

## Геохимические предвестники землетрясений

Ю. И. Стахеев

*ЮРИЙ ИВАНОВИЧ СТАХЕЕВ — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории космохимии Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН). Область научных интересов: исследование лунного грунта, аналитическая химия ртути, ее круговорот в экосистемах, конструирование атомно-флуоресцентных ртутных анализаторов, геохимические методы предсказания землетрясений.*

119991, ГСП-1, Москва, В-334, ул. Косыгина, д. 19, ГЕОХИ РАН, тел. (096)522-19-88,  
E-mail ugeochem@geochem.home.chg.ru

### Введение

Землетрясения — наиболее разрушительное по жертвам среди населения и наносимому экономическому ущербу явление природы. Землетрясение 26 декабря 2004 г. в Юго-Восточной Азии, вызванное цунами, унесло жизни более 300 тыс. человек. Материальный ущерб еще не подсчитан, но известно, что он огромен. Энергия землетрясения такого масштаба достигает почти теоретического предела. Это третье такое геологическое событие за истекшие 100 лет. В очередной раз возникает вопрос: можно ли было предвидеть землетрясение и заранее принять меры по снижению ущерба от него?

Во многих странах, начиная с 1965 г., ведутся интенсивные работы по поиску предвестников землетрясений. С 1980 г., после немногих удачных предсказаний, произошло несколько «пропусков цели» с трагическими последствиями. Это не могло не привести к обострению полемики между сторонниками и противниками прогноза землетрясений. Научные дебаты по оценке статистической значимости метода предсказания по вариациям электротеллурических (земных электрических) токов закончились выводами о том, что землетрясениям присуща неопределенность, что физических основ их прогноза не существует, а само предсказание землетрясений — это «алхимия» нашего времени. Снова предпочтение было отдано статистическому подходу, а не исследованию физических процессов [www.nature.com; 25.02-08.04 1999]. Никто не хотел подвергаться уничтожающей критике, во многом справедливой, но односторонней. Дело дошло до того, что журнал «Earthquake Prediction Research» из-за отсутствия материалов для публикаций прекратил свое существование (этим объясняется, что в данном обзоре нет ссылок на работы, выполненные после 1999 г.). Тем не менее, накапливаемый экспериментальный материал продолжал обрабатываться, и разрозненные фрагменты отрывочных знаний стали складываться в логически связанную картину. Целью данного обзора и является попытка показать эту картину, выполненную штрихами, на примере геохимических предвестников землетрясений.

### Подходы к решению проблемы предсказания землетрясений

Землетрясения возникают в результате внезапного разрушения блока горной породы под действием ме-

ханических (тектонических) напряжений, накопленных в течение ряда лет. Тектонические напряжения обусловлены конвективными движениями блоков земной коры, вызванными различием температур и плотностей пород в толще Земли. Эти различия возникли еще при образовании Земли и в результате радиоактивного разогрева [1].

Мерой полной энергии сейсмических волн служит магнитуда. Магнитуда — это логарифм максимальной амплитуды записи (в микрометрах) стандартным сейсмомером толчка землетрясения в 100 км от эпицентра землетрясения [2].

Магнитудам  $M = 4, 5$  и  $6$  соответствуют энергии  $6,3 \cdot 10^{10}$ ;  $2 \cdot 10^{12}$ ;  $6,3 \cdot 10^{13}$  Дж. Сейсмическая энергия землетрясения с  $M = 6$  в 32 раза больше энергии землетрясения с  $M = 5$  и в 1000 раз больше, чем для землетрясения с  $M = 4$  [1]. Существует верхний предел энергии землетрясений. Он определяется механической прочностью пород, ограничивающей возможность накопления упругой энергии [2]. Поэтому с ростом энергии землетрясения растет и объем горной массы, накапливающей тектонические напряжения.

С начала XX века произошло всего три землетрясения с  $M = 8, 9$ : у берегов Эквадора 31.01.1906; у берегов Японии 02.03.1933 и в Юго-Восточной Азии 26.12.2004 [2]. Очагам землетрясений с  $M = 4, 5$  и  $6$  соответствуют сферы горных пород с радиусами 0,73; 2,3 и 6,1 км, соответственно [3—7]. Скорости перемещения блоков горных пород невелики (порядка мм/год), поэтому на подготовку сильных землетрясений требуются годы. Так, на подготовку землетрясений с  $M = 4, 5, 6, 7$  требуется соответственно 0,79; 2,5; 7,9 и 25 лет [8].

Рост деформаций в очаге будущего землетрясения приводит к деформациям окружающих горных пород. Предвестниками землетрясений, регистрируемыми на поверхности Земли, служат проявления реакций пород верхних слоев земной коры на деформационные процессы в фокальной зоне. В рамках теории подготовки тектонического землетрясения [5] величина зоны деформационных предвестников определяется как зона, ограниченная линией, на которой предвестниковые возмущения сравниваются с фоновыми вариациями. Радиус зоны с относительными деформациями  $10^{-8}$  принят в качестве порогового, характерного для деформаций, вызванных земными приливами (деформации твердого тела Земли). Для землетрясений с  $M = 4, 5, 6$  радиус зоны проявления деформационных предвестников равен 54, 148, 403 км, соответственно.

Полноценный прогноз землетрясения предполагает определение энергии ( $M$ ), времени ( $T$ ) и места будущего сейсмического события — расстояния ( $R$ ) от эпицентра [5]. Другими словами, прогноз — это детерминированная локализация будущего сильного события в пространстве и времени. В то же время процессы, связанные с землетрясением, — накопление энергии, длящееся иногда годами, разрушение пород, происходящее за секунды или минуты, генерация долгосрочных и краткосрочных предвестников землетрясения — основаны на стохастических элементах. Поэтому для решения такой сложной проблемы, как предсказание землетрясений, необходимо сочетание изучения детерминистических проявлений, предшествующих этому геологическому событию, и вероятностного подхода.

Обращаясь к истории развития сейсмологии как науки отметим, что по поводу предсказания землетрясений в среде ученых сформировались устойчивые полярные мнения. Основатель отечественной школы сейсмологии Б.Б. Голицын (1862—1916) не только разработал конструкцию сейсмографа, используемую до сих пор, но и наметил научный подход к предсказанию землетрясений: «Возможно, что со временем обнаружатся и другие явления, имеющие связь с возникновением землетрясений, как например изменение количества того или иного газа, выделяемого в различных местностях из недр Земли ...» [9]. Позже американский сейсмолог Ч.Ф. Рихтер, предложивший шкалу магнитуд, высказал мнение, что «предсказать землетрясение в сколько-нибудь точном смысле этого слова пока невозможно» [10]. Современная точка зрения большинства сейсмологов сводится к тому, что «... надежные и полезные прогнозы не появятся еще много лет, если вообще когда-нибудь появятся» [11].

Начиная с 1965 г., в СССР, США и Японии были разработаны программы по снижению ущерба от сильных землетрясений. Итоги этих исследований обобщены и подробно изложены в [1, 2, 4, 5, 12—25]. Геофизики сосредоточили свое внимание на изучении процессов, связанных с механическими напряжениями и деформациями горных пород. Это регистрация самих деформаций и наклонов поверхности, определение скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн, измерение амплитуд электротеллурических токов, изучение вариаций магнитных и электрических явлений, в том числе измерение электросопротивления пород на больших токах и расстояниях и др.

