

РАДОН И ПРОБЛЕМА ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В. И. УТКИН

Уральский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург

RADON AND THE PROBLEM OF TECTONIC EARTHQUAKES

V. I. OUTKIN

The results of the research of radon exhalation during a preparation of mine shock in deep mineshafts and tectonic earthquakes are presented. The phenomenon of spacial zonality of radon exhalation depending on the distance from the future epicenter of the seismic event was discovered. As a rule epicenters of future seismic events are located within compression zones.

Представлены результаты исследования динамики эксгаляции радона при подготовке горных ударов в глубоких шахтах и тектонических землетрясений. Обнаружено явление зональности эксгаляции радона в зависимости от расстояния до эпицентра будущего сейсмического события. Как правило, эпицентр будущего сейсмического события расположен в зоне сжатия.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Проблема подготовки сейсмических событий, прогноза их координат, времени и энергии относится к одной из самых важных и сложных проблем современной геофизики и геологии. Для ее решения используют все достижения науки и техники: деформацию земной поверхности измеряют посредством лазерного деформографа, движение блоков земной коры фиксируют по спутниковым данным, выделение газов из недр Земли изучают с помощью новейших масс-спектрометров, моделирование процессов подготовки сейсмических событий выполняют на основе современного аппарата математической физики. Тем не менее в феврале–апреле 1999 года в журнале “Nature” (см. www.nature.com/debate) прошла острейшая дискуссия по проблемам предсказания землетрясений. Мнения известных сейсмологов и геофизиков разделились. Одни признались в беспомощности перед этим грозным явлением природы (при этом проблему предсказания землетрясения ставили в один ряд с проблемой вечного двигателя). Другие считали, что проблема требует дальнейшего исследования. Поэтому интересно рассмотреть новый подход к решению проблемы прогноза землетрясений, который при обсуждении на заседании Американского геофизического союза вызвал большой интерес у геофизиков.

Детальное изучение сейсмогенных зон нашей планеты (см., например, [1]) позволило накопить уникальный экспериментальный материал по предвестникам землетрясений. Изучение разнообразных предвестников привело исследователей к следующим основным выводам: 1) время появления предвестника зависит от магнитуды¹ (энергии) будущего землетрясения и увеличивается с увеличением магнитуды; 2) радиус области

¹ Магнитуда землетрясений является мерой общего количества энергии, излучаемой при сейсмическом толчке в форме упругих волн. Общее количество энергии обычно больше: часть ее превращается в теплоту, часть уходит на разрушение пород и т.д. Зависимость между энергией упругих волн, выраженной в джоулях, и силой землетрясений по шкале магнитуд не вполне однозначна, но большинство сейсмологов используют линейное уравнение следующего вида: $\lg E = aM + b$, где коэффициенты a и b определяются для каждого конкретного

проявления предвестников землетрясений также увеличивается с увеличением магнитуды; 3) амплитуда предвестников плавно затухает по мере удаления от эпицентра будущего землетрясения.

Изучение основных предвестников позволило сделать вывод, что при подготовке землетрясения с магнитудой, равной 5 и более, радиус области подготовки составляет не менее 50 км. Магнитуда, равная 5, была выбрана как опорная, ибо при таких энергиях уже возможны разрушения зданий и сооружений, то есть сила землетрясения может быть более 6 баллов по международной шкале MSK-64 [1].

К сожалению, многие теории, описывающие механизмы землетрясений, не рассматривают процесс подготовки события и соответственно способы его прогноза. Дело в том, что, говоря о прогнозе землетрясения, необходимо помнить, что он должен выявлять три параметра будущего события: 1) координаты эпицентра, 2) время, 3) магнитуду (энергию). Соответственно должны быть указаны погрешности измерения этих величин.

В настоящее время наиболее активно используются сейсмические и деформационные предвестники сейсмического события [4]. Другие предвестники, которые иногда бывают не менее эффективны, в частности геохимические (концентрация газов в подземных водах), гидродинамические (температура и уровень подземных вод), рассматриваются как крайне неустойчивые, потому что они не всегда соответствуют указанным выше трем основным специфическим особенностям предвестников.

