксхалляции радона // Геофизика, 1997б, № 6, с. 50—56.

Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Докл. РАН, 1998, т. 358, № 5, с. 675—680.

Юдахин Ф.Н. Геофизические поля и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе, НАН Кыргызстана, 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, 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 / Eds. L. Gunderson, R. Wanty // U.S. Geological Survey Bulletin, 1991, p. 77—133.

Stein R. S., King G.C.P., Lin L. Stress triggering of the 1994 $M = 6.7$ Northridge, California, earthquake by its predecessors // Science, 1994, v. 265, p. 1432—1435.