В 1968 г. было экспериментально установлено и в 1979 г. получен диплом на открытие явления изменения эффективного удельного сопротивления горных массивов, предшествующего местному землетрясению [26]. Причиной этого изменения называлось перераспределение поровых флюидов в горных породах при их деформировании. Трех греческим ученым из Афинского университета Варотсосу, Алексопулосу и Номикосу был выдан патент США на метод предсказания сейсмической активности, чувствительный к электротеллурическим токам [27]. Этот метод получил название ВАН — по первым буквам фамилий авторов. В [28—30] авторы подробно изложили технику регистрации разности потенциалов между двумя диполями (расстояние между электродами 50 м), ориентирован-

ными в направлениях север—юг и восток—запад, и результаты работы 18 функционирующих на этом принципе сейсмических станций. Обслуживание станций осуществляли армейские связисты.

Это была первая и единственная попытка организации сети станций, прогнозирующих землетрясения, работающих по единой методике с централизованным сбором информации в реальном масштабе времени. Возрастание разности потенциалов получило название сейсмических электрических сигналов (SES, СЭС). Зарегистрированные станциями электрические сигналы составляли до десятков милливольт продолжительностью от 1 мин до 1,5 ч. Сигналы появлялись за 6—115 часов до землетрясения, фиксировались самопишущими милливольтметрами и транслировались на Центральную станцию в Афины.

За время работы сети с октября 1982 г. по 1996 г. в Греции произошло 547 землетрясений с  $M \geq 4$ . Погрешность в определении координат землетрясений составила: расстояния до эпицентра  $\Delta R = \pm 30$  км, магнитуд  $\Delta M = \pm 0,7$  и времени  $\Delta T = 1$  ч—11 сут. Отметим, что Япония пригласила авторов к себе и инвестировала 3,24 млн. долларов на установку 20 детектирующих станций в районе Кобе и при университетах в Хоккайдо и Токай [31].

Значимость метода ВАН неоднократно обсуждалась в прессе и на совещаниях [32—36]. Однако при этом обсуждались не столько сама проблема предсказания землетрясений, сколько вопросы экономического и социального плана. Отметим также, что журнал «Nature» с 25.02.99 по 08.04.99 провел научную дискуссию по электронной почте по вопросу: «Предсказуемы ли землетрясения или их варьирующая природа делает их предсказание невозможным?» Окончательный вывод был таким: «Предсказания землетрясений отличаются от гадания на кофейной гуще тем, что последние иногда сбываются». Это замечание неточно, так как случайные предсказания также иногда сбываются. Здесь следует отделять вероятность обоснованного предсказания от вероятности предсказания, сделанного случайным образом.

Реальный метод прогноза должен давать численные значения величин  $M$ ,  $T$  и  $R$  (см. выше) с известной степенью неопределенности. Разные методы предсказаний могут иметь различные величины неопределенностей для каждой из этих трех величин. По всей вероятности приемлемый прогноз может быть сделан на основе реализации сочетания трех методов предсказания  $M$ ,  $T$  и  $R$ . И здесь правомерен вопрос: начиная с каких значений неопределенности в предсказании  $M$ ,  $T$  и  $R$ , метод может иметь ценность с точки зрения снижения ущерба от предсказанного землетрясения?

Безотносительно к предсказанию землетрясений в изящном эксперименте [37] было показано, что деформации горного массива приводят к увеличению концентрации паров радона в тоннеле в 28 раз, при этом электрический сигнал, измеряемый по методу ВАН, возрастал в 3,3 раза. Нагрузки варьировали путем изменения уровня воды в водохранилище гидроэлектростанции на 70 м в течение года. Таким образом, показано, что электрические сигналы могут генерироваться деформациями горных пород, и, возможно, концентрация радона с высокой чувствительностью реагирует на тектонические деформации.

Время геохимических предвестников землетрясений пришло в 1966 г., когда было обнаружено явление изменения химического состава подземных вод при землетрясениях. Это заключение было сделано на основании наблюдений: в период 1961—1965 гг. в воде бальнеологической скважины в Ташкенте содержание радона плавно повысилось в три раза и сохранялось на этом уровне в течение 6 месяцев до начала землетрясения с  $M = 5,5$ , а по окончании землетрясения уменьшилось ниже первоначального уровня [38]. В заявке на открытие говорилось об изменении содержания не только Rn, но и He, Ar, а также F, изотопного состава U, упоминалась и ртуть. С этого открытия [38] во всем мире начались бурные поиски геохимических предвестников. Так, в Японии и США на их поиски расходовалось до 5% всех ассигнований на прогностические исследования.

### Гидрогеодинамические предвестники землетрясений

Еще в древности было известно, что землетрясения иногда предшествуют значительные изменения уровня воды в колодцах, дебита родников, помутнение воды. Колодец и скважина являются своего рода чувствительными объемными деформографами, которые реагируют на сейсмические деформации изменениями уровня воды (подъем и снижение). Разумеется, на уровень воды влияют количество осадков в регионе, атмосферное давление, земные приливы. Собственно, земные приливы как явление природы были открыты по признаку несоответствия изменения уровня воды в колодцах и океанических приливов.

Каталог гидрогеодинамических предвестников землетрясений [14], зарегистрированных во всем мире, демонстрирует, что формы изменения уровня воды настолько разнообразны, что их невозможно сравнивать, а амплитуды его колебаний определяются локальными гидрогеологическими условиями. Тем не менее обнаружилось, что в ряде случаев изменения уровней воды демонстрируют аномальную тензочувствительность и дальное действие (до 1000 км) [39]. Было установлено, что волна предвестников землетрясений распространяется от будущего эпицентра с небольшой скоростью, 5—10 км/ч [40]. При этом упругие деформации генерируют долгосрочные (годы) и среднесрочные (недели, месяцы) предвестники, а пластические деформации, возникающие в начале процесса разрушения, — краткосрочные (дни, часы) [41]. Для краткосрочных предвестников теоретически предсказано, что амплитуда их изменений прямо зависит от силы землетрясения и обратно пропорциональна расстоянию до очага [42].

Кроме деформаций, вызывающих сейсмические волны [43], на уровень воды действуют приливные деформации. Они невелики ( $\sim 10^{-8}$  отн.), гармоничны (синусоидальны) и имеют периоды от 8,28 ч до 365 суток [44]. Надо сказать, что интерес к земным приливам и их роли в изменении потоков газов, уровней воды, деформаций горных пород проявился еще до работ по предсказанию землетрясений [45, 46]. Предполагалось использовать земные колебания для калибровки тензочувствительности уровней воды [39], однако предложение реализовано не было. В заключение отметим, что результаты и закономерности, выявленные при изучении гидрогеодинамических предвестников, можно найти в обзоре [47].

### Гидрогеохимические предвестники землетрясений

В дополнение к гидрогеодинамическим исследованиям в рамках геохимических изысканий проводились работы по изучению химического состава подземных вод, получившие название гидрогеохимических исследований. При анализе подземных вод прежде всего определялись газы радиогенной природы He, Ar, Rn и их количественные соотношения, а также обычные газы  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ , Hg [48]. Определялись изотопные соотношения  $^3He/^4He$ ,  $^{13}C/^{12}C$  в  $CO_2$  и  $CH_4$  подземных вод;  $^4He/^40Ar$ ,  $^{40}Ar/^{36}Ar$ ,  $^{34}S/^{32}S$ , D/H и др.

В результате в подземных водах были обнаружены аномалии содержания элементов, предшествующие землетрясениям. Как правило, это заключение делали ретроспективно и, как в случае гидрогеодинамических аномалий, каждый исследователь приводил выбранный им критерий аномальности. Большинство использовало двух- и трехсигмовый критерий превышения сигнала над фоном.