Во всем мире прилагаются громадные усилия для решения проблемы прогноза землетрясений, но тем не менее мы часто оказываемся бессильны перед неожиданным натиском стихии земных недр. Поэтому не прекращаются поиски новых предвестников сейсмических событий. Исследования последних лет [5–7] привели к идее прогноза сейсмических событий на основе изучения процесса выделений (эксгаляции) газа радона из массива горных пород. Анализ этих данных возвращает нас к старой теории упругой отдачи Джилберта–Рейда (1911 год), согласно которой накопление энергии в массиве горных пород перед землетрясением и сброс этой энергии в процессе землетрясения проис-

ходят в областях, где эти породы испытывают упругую деформацию.

РАДОН КАК ИНДИКАТОР НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно, естественный радиоактивный газ радон является продуктом распада радия, который, в свою очередь, появился в результате распада урана-238. Из-за своих особенностей радон – оптимальный индикатор при различных геологических исследованиях. Во-первых, радон как радиогенный газ непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, то есть всегда присутствует в любом горном массиве, и уменьшение его концентрации как за счет распада (период полураспада радона равен 3,825 дня), так и за счет миграции из массива в воздух постоянно компенсируется новой генерацией этого газа. Поэтому среднее содержание радона в массиве всегда постоянно и определяется концентрацией урана (радия) в этом массиве. Во-вторых, миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности почвы определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость. При наличии трещиноватости (проницаемости) верхней части массива и восходящих газовых потоков конвекционный перенос радона с газовыми струями может осуществляться с глубин до 200 м. В-третьих, несмотря на то что содержание радона в этих потоках составляет ничтожные доли, проблем с его регистрацией не возникает ввиду его радиоактивности. Например, радон надежно регистрируется при наличии приблизительно 30–50 распадов в секунду в одном кубическом метре, то есть активность радона составляет 30–50 Бк/м³. Это значит, что в одном кубическом метре содержится $(0,2–0,3) \cdot 10^7$ атомов радона, или его концентрация в газовой смеси составляет около 10⁻¹⁶ %.

Проницаемость массива, наличие в нем связанных пор и трещин, заметно зависит от напряженно-деформированного состояния массива. Очевидно, что при сжатии массива проницаемость его снижается, а при разгрузке увеличивается. Соответственно изменяется кажущийся коэффициент диффузии. Следовательно, динамические изменения концентрации радона в приповерхностном слое почвы будут отражать динамические изменения напряженно-деформированного состояния горного массива в значительном объеме. Указанные факторы и послужили основой для исследования поля вариаций эксгаляции радона как краткосрочного предвестника сейсмических событий.

условий и приблизительно равны $a = 4–6$, $b = 1–2$. Самые слабые землетрясения, вызывающие повреждения, имеют магнитуду, равную приблизительно 5, что соответствует высвобождающейся энергии около $3 \cdot 10^{12}$ Дж. Взрыв атомной бомбы мощностью 20 кт вызывает эффект, аналогичный землетрясению с магнитудой около 6,5 и соответственно энергией 4×10^{14} Дж. Последнее из крупных землетрясений в России (апрель 1995 года, о-в Сахалин) характеризуется магнитудой около 7 и соответственно энергией около $2 \cdot 10^{15}$ Дж.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКСГАЛЯЦИИ РАДОНА ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГОРНЫХ УДАРОВ В ГЛУБОКИХ ШАХТАХ

Изменение напряженного состояния массивов горных пород под действием либо тектонических, либо техногенных причин может приводить к тектоническому землетрясению или взрывоподобному разрушению предельно напряженной части породы в горной выработке в глубоких шахтах. Последнее явление получило название “горный удар” и обычно возникает при глубине шахт более 300 м. Масштабы этих явлений различны в пространственных и энергетических координатах, но физика явлений практически одна и та же: при увеличении напряженного состояния горных пород выше некоторого предела начинаются необратимые изменения структуры массива горных пород. Динамические изменения структуры горных пород, связанные с изменением их напряженного состояния, вызывают соответственно изменения во времени величины эксгаляции радона.

Эксперименты, проведенные на Североуральском бокситовом руднике (СУБР), в шахтах на глубинах от 300 до 600 м показали, что динамические изменения напряженного состояния горного массива вызывают изменения во времени величины эксгаляции радона [5]. При этом в зависимости от расстояния от точки наблюдения до эпицентра будущего сейсмического события эти изменения имеют различный характер.