Возникновение гидрогеохимических аномалий перед землетрясениями и приливными деформациями объясняется изменением режима транспорта воды между частями массива пород с различной проницаемостью и упругими свойствами. При деформации пород усиливается приток вод с повышенным содержанием элементов из слабо проницаемых и застойных слоев массива [49].

Главным объектом исследований подземных вод обычно был Rn [50—55]. Регистрировали также  $H_2$  [56]. В работе [57] измеряли содержание He,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  (газохроматографический метод с Ar в качестве газа-носителя). Отмечено отсутствие синхронности вариаций содержания анализируемых газов. Расчеты показали, что изменение количественных соотношений He/Ar (газов с различными термодинамическими свойствами) характеризует изменение действующих механических напряжений в породе, тогда как изменение суммарного газового потока отражает изменение проницаемости среды за счет образования новых микротрещин.

Регистрировались суточные и полусуточные колебания He/Ar. Максимальная амплитуда колебаний газового потока приходилась на новолуние и полнолуние, что интерпретировали как следствие действия земных приливов [57]. Этот вывод был независимо подтвержден спустя шесть лет [58]. Соотношение He/Ar в литосфере в  $2 \cdot 10^5$  раз больше, чем в атмосфере и поэтому может быть использовано в качестве меры эмиссии литосферных газов из глубины Земли. Для этой же цели могут служить количественные соотношения изотопов  $^3He/^4He = 8,65 \cdot 10^{-6}$  для глубинных газов и  $^3He/^4He = 0,3 \cdot 10^{-6}$  для газов из осадочной толщи [59].

Для различения геохимических аномалий содержания газов в скважинной воде от сейсмогеохимических, предшествующих землетрясениям, предложен метод [60], который был реализован следующим образом. Ежедневно газохроматографически анализировали газ, выделяющийся из воды двух скважин глубиной 300 и 400 м. Скважины отстояли друг от друга на расстоянии 1,2 км. Определяли содержание He,  $H_2$ , Ar,  $N_2$  и  $CH_4$ . Из хроматограмм отбрасывались показания, соответствующие медленным, предположительно сезонным изменениям. По двухсигмовому критерию

выделялись временные участки, где проявлялись геохимические аномалии.

Сейсмогеохимическая часть данного эксперимента заключалась в следующем. Для территории площадью  $400 \times 400$  км<sup>2</sup> по формулам Добровольского [5] вычисляли расстояния, на которых могли быть зарегистрированы предвестники землетрясений. Геохимические аномалии  $\text{CH}_4/\text{Ar}$ , формировавшиеся на отрезке времени, когда соотношение  $M$  (магнитуда) и  $R$  (расстояние в км от эпицентра землетрясения) располагалось выше пороговой прямой  $M = 0,45 + 2,15 \lg R$ , принимались как сейсмогеохимические, т.е. предшествовавшие землетрясениям. Подобные пороговые прямые для аномалий содержания радона  $M = 0,458 + 2,08 \lg R$  и изменения электрического сопротивления горных пород  $M = 2,81 + 3,70 \lg R$  оказались расположенными близко друг к другу, что интерпретировали как единство причины генерации предвестниковых явлений. Отмечалась недостаточная скорость изменения содержания анализируемых газов, чтобы по ней можно было точно отслеживать предвестниковые и приливные явления.

Измерения содержания ртути в скважинной воде также приводили к обнадеживающим результатам. Сообщалось о снижении содержания Hg за 3–4 дня до землетрясения и увеличении его в 1,5–1,6 раз в момент основного толчка землетрясения с  $M = 5,3$  [61]. Модельные эксперименты, проведенные в Китае с гидроразрывом водонесущих пластов, показали рост содержания ртути на 50%, в 5 и в 60 раз (в трех экспериментах). Последние результаты близки к тем, что были зарегистрированы в момент основных толчков при землетрясениях в июле 1984 г. и ноябре 1985 г. — увеличение содержания ртути в 9 и 60 раз в скважинной воде (магнитуды землетрясений не указывались) [62].

На скорость перехода газа из горной породы во флюид (газ или воду) накладываются физические ограничения, обусловленные значениями коэффициентов диффузии газа в газовой среде или жидкости. В частности, коэффициент диффузии радона в воде равен  $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, в воздухе  $10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с, т.е. имеет место существенное различие — четыре порядка [63]. Это дает основание полагать, что в случае регистрации вариаций содержания газов — потенциальных предвестников в почвенном газе — могут быть достигнуты большие амплитуды и меньшая длительность сигналов-предвестников. В связи с этим получили развитие газогеохимические методы предсказания землетрясений.

#### Газогеохимические методы

В рамках проблемы предсказания землетрясений изучались процессы диффузии и фильтрации He и Rn через горные породы с определением коэффициентов распределения газов между породой и флюидами [64, 65]. Разработаны методы регистрации содержания газов-предшественников в грунтовых газах. Для регистрации радона предложен так называемый трековый метод [66]. Данный метод заключается в подсчете следов поглощения  $\alpha$ -частиц, выделяющихся при распаде <sup>222</sup>Rn, визуализируемых путем травления следов щелочным раствором. Градиент содержания Rn по глубине грунта позволил вычислить вертикальную скорость потока почвенных газов, она составила

3,6 см/ч [67]. Этим же методом в другом месте был измерен поток грунтовых газов — 1 л/(м<sup>2</sup>·ч) [68].

В ряде работ были получены регистрограммы содержания гелия в природном газе и с помощью Фурье-анализа были выделены скрытые гармонические колебания с периодами 12; 12,4; 23,9; 25,8 ч. С использованием трех критериев Мельхиора [44] — совпадения частот, соотношения амплитуд колебаний и разностей фаз — было доказано «приливное» происхождение колебаний [69]. Отсюда можно заключить о перспективности метода регистрации гелия в качестве предвестника землетрясения. Эти же исследователи рассчитали, что приливным относительным деформациям в пористом теле, равным  $4,46 \cdot 10^{-6}$ , соответствует давление в порах  $8 \cdot 10^{-2}$  атм [70]. Они же установили, что зарегистрированные колебания с периодами 8, 10, 15, 20, 27, 29 и 34 ч связаны с динамикой процессов дегазации, а не генерируются земными приливами [71].

При регистрации содержания радона сцинтилляционной камерой с электростатическим полем в естественных условиях без нарушения миграции газа в среде были зафиксированы «выбросы», амплитуда которых была на порядок больше, чем сигналов, длительностью 10–12 ч, вызванных приливными вариациями. Эти выбросы были зафиксированы за сутки до землетрясений с магнитудами  $M = 3–4$  [72]. Измерения проводились ежечасно в двух точках, отстоящих друг от друга на 90 км. На записях регистрировались короткопериодные вариации сигналов различной величины. Первоначально предполагалось, что они вызваны колебаниями атмосферного давления. После введения поправок кривая изменения содержания радона сгладилась и стали видны предвестники землетрясений, ранее незаметные [73]. Стала очевидной необходимость учета влияния атмосферного давления. Отмечено изменение формы кривой содержания Rn-предвестника в зависимости от влажности почвы, через которую идет диффузия газа, прежде чем он попадает в детектор [74]. По разнице прохождения волн предвестников до одной и другой точек регистрации определена скорость прохождения этой волны — 7 км/ч (сравнима со скоростью пешехода) [75].