В непосредственной близости от эпицентра будущего горного удара уменьшается выделение радона из массива горных пород. Заметное снижение содержания радона, предшествующее горному удару, может начинаться за 15–20 ч до момента горного удара и наблюдается в радиусе до 100 м от координат будущего эпицентра, поэтому зону динамического уменьшения выделения радона условно назовем зоной сжатия или “ближней” зоной.

На расстоянии более 500 м от будущего эпицентра горного удара изменение концентрации радона в наблюдательной скважине другое. Горному удару предшествует не снижение, а резкое увеличение (в 8–10 раз) содержания радона в наблюдательной скважине, и горный удар следует после прохождения максимума концентрации радона во времени. Эта зона наблюдений была названа зоной растяжения или “дальней” зоной. Соответственно имеется и некая промежуточная зона (приблизительно от 100 до 500 м), в которой практически отсутствуют изменения концентрации радона в наблюдательной скважине.

Таким образом, было обнаружено явление пространственной зональности выделения радона в зависимости от расстояния до будущего эпицентра сейсмиче-

ского события. При этом пространственные изменения динамики выделения радона носят явно выраженный нелинейный характер [7].

КАРТЫ ДИНАМИКИ ЭКСГАЛЯЦИИ РАДОНА ПЕРЕД ТЕКТОНИЧЕСКИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Геологической службой США в 1976–1985 годах в Центральной Калифорнии был проведен уникальный эксперимент по регистрации выделения радона из массива горных пород. Регистрацию проводили в 60 наблюдательных точках, расположенных вдоль известных своей сейсмичностью разломов земной коры: Сан-Андреас, Хейвард, Калаверас (рис. 1). Наличие большого объема данных по исследуемой площади вдоль разлома Сан-Андреас позволило построить карты ретроспективного (изучаемого уже после свершения события) динамического изменения концентрации радона перед сейсмическим событием.

При построении этих карт использовали следующий принцип. По каждой наблюдательной станции



Рис. 1. Схема радонового мониторинга в эксперименте Геологической службы США, 1977–1984 годы. Красным цветом указаны основные разломы: Сан-Андреас, Хейвард и Калаверас. Черными кружками показаны измерительные станции, цифры обозначают номера станций

определяли динамику изменений концентрации радона перед сейсмическим событием: уменьшение, увеличение или неопределенное изменение; наблюдательные станции с одним признаком объединяли в одну зону, а между станциями с различными признаками проводили границу зон на расстояниях, равных половине расстояния между этими станциями. Затем на карте отмечали станции, в пределах которых фиксировалось данное сейсмическое событие, и только затем на карту нанесли эпицентр данного землетрясения.

В качестве примера рассмотрим карты динамических изменений концентрации радона (рис. 2), которые построены для основных сейсмических событий этих лет. Как видно из графиков рис. 2, по станциям 42, 44, 45, 46, 47, 49 наблюдается тенденция к уменьшению выделения радона из массива. Указанный тренд искажается в отдельные промежутки времени резким увеличением концентрации, что связано с локальными землетрясениями с магнитудой менее 3. Такие сейсмические события ввиду их малой энергии, как правило,

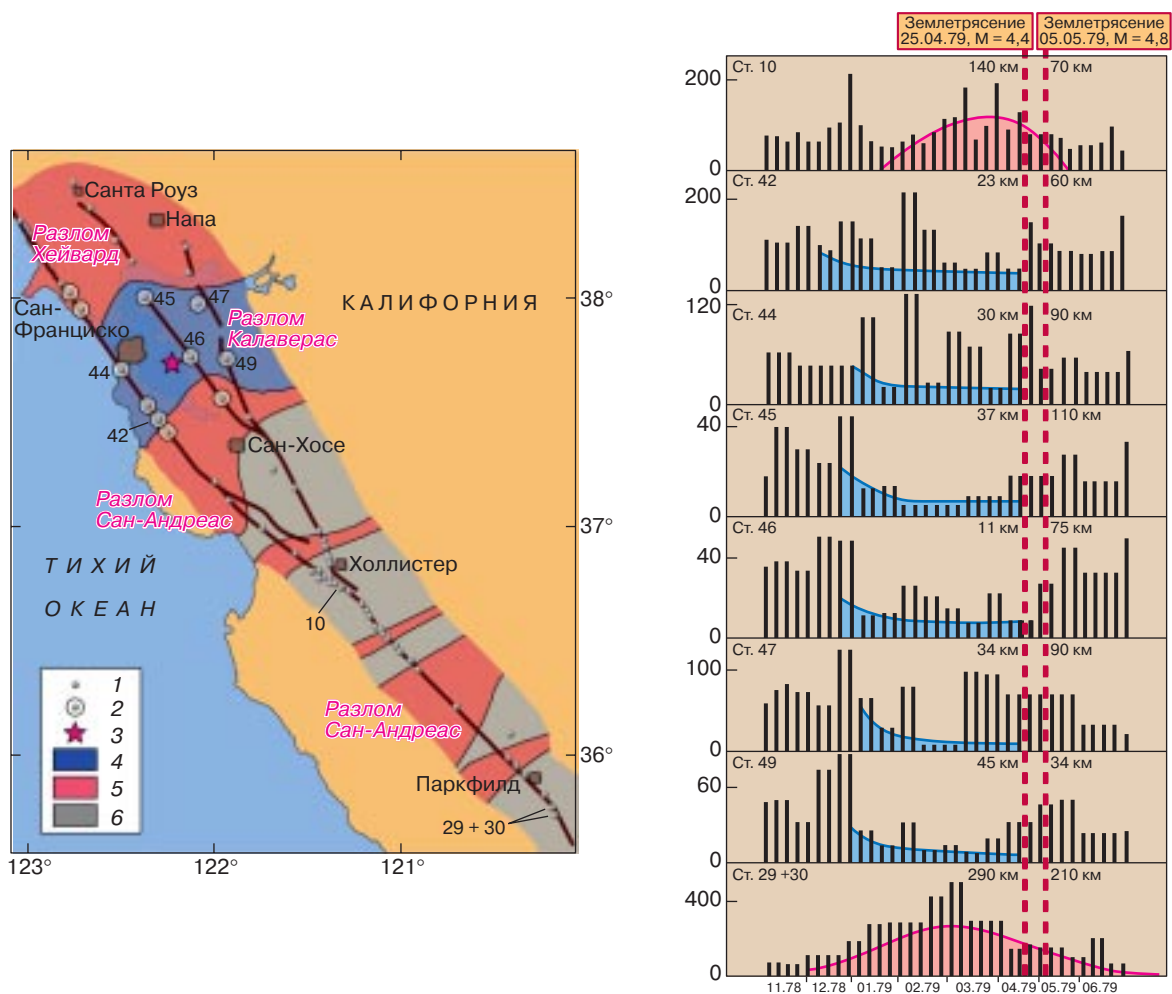


Рис. 2. Карта ретроспективного изменения концентрации радона перед землетрясениями 25.IV (M = 4,4) и 05.V (M = 4,8) 1979 года. 1 – наблюдательная станция; 2 – наблюдательная станция, на которой фиксировалось землетрясение; 3 – эпицентр землетрясения; 4 – зона динамического уменьшения концентрации радона перед землетрясением (зона сжатия или “ближняя” зона); 5 – зона динамического увеличения концентрации радона перед землетрясением (зона растяжения или “дальняя” зона); 6 – промежуточная или нейтральная зона. Справа представлены графики изменения во времени концентрации радона для отдельных станций, даты землетрясений отмечены штриховыми линиями, цифры рядом с ними – расстояния от станции наблюдения до эпицентра. Концентрация радона указана в Бк/м³ × 100, синим цветом отмечено аномальное уменьшение концентрации, красным – аномальное увеличение вне зоны сжатия

не вносят в каталоги, но они имеют существенное значение при анализе процесса подготовки землетрясения. Рассмотренное поведение радона свидетельствует (по аналогии с результатами, полученными в глубоких шахтах) о наличии сжатия в зоне расположения указанных точек наблюдения. Радиус этой зоны приблизительно равен 28–30 км.