Судя по ряду обзоров [76–78], работы по изучению и развитию газогеохимических методов проводились в Китае [76]. Отмечались амплитудные аномалии содержания Rn (изменение на 10–30%) за сутки до землетрясения с  $M = 6,9$ , 10-кратные возрастания содержания  $\text{H}_2$  в скважине, находившейся в 10 км от эпицентра [77]. Сообщалось об 11 предвестниках, по вариациям содержания Hg в скважинном газе был сделан вывод о том, что именно аномалии содержания ртути являются наилучшим краткосрочным предвестником землетрясений [78].

Реализация китайской программы по предсказанию землетрясений началась после двух разрушительных толчков в марте 1966 г. с  $M = 6,8$  и 7,2. В 1972 г. в Китае действовало 300 сейсмических станций и около 5000 наблюдательных пунктов. Начиная с 1971 г., было сделано 11 предсказаний землетрясений с эвакуацией населения. Триумфом программы можно назвать предсказание землетрясения 4 февраля 1975 г. в г. Хайченг с населением 100 тыс. человек. Люди были выведены на улицы, и через несколько часов

город был почти полностью разрушен. Благодаря предупреждению было зарегистрировано только 10 смертельных случаев и спасено более 20 тысяч жизней [79]. Многочисленные эксперты из Японии и США, посетившие после этого Китай, дали подробный отчет об организации прогностической службы в Китае [80].

28 июля 1976 г. в провинции Хэбэй произошло землетрясение с  $M = 7,8$  с четырьмя афтершоками с магнитудами: 6,5; 6,0; 7,1 и 6,0. Был полностью разрушен крупнейший индустриальный центр Таншань, погибло 243 тыс. человек. До землетрясения регистрировались многочисленные предвестники, но тревога объявлена не была.

С октября 1978 г. в США, в 32 км к западу от Денвера, в штате Колорадо, на высоте 2640 м над уровнем моря проводились измерения эмиссии Hg и Rn из земных глубин и изучалось влияние метеорологических и сезонных факторов на этот процесс с точки зрения возможности предсказания землетрясений. Измерительная аппаратура была установлена в помещении  $2 \times 2 \times 2$  м<sup>3</sup>, вырубленном в биотитовом гнейсе с содержанием ртути 25 ppb. Концентрацию Hg в воздухе помещения определяли анализатором ртути «Джером 301» по изменению электросопротивления Аупленки после сорбции на ней ртути. Предел обнаружения 100 пг ртути, воспроизводимость при измерении 1 нг Hg 10%. Время накопления ртути на пленке 2,5 часа. За это время через коллектор прокачивалось 120 л воздуха из помещения. Содержание Rn в воздухе измерялось трековым методом в течение недели. Параллельно регистрировались температура, влажность воздуха, барометрическое давление в помещении и вне помещения, а также влажность и температура грунта, направление и скорость ветра, выпадение осадков, циклы замерзание-оттаивание грунта.

Регистрация продолжалась год, по октябрь 1979 г. За этот период содержание Hg, усредненное за неделю, изменялось от 1 до 53 нг/м<sup>3</sup>, содержание Rn — от 81 до 1040 пКи. Среднее содержание ртути за год составило 6,4 нг/м<sup>3</sup>, радона — 415 пКи/л. Методом множественной регрессии были рассчитаны коэффициенты корреляции содержания ртути с контролируемыми факторами. Вклад метеовлияния составил всего 32% всех вариаций содержания ртути в воздухе помещения. Коэффициенты корреляции содержания ртути с температурой  $r(t) = 0,414$ , давлением  $r(p) = 0,272$ , земными приливами  $r(\text{tide}) = 0,198$ . Коэффициент корреляции между содержаниями ртути и радона  $r = -0,41$ .

За время регистрации в обследуемом районе произошли землетрясения ( $M = 2,9$ ,  $R = 90$  км;  $M = 3,1$ ,  $R = 300$  км и  $M = 2,6$ ,  $R = 300$  км). Никаких изменений концентраций Hg и Rn, связанных с ними, зарегистрировано не было [81]. В работе [82] показана кумулятивная кривая статистического распределения содержания ртути ( $n = 3240$ ), линеаризованная представлением в логарифмически-вероятностных координатах. Она составлена двумя отрезками прямых с точкой пересечения на вероятности 40%. Температура грунта за период, составивший 43% времени наблюдений, была ниже 0 °С. Поэтому сделан вывод о том, что пониженные содержания ртути в воздухе помещения зимой и повышенные летом определяются температурой грунта и процессами сорбции-десорбции ртути грунтом зимой и летом.

Еще один цикл наблюдений на этом пункте был проведен с 05.10.80 по 29.07.82 (22 месяца) [83]. Кроме Hg и Rn, измерялось содержание He в скважине глубиной 3 м. Были зарегистрированы вариации содержания ртути от 0,11 до 39 нг/м<sup>3</sup>, среднее значение 6,2 нг/м<sup>3</sup>. Установлено, что содержания He и Rn в воздухе максимальны зимой и минимальны летом, тогда как содержание He в воздухе помещения летом в 100 раз выше, чем зимой. Предполагается, что миграция Hg определяется в основном процессами адсорбции-десорбции горными породами, а миграция Rn и He — транспортными и диффузионными процессами.

### «Ртутные» предвестники землетрясений

Исследования автора данной работы по поиску предвестников землетрясений начались с уточнения одной из геохимических констант — космической распространенности ртути — опорной геохимической константы.

Исходными величинами для суждений о содержании химических элементов на Земле являются их содержания в Солнечной системе. Поэтому исследование процессов миграции ртути в природе были начаты с выяснения причин «ртутного парадокса» [84]. Такое название получил странный факт превышения в 21 раз результатов анализов содержаний ртути в 42 углистых хондритах (тип каменных метеоритов) по сравнению с теоретическими предсказаниями. Статистически значимая корреляция содержания ртути в метеоритах с их с земным возрастом позволила установить, что при хранении метеоритных коллекций содержание ртути удваивается за 15 лет вследствие сорбции ее из атмосферы [85]. Увеличение содержания ртути с ростом земного возраста не только каменных, но и железных метеоритов было подтверждено независимыми исследованиями [86]. Экстраполяция содержаний на нулевой земной возраст метеоритов сняла «ртутный парадокс» [87].

Для проверки механизма накопления горными породами ртути, поступающей из почвенного газа, был разработан метод отдельного определения поверхностно и объемно сорбированных количеств ртути в частицах измельченных горных пород [88]. Показано, что увеличение содержания ртути в породах происходит за счет ртути, сорбированной на поверхности частиц пород. Было сделано заключение, что большая часть ртути, содержащейся в земной коре, находится в поверхностно сорбированной форме [88].

Ранее было замечено, что на разломах земной коры почвенный газ имеет повышенное содержание паров ртути. В частности, повышенная концентрация Hg была зарегистрирована в районе Ташкента после землетрясения в апреле 1966 г. На этом основании было высказано предположение, что ртуть может служить предвестником землетрясений [89]. Н.А. Озерова даже ввела в научный оборот термин «ртутное дыхание Земли» [90]. Попутно отметим, что она является соавтором монографии «Очерки геохимии ртути» [91].

Реальность высказанного предположения показали результаты крупномасштабного эксперимента, проведенного в Институте физики высоких давлений АН СССР в августе 1981 г. по моделированию процессов формирования предвестников землетрясений под дей-

ствием механических нагрузок [92]. Выход радона из базальта (образцы кубической формы объемом 0,305 м<sup>3</sup>), начиная от фонового значения (без нагрузки) при последующем наложении постепенно увеличиваемых нагрузок вплоть до нагрузки разрушения, монотонно повышался в 22 раза. Выход ртути возрос в 3,6 раза при нагрузке, составляющей 10% от нагрузки разрушения, затем вернулся к фоновому значению и увеличился в 20 раз при нагрузке в 80% от разрушающей [93, 94]. Одновременно возросла на порядок акустическая эмиссия (потрескивание образца) [92]. Таким образом, было экспериментально установлено, что рост выхода ртути из блока горной породы свидетельствует о наступлении начальной фазы процесса разрушения: образования в объеме горной породы микротрещин-зародышей будущего разрыва.