Поведение кривой концентрации радона вне указанной зоны существенно отличается. В некоторых зонах наблюдается тенденция к увеличению концентрации радона, что связано (по аналогии с результатами, полученными в глубоких шахтах) с наличием сил растяжения, в других невозможно отметить какие-либо характерные изменения. Интересно то, что наблюдаются только одна зона сжатия, расположенная вблизи эпицентра будущего землетрясения, и несколько зон растяжения вдали от эпицентра. Это, вероятно, связано с чередованием зон нагрузки и разгрузки в верхней части массива.

Интересно рассмотреть изменения концентрации радона по профилям, связанным с основными тектоническими разломами. С этой целью весь район исследований длиной более 350 км был условно разделен 40 пикетами на равные части и проанализировано пространственно-временное поведение радона вдоль каждого из выбранных профилей-разломов: Сан-Андреас, Хейвард, Калаверас. Результаты такого анализа представлены на рис. 3.

Из графиков рис. 3 следует, что в направлении на юго-восток от г. Санта Роуз (см. рис. 1) на расстоянии 60–100 км по всем трем профилям наблюдается зона аномального уменьшения концентрации радона. На основе этих результатов можно сделать заключение о возможном землетрясении с эпицентром, расположен-

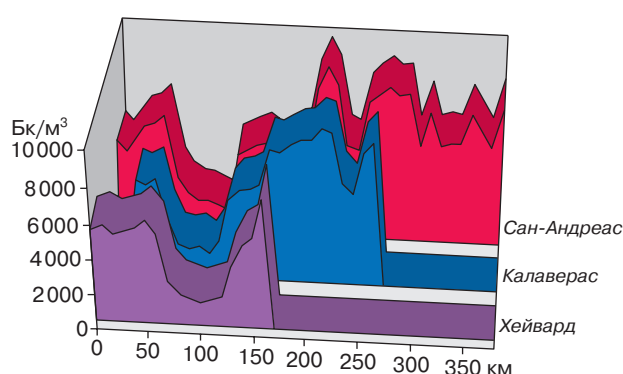


Рис. 3. Относительное изменение концентрации радона по трем профилям, связанным с основными тектоническими разломами Калифорнии: Хейвард, Калаверас, Сан-Андреас. Отсчет расстояний по профилям с севера на юг

ном в данном районе, что основано на двух известных фактах: 1) уменьшение эксгалляции радона связано с увеличением напряженного состояния массива (сжатие массива), 2) тектонические землетрясения наблюдаются в основном в зонах сжатия.

Три последовательных землетрясения (01.VIII, 05.VIII и 10.VIII 1979 года) с магнитудами 4,0, 5,8 и 4,2 соответственно, эпицентры которых расположены в непосредственной близости друг к другу, вызывают динамическое уменьшение концентрации радона перед сейсмическим событием на большой площади (рис. 4). Незначительная разница во времени между этими событиями не сказывается на концентрации радона ввиду относительно большого времени экспозиции регистрирующего его трекового детектора. Максимальная магнитуда толчка 05.VIII 1979 года равна 5,8, поэтому область подготовки землетрясения (“ближняя” зона) достаточно велика – не менее 100 км по протяженности. К северу и югу от выделенной зоны сжатия, так же как и ранее, выделяются зоны чередования разгрузки.

В пределах зоны сжатия (область 4 на рис. 4) наблюдается характерное уменьшение концентрации радона. Причем в точках, где энергия локальных землетрясений

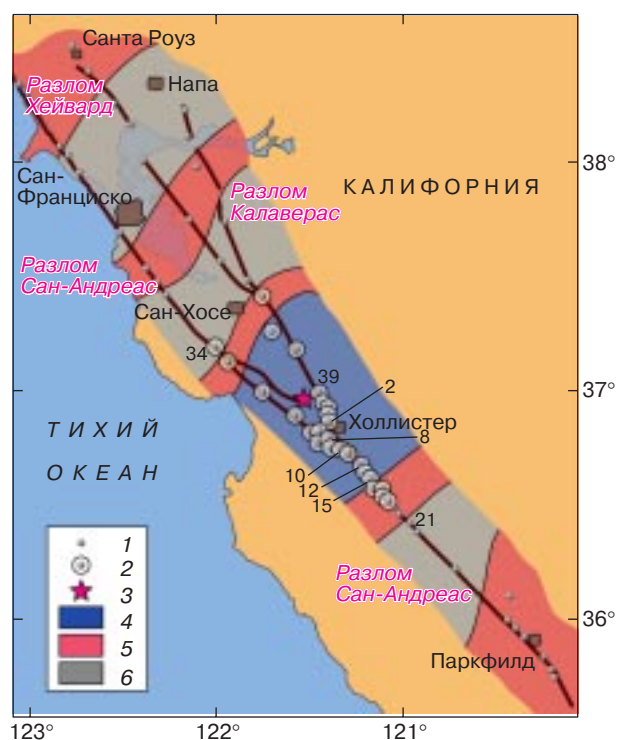


Рис. 4. Распределение концентрации радона перед серией землетрясений 01.VIII, 05.VIII и 10.VIII 1979 года с магнитудами 4,0, 5,8 и 4,2 соответственно. Условные обозначения см. на рис. 2

невелика, концентрация радона уменьшается в 5–8 раз (станции 39, 10, 12, 15). Вне зоны сжатия (станции 34 и 21) поведение радона существенно другое. Если на станции 34 наблюдается повышение концентрации радона, что характерно для зоны растяжения, то на станции 21 поведение радона не имеет характерных особенностей (промежуточная зона).

Два сейсмических события (20 и 25.I 1980 года) произошли почти одновременно и с эпицентрами, расположенными практически в одной и той же точке (рис. 5). Магнитуды этих событий равны 5,8 и 5,3 соответственно. Динамическое уменьшение концентрации радона, предшествующее данным землетрясениям, аналогично предыдущему случаю и отмечается на большой площади протяженностью не менее 100 км и шириной более 60 км.

В “дальней” зоне от эпицентра (юго-восточная часть разлома Сан-Андреас) наблюдается аналогичное описанному ранее чередование зон с изменениями, характерными для “дальней” и промежуточной зон подготовки землетрясений, что можно также объяснить чередованием зон нагрузки и разгрузки верхней части массива горных пород.

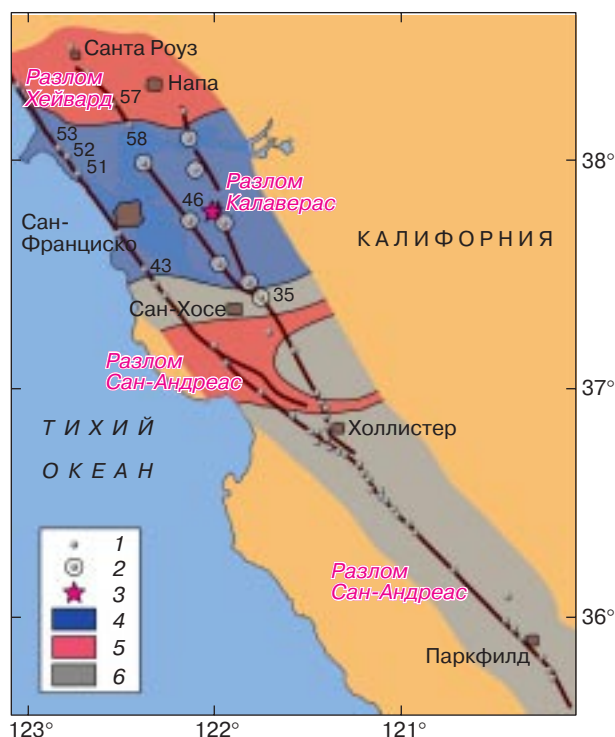


Рис. 5. Распределение концентрации радона перед землетрясениями 20.I и 25.I 1980 года. Условные обозначения см. на рис. 2

ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗМОЖНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА РАДОНА

Представленные карты показывают, что наблюдается пространственная зональность динамики эксгаляции радона, которая предшествует тектоническому землетрясению. Так как эксгаляция радона отражает в основном изменение напряженного состояния массива, полученные результаты свидетельствуют о высокой степени нелинейности пространственного распределения напряженного состояния массива перед землетрясением.