Подобные эксперименты на 24 образцах каменного угля из метаноопасных шахт [95], сильвинита и карналлита (16 образцов) [96, 97] позволили установить, что при нагрузках, составляющих около 2/3 от разрушающих, выход паров ртути увеличивается в 3–8 раз, и по этому изменению можно судить об устойчивости горного массива [98].

Теперь остановимся на исследованиях метода регистрации ртутных предвестников землетрясений, проведенных в естественных условиях в сейсмически активной зоне в Таджикистане.

Начиная с ноября 1979 г., по распоряжению Президиума АН СССР, проводились ежедневные определения содержания ртути в водах скважин Явроз горячий и Явроз холодный (Таджикистан). С 11.11.79 по 29.11.79 регистрировался поток паров ртути «почва—атмосфера» [21]. Сравнение динамики изменения содержания Hg в воде при ежесуточных и ежечасных пробоотборах с ежечасными изменениями потока паров ртути показало значительно большую инерционность изменений содержания ртути в воде.

Высокую чувствительность потока паров ртути к сейсмическим колебаниям показали исследования, проведенные на окраине Душанбе с 1975 г. по 1985 г. Работу проводили следующим образом.

Измерительная аппаратура была установлена в бункере площадью 6 м<sup>2</sup> и высотой 2,5 м, полностью углубленном в грунт и оборудованном двойной входной дверью (тамбуром) (рис. 1). Для того, чтобы снять влияние изменения температуры на поток паров ртути, в бункере был установлен электрокамин с термисторным датчиком температуры, который обеспечивал постоянную температуру в бункере на уровне 22 ± 0,1 °С. Грунт, в котором размещался бункер, представлял из

себя лесс (мощность пласта более 100 м, размеры частиц 3–900 мкм, удельная поверхность 4,8 м<sup>2</sup>/г). Минералогический состав грунта: 60% кварца, 35% ортоклаза, плагиоклаза, примесей тяжелых минералов (амфибол, циркон, эпидот). Относительная влажность грунта в свободном залегании ~20%. Содержание ртути в почве: 12 мкг/кг до высушивания и 1,8–2 мкг/кг после высушивания при 105 °С. На поверхности частиц сорбировано 70% ртути (определено по содержанию ртути в ситовых фракциях лесса по методике [88]).

Для измерения величины потока паров ртути из грунта использовалась следующая система [102] (см. рис. 1). На глубине 1 и 2 м ниже пола бункера устанавливали пробоотборники (коробки из винипласта 50×50×5 см) вверх дном и засыпали их сверху грунтом. Пробоотборники соединяли пластиковыми трубками с входом и выходом ртутного анализатора. Количество ртути, поступившей в пробоотборник, измерялось атомно-флуоресцентным фотометром [99, 100] с накоплением паров ртути на золотом коллекторе [101]. Предел обнаружения Hg составлял 5 пг и воспроизводимость регистрации 30 пг ртути  $\sigma = 2\%$ .

Поток почвенных газов со скоростью 0,5 л/мин циркулировал в замкнутой системе пробоотборник—трубка—коллектор—анализатор—трубка—пробоотборник и таким образом вся ртуть после измерения воз-

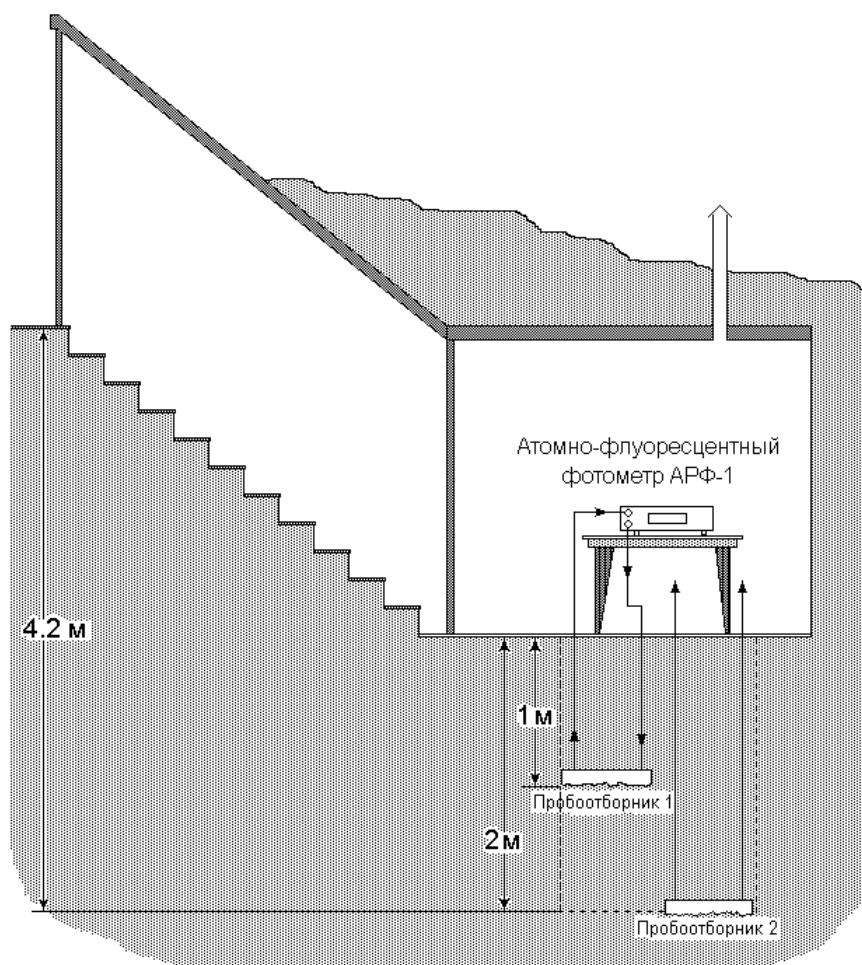


Рис. 1. Схема системы регистрации потока паров ртути «грунт—атмосфера»

вращалась в пробоотборник. Такой прием позволял предотвратить образование депрессионной воронки паров ртути в грунте, прилегающем к пробоотборнику.

Принципиальное отличие такой системы регистрации от измерения безразмерной величины — концентрации (г/г) паров ртути в воздухе помещения — заключается в физической размерности регистрируемой величины:  $\dim F = \text{масса} \cdot \text{длина}^{-2} \cdot \text{время}^{-1}$ . Ее полное название: поверхностная плотность потока паров ртути из земной коры в атмосферу. Кроме того, эта система регистрации значительно менее инерционна по отношению к измеряемой величине из-за меньшего демпфирующего действия объема пробоотборника ( $V = 12,5$  л) на поступивший в него почвенный газ, содержащий пары ртути, по сравнению с демпфирующим действием объема помещения ( $V = 15000$  л).

Достигнутое временное разрешение позволило зарегистрировать и измерить скорость восходящего потока почвенных газов. Для того чтобы убедиться в наличии восходящего потока грунтовых газов и оценить его скорость, в нижней пробоотборник было введено 50 нг паров ртути. Максимум поступления Hg в верхний пробоотборник был зарегистрирован через 12 часов. Затем такое же количество ртути было введено в верхний пробоотборник, и максимум поступления паров Hg в нижний пробоотборник был зарегистрирован через 37 часов. В предположении, что скорость восходящего потока представляет собой сумму конвективной и диффузионной компонент (соответственно равные  $V_c = 2,8$  см/ч и  $V_d = 5,5$  см/ч), суммарная скорость составила  $V_{\Sigma} = 8,3$  см/ч.