Статистический анализ исследованных событий показывает, что в среднем зона сжатия (“ближняя” зона), связанная с динамическим уменьшением концентрации радона, ограничена расстоянием 24 ± 15 км, зоны растяжения (“дальняя” зона) имеют размер около 110 ± 40 км. Причем с увеличением магнитуды будущего землетрясения эпицентральный радиус “ближней” зоны увеличивается.

Сопоставление полученных данных по горным ударам в глубоких шахтах и тектоническим землетрясениям показывает следующее. “Ближняя” и “дальняя” зоны для тектонического землетрясения имеют эпицентральный радиус приблизительно в 200 раз больше, чем у горных ударов. При горных ударах оптимальное время накопления информации составляет около 1 часа. Поскольку время подготовки землетрясения в 25–30 раз больше, вероятно, следует считать оптимальным временем накопления информации для тектонических землетрясений одни сутки. Это, возможно, позволит получить более надежные данные для интерпретации последовательных сейсмических событий, разделенных относительно небольшим промежутком времени.

Многие данные по использованию радона как краткосрочного предвестника сейсмических явлений были получены при регистрации динамического изменения концентрации радона, растворенного в подземных водах. Обычно для этих целей используют изливающиеся скважины. В большинстве случаев наблюдаются аномалии концентрации радона, характерные для “дальней” зоны, то есть повышение концентрации радона, растворенного в воде. Это свидетельствует о том, что перемещение грунтовых вод вызывает дополнительное пространственное осреднение концентрации радона и по этим данным, вероятно, невозможно выделение “ближней” зоны, в пределах которой наблюдается будущий эпицентр сейсмического события.

Приведенные материалы позволяют сделать следующие выводы. Явление пространственной зональности выделения радона в зависимости от расстояния от будущего эпицентра сейсмического события справедливо

как для горных ударов, так и для тектонических землетрясений и свидетельствует о нелинейном характере пространственных изменений напряженно-деформированного состояния среды.

Эпицентр будущего землетрясения находится, как правило, в пределах динамического уменьшения концентрации радона (зона сжатия или “ближняя” зона). Погрешность определения координат эпицентра около 25 км. Чем больше магнитуда будущего землетрясения, тем больше эпицентральное расстояние границ зоны сжатия. При подготовке землетрясения с магнитудой, равной 5, эпицентральная радиус зоны составляет около 50 км, что не противоречит известным данным.

Подготовка землетрясения, фиксируемая по динамике эксгаляции радона, начинается за 3–4 месяца до сейсмического события и особенно четко проявляется за 1–2 недели до землетрясения. На картах динамического изменения концентрации радона наблюдается чередование признаков, характерных для “ближней”, “дальней” и промежуточной зон, то есть фиксируются зоны сжатия и разгрузки верхней части массива горных пород.

Несмотря на все трудности при интерпретации данных по динамическому изменению концентрации радона, ценность их состоит в том, что они показывают возможность успешного использования этого параметра как краткосрочного (за 3–4 месяца) предвестника землетрясений. При этом дается ответ на три основных вопроса прогноза: где, когда, какова магнитуда? Однако реализация такого прогноза требует создания соответствующей системы пространственно-временного мониторинга по всей сейсмогенной площади. При этом расстояние между станциями не должно быть более 25 км, и накопление данных должно осуществляться за

время не более 24 часов. Такая система в настоящее время разрабатывается для района Северного Тянь-Шаня совместными усилиями российских, американских и киргизских геофизиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Короновский Н.В., Абрамов В.А.* Землетрясения: Причины, последствия, прогноз // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 12. С. 71–78.
2. *Рикитакэ Т.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979.
3. *Эйби Дж.А.* Землетрясения. М.: Недра, 1982.
4. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993.
5. *Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В.* Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Докл. РАН. 1996. Т. 346, № 2. С. 245–248.
6. *Уткин В.И.* Газовое дыхание Земли // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 57–64.
7. *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.

Рецензент статьи Д.Ю. Пушаровский

* * *

Владимир Иванович Уткин, доктор технических наук, профессор Уральского государственного профессионально-педагогического университета, зав. лабораторией ядерной геофизики Института геофизики Уральского отделения РАН, член-корреспондент РАЕН, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – ядерная геофизика, геодинамика и прогноз землетрясений, геоэкология. Автор четырех монографий, более 200 научных работ, в том числе 60 изобретений.