Всего за время регистрации выполнено около 25000 измерений. Непрерывный временной период регистрации составил 19040 часов. Размах зарегистри-

рованных значений потока Hg равен трем порядкам — от 40 до 40 000 пг/(м<sup>2</sup>·ч).

На рис. 2 представлен отрезок регистрограммы, приходящийся на период усиления сейсмической активности.

На регистрограмме наблюдаются внезапные выбросы, когда в течение часа поток Hg возрастал на 1—2 порядка и более. Часто выбросу предшествовал характерный спад, обычно за 6—9 ч до появления сигнала-предвестника. Всего за время наблюдения был зарегистрирован 51 предвестник: 12 землетрясений — 2 балла (по шкале MSK), 22 — 2,5 балла, 8 — 3 балла, 3 — 3,5 балла, 4 — 4 балла, 2 — 4,5 балла и 1 — 6,5 балла. Все они фиксировались за 100—200 ч до начала землетрясения и амплитуда их зависела от интенсивности будущего землетрясения.

Была проведена проверка предполагаемых предвестников на соответствие известным прогностическим закономерностям, которые выражаются следующими зависимостями:

$$\lg T = a + bM \quad (1)$$

где  $T$  — отрезок времени от момента регистрации предвестника до начала землетрясения — время предшествования;  $M$  — магнитуда землетрясения (чем больше магнитуда будущего землетрясения, тем раньше появляется его предвестник);

$$\lg(TR) = c + dM \quad (2)$$

где  $R$  — расстояние от точки регистрации предвестника до центра землетрясения, км;

$$\varepsilon = (10^{0,433M - 2,73} / R)^3 \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация земной коры в точке наблюдения предвестника.

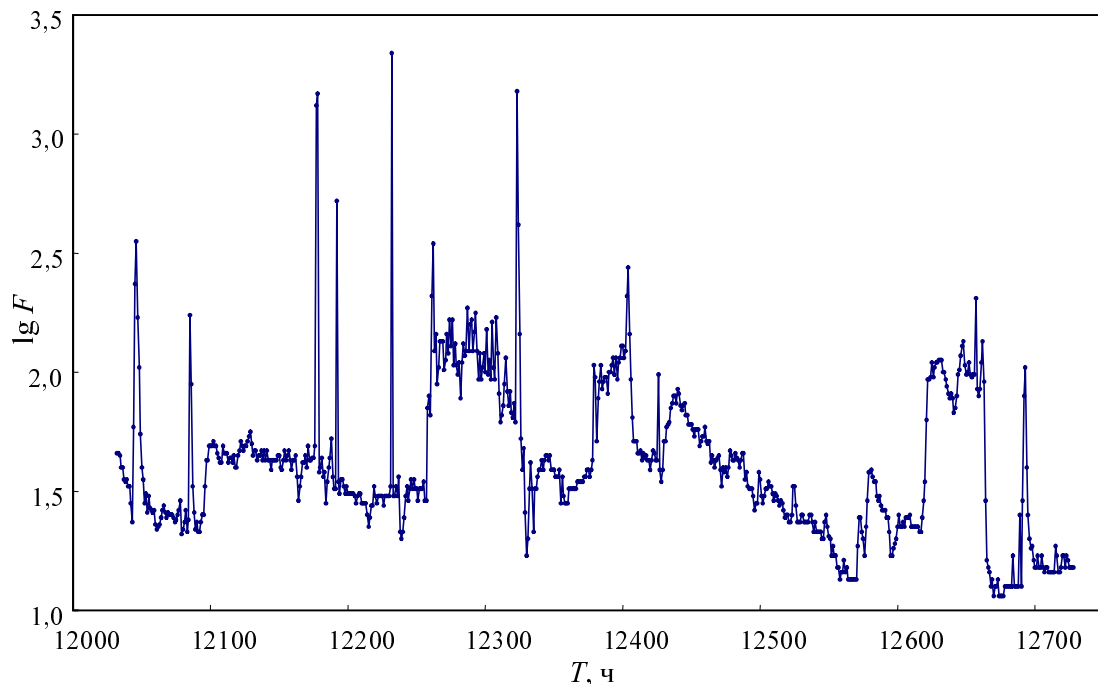


Рис. 2. Отрезок регистрограммы потока паров ртути (720 ч) в сейсмически активный период с записью предвестников землетрясений.

$F$  — поверхностная плотность потока паров ртути из земной коры в атмосферу (пг · м<sup>-2</sup> · ч<sup>-1</sup>)

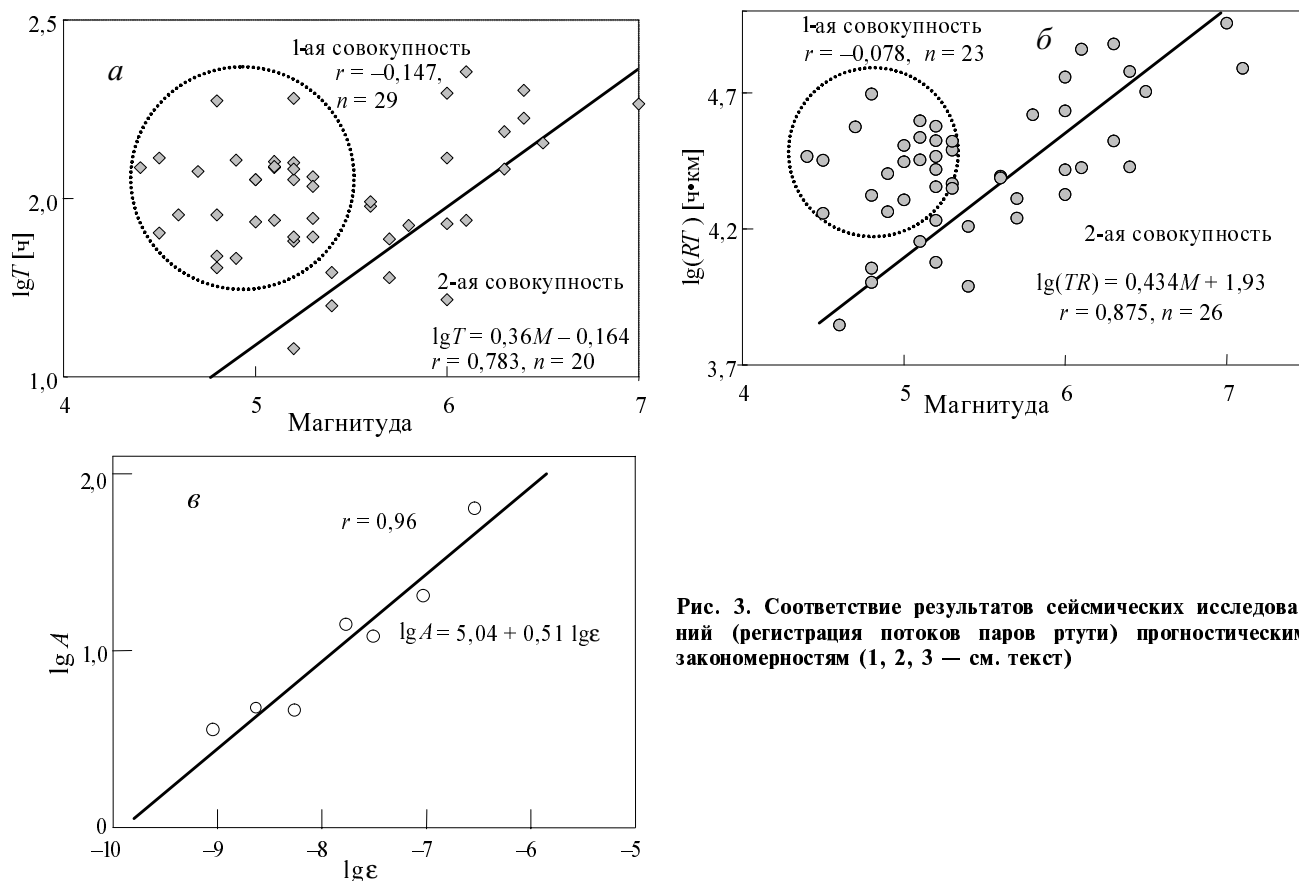


Рис. 3. Соответствие результатов сейсмических исследований (регистрация потоков паров ртути) прогностическим закономерностям (1, 2, 3 — см. текст)

Сведения о характеристиках землетрясений, в том числе об интенсивности в баллах (по шкале MSK) были взяты из оперативного бюллетеня Таджикского института сейсмологии и сейсмостойкого строительства.

На рис. 3а представлена зависимость времени предшествования от магнитуды. Видно, что только 20 точек лежат на прямой с коэффициентом корреляции  $r = 0,783$ . Центр расположения точек 1-ой совокупности приходится на значение  $M = 5$ . Возможно, это характеризует предел чувствительности, ниже которого слабые предвестники не могут достоверно реагировать на готоящееся слабое землетрясение.

На рис. 3б приведена зависимость, построенная в координатах второй прогностической закономерности. Из рисунка видно, что этой закономерности удовлетворяют 26 точек ( $r = 0,875$ ). Этот коэффициент корреляции значительно выше предыдущего, что говорит о заметном вкладе расстояния  $R$  в зависимость 2 (уточнение зависимости 1). Скорость распространения волны предвестников невелика (2–10 км/ч), и поэтому кроме магнитуды на время регистрации предвестника влияет расстояние от центра землетрясения до точки регистрации. Чем удаленнее центр землетрясения, тем время предшествования меньше. Вероятно, есть такое расстояние, на котором предвестник приходит одновременно с землетрясением. Точки, точно укладывающиеся на прямую, соответствуют мелкофокусным слабым землетрясениям с  $M = 4,6$ – $5,3$ , ощущавшимся в точке регистрации с интенсивностью 2–3 балла. Следовательно, имея три станции регистрации, можно предсказывать не только время и интен-

сивность землетрясения в точке регистрации, но и три расстояния до эпицентра, т.е. его координаты [103].

На рис. 3в представлена зависимость  $\lg A - \lg \epsilon$ , где  $A$  — амплитуда предвестника, средняя для землетрясений данной интенсивности,  $\epsilon$  — деформация, рассчитанная по формуле Добровольского [3, 5]. Полученная зависимость линейная, коэффициент корреляции этой зависимости  $r = 0,96$ . Близкое к единице значение коэффициента корреляции указывает на чрезвычайно высокую чувствительность изменений потоков паров ртути, вызванных ничтожными по величине (до  $10^{-9}$ ) деформациями земной коры предшествующими землетрясению. Она близка к чувствительности струнных и лазерных деформографов, предназначенных для прямого измерения таких деформаций.

Итак, последовательность действий по предсказанию землетрясений по «ртутным» предвестникам может быть следующей:

- 1) регистрация предвестника;
- 2) измерение его амплитуды ( $A$ ) как разности логарифмов потоков паров ртути;
- 3) расчет интенсивности ( $I$ ) будущего землетрясения в точке наблюдения в баллах по шкале MSK:  
 $I = 3,3A + 0,51$ ;
- 4) вычисление по интенсивности  $I$  времени землетрясения:  $T(\text{ч}) = 25I + 46$ .

В заключение остановимся на оценке неопределенности предсказания землетрясений по «ртутным» предвестникам.



По предсказанным и фактическим интенсивностям землетрясений среднеквадратичное отклонение этой величины составляет  $\sigma_T = \pm 0,4$  балла, а времени землетрясения  $\sigma_T = \pm 40$  ч. При игнорировании землетрясений с  $M < 5$  (а они действительно не угрожают разрушениями) погрешность в определении  $\sigma_T = \pm 25$  ч. Выяснение влияния внешних факторов на величину потока паров ртути, таких как земные деформации, атмосферное давление, изменение проницаемости грунта в ближних окрестностях (10—20 м) от пункта наблюдения под действием росы, дождя, промерзания грунта, и учет действия этих факторов, безусловно, позволят повысить точность регистрации амплитуд «ртутных» предвестников и точность предсказания землетрясений в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993, 334 с.
2. *Эйби Дж.А.* Землетрясения. М.: Недра, 1982, 117 с.
3. *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Pure Appl. Geophys., 1979, v. 117, p. 1025.
4. *Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984, 164 с.
5. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М., 1991, 230 с.
6. *Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.* Прогноз землетрясений 1983—1984, № 3, с. 67.
7. *Добровольский И.П.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1980, № 11, с. 23.
8. *Зубков С.И.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1987, № 5, с. 87.
9. *Голицын Б.Б.* Избранные труды. Т. 2. Сейсмология. М.: Изд. АН СССР, 1960, с. 7.
10. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: Издательство, 1963, с. 17.
11. *Гир Дж., Шах Х.* Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М.: Мир, 1988, с. 128.
12. *Садовский М. и др.* Прогноз землетрясений 1983—1984, № 3, с. 56.
13. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. (ред. В.П. Головкин). Ташкент: ФАН, 127 с.
14. Каталог предвестников землетрясений. Под ред. С.И. Зубкова. М.: ИФЗ АН СССР. 1983, 140 с.
15. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений. Ташкент: ФАН, 1983, 135 с.
16. *Асада Т., Исибаси К., Матсуда Т.* Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984, 340 с.
17. *Мози К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1989, 305 с.
18. *Алимова В.А., Зубков С.И.* Каталог предвестников землетрясений. Гидрогеодинамические предвестники. М.: ИФЗ АН СССР, 1983, 140 с.
19. *Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А. и др.* Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982, 214 с.
20. Гидрогеологические исследования на прогностических полигонах. Тез. докл. Всесоюз. сов. Алма-Ата: Наука, 1983, с. 81.
21. Гидрогеохимические предвестники землетрясений. Под ред. Г.М. Варшал. М.: Наука, 1985, 286 с.
22. *Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992, 192 с.
23. *Рикитакэ Т.Р.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979, 388 с.
24. *Карус Е.В., Кузнецов О.Л.* Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1980, 184 с.
25. *Rikitake T.* Earthquake forecasting and warning. D. Reidel, 1982, 410 p.
26. *Барсуков В.Л.* Диплом на открытие № 216, 1968.
27. Патент США 4612506, 18.01.1982.
28. *Varotsos P., Alexopoulos K.* Tectonophys., 1984, v. 110, p. 73.
29. *Varotsos P., Alexopoulos K.* Ibid., 1984, v. 110, p. 99.
30. *Varotsos P., Alexopoulos K.* Ibid., 1987, v. 136, p. 335.
31. *Swinbanks D.* Nature, 1995, v. 375, p. 617.
32. *Massood E.* Ibid., 1995, v. 375, p. 617.
33. *Massood E.* Ibid., 1996, v. 384, p. 100.
34. Earthquakes prediction: The Scientific Challenge, Collected papers. National Academy Press. Washington. DC 20055. [http://www.ras.org.uk/ras].
35. *Моргунов В.А.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1999, № 1, с. 79.
36. Geophys. Res. Letters, 1996, v. 23, p. 1291—1452.
37. *Trique M., Richon P., Perrier F. e. a.* Nature, 1999, v. 399, p. 137.
38. *Мавлянов Г.А., Султанходжаев А.Н., Уломов В.И. и др.* Диплом на открытие № 129, 1973.
39. *Киссин И.Г.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1988, № 6, с. 3.
40. *Мячкин В.И., Зубков С.И.* Там же, 1973, № 6, с. 34.
41. *Монахов Ф.И.* Там же, 1979, № 1, с. 91.
42. *Монахов Ф.И.* Геохимия, 1979, № 3, с. 345.
43. *Wakita H.* Science, 1975, v. 189, p. 553.
44. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968, с. 283.
45. *Тугаринов А.И., Сардаров С.С.* ДАН СССР, 1975, т. 223, с. 856.
46. *Хитаров Н.И., Войтов Г.И.* Природа, 1982, № 3, с. 6.
47. *Kissin I.G. J.* Earthquake Prediction Res., 1992, v. 1, p. 235.
48. *Стахеев Ю.И.* В сб. Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985, с. 81.
49. *Киссин И.Г.* Геохимия, 1979, № 3, с. 338.
50. *Wakita H. J.* Phys. Earth, 1977, v. 25, p. 175.
51. *Hauksson P. J.* Geophys. Res., 1981, v. 86, p. 9397.
52. *Wakita H., Nakamura Y., Sano Y.* Pure Appl. Geophys., 1988, v. 126, p. 267.
53. *Wakita H., Igarashi G., Nakamura Y.* Geophys. Res. Letters, 1989, v. 16, p. 417.
54. *Wakita H., Igarashi G., Nakamura Y.* Ibid., 1991, v. 18, p. 629.
55. *Igarashi G., Tohjima Y., Wakita H.* Ibid., 1993, v. 20, p. 1807.
56. *Wakita H.* Science, 1980, v. 210, p. 2146.
57. *Тугаринов А.И., Сардаров С.С.* ДАН СССР, 1975, т. 223, с. 856.
58. *Sugisaki R.* Science, 1981, v. 212, p. 1264.
59. *Wakita H., Sano Y.* Nature, 1983, v. 305, p. 792.
60. *Kawabe I.* Geochem. J., 1987, v. 21, p. 105.
61. *Султанходжаев А.Н., Абдуллаев А.А., Хасанова Л.Д. и др.* Узб. геол. журнал, 1982, № 2, с. 34.
62. *Yangfen I., Zonghua W., Chunsheng S. e. a. J.* Geochem. Explor., 1989, v. 33, p. 195.
63. *Абдуллаев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П.* ДАН СССР, 1986, т. 291, с. 924.
64. *Schroeder G.L., Kramer H.W., Evans R.D. J.* Geophys. Res., 1965, v. 70, p. 471.
65. *Тугаринов А.И., Осипов Ю.Г.* Геохимия, 1977, № 7, с. 992.

66. *Mogro-Campero A., Fleisher R.L.* J. Geophys. Res., 1978, v. 83, p. 3539.
67. *Fleischer R.L., Mogro-Campero F.* Geochim. Cosmochim. Acta, 1985, v. 49, p. 1061.
68. *Chi-Yu-King.* Nature, 1978, v. 271, p. 516.
69. *Сардаров С.С., Алибеков Б.И.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1977, № 9, с. 102.
70. *Сардаров С.С.* ДАН СССР, 1978, т. 243, с. 306.
71. *Сардаров С.С., Паишук М.Г.* Геохимия, 1986, № 9, с. 1329.
72. *Рудаков В.П.* Геология и геофизика, 1985, № 1, с. 63.
73. *Рудаков В.П.* Геохимия, 1985, № 1, с. 124.
74. *Абдувалиев А. К., Войтов Г.И., Рудаков В.П.* ДАН СССР, 1988, т. 300, с. 1337.
75. *Рудаков В.П.* Там же, 1988, т. 302, с. 1183.
76. *Chi-Yu-King.* J. Geophys. Res., 1986, v. 91, p. 269.
77. *Jiang Fong-Liang.* Geophys. Res. Lett., 1981, v. 8, p. 469.
78. *Li Xuanhu.* J. Earthquake Prediction Res., 1992, v. 1, p. 223.
79. *Davies D.* Nature, 1975, v. 258, p. 286.
80. *Raleygh B., Bennet G., Creig H.* EOS Trans., 1977, v. 58, p. 236.
81. *Klusman R.W., Webster J.D.* Bull. Seism. Soc. Am., 1981, v. 71, p. 211.
82. *Klusman R.W.* Geophys. Res. Lett., 1981, v. 8, p. 461.
83. *Klusman R.W., Jaacks J.A.* J. Geochem. Explor., 1987, v. 27, p. 259.
84. *Larimer G.W., Anders E.* Geochim. Cosmochim. Acta, 1967, v. 31, p. 901.
85. *Стахеев Ю.И., Лаврухина А.К., Стахеева С.А.* Геохимия, 1975, № 9, с. 1390.
86. *Somayajulu B.L.K.* Proc. Indian Acad. Sci., 1975, v. 81A, № 3, p. 137.
87. *Стахеев Ю.И., Лаврухина А.К., Стахеева С.А.* Наука и жизнь, 1976, № 1, с. 82.
88. *Stakheev Yu.A., Gerasimovsky V.I., Stakheeva S.A.* Geochem. Internal., 1975, v. 13, p. 1668.
89. *Фурсов В.З., Вольфсон Н.Б., Хваловский А.Г.* ДАН СССР, 1968, т. 179, с. 1213.
90. *Озерова Н.А.* Там же, 1978, т. 239, с. 450.
91. *Сауков В.А., Айдинян Н.Х., Озерова Н.А.* Очерки геохимии ртути. М.: Наука, 1972, с. 336.
92. *Соболев Г.А., Семерчан А.А., Салов Б.Г. и др.* Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1982, № 8, с. 29.
93. *Varshall G.M., Sobolev G.A., Barsukov V.L. et al.* Pure Appl. Geophys., 1985, v. 122, p. 463.
94. *Варшал Г.М., Соболев Г.А., Барсуков В.Л. и др.* Сб. Гидро-геохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985, с. 49.
95. *Пережилов А.Е., Стахеев Ю.И., Ибраев Т.А.* Горный журнал, 1995, № 1, с. 1.
96. *Пережилов А.Е., Стахеев Ю.И., Ибраев Т.А.* Там же, 1995, № 2, с. 14.
97. *Pereshilov A.Je., Dikolenko Je.Ja., Kotschenov P.A.* Glükauf, 1995, № 3, p. 18.
98. Патент РФ № 2013561, 28.01.1991.
99. *Стахеев Ю.И., Стахеева С.А.* Заводская лаборатория, 1976, т. 42, с. 144.
100. *Stakheev Yu. I., Tatsy Yu.G., Bezudnov I.V.* Book of Abstr. РУТТcon-98, USA, New Orleans, 1998, March 1–5, p. 100.
101. Патент РФ № 1695197, 31.07.1993.
102. *Стахеев Ю.И., Бакалдин Ю.А., Ибраев Т.А.* Свид. на полезный образец № 12263, 18.03.1998.
103. Патент РФ № 2145098, 18.03.1